

ИСТОЧНИКИ, ПУТИ И МАСШТАБЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ

УДК 631.41:504.5

АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СВОЙСТВ ПОЧВ ЛАНДШАФТОВ ТАЙМЫРА

© 2022 г. А. И. Сысо^{а, *}, Д. А. Соколов^{а, b}, Т. И. Сиромля^а, Ю. В. Ермолов^а, И. Д. Махатков^{а, b}

^аИнститут почвоведения и агрохимии СО РАН, пр-т Акад. Лаврентьева, 8/2,
Новосибирская область, Новосибирск, 630099 Россия

^bНаучно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики филиал ФИЦ
Красноярский научный центр СО РАН, ул. Комсомольская, 1, Норильск, 663305 Россия

*e-mail: syso@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 23.11.2021 г.

После доработки 14.12.2021 г.

Принята к публикации 30.12.2021 г.

В целях оценки экологического состояния и антропогенной трансформации почвенного покрова Таймыра изучены состав и свойства почв естественных и техногенных ландшафтов на северо-западе Среднесибирского плоскогорья и в Северо-Сибирской низменности. В техногенных ландшафтах исследованы литостраты сильнокаменистые (Skeletal Technosols) и органолитостраты торфяно-тяжелосуглинистые (Endoskeletal Technosols), в техногенно-нарушенных ландшафтах – подбуры (Spodic Cryosols), криоземы (Turbic Cryosols), хемокриоземы (Toxic Turbic Cryosol), хемолитоземы криогумусовые (Toxic Leptosols). В естественных ландшафтах низменности изучены криоземы, торфяно-криоземы (Histic Cryosols), торфяно-глеоземы (Haplic Cryosols), аллювиальные (Fluvisols) и аллювиальные глеевые (Gleyic Fluvisols) почвы. На Таймыре располагается Таймыро-Норильская платиноидно-медно-никелевая провинция. Поэтому почвы Норильского промышленного района исходно или техногенно обогащены Cu, Ni, Co, Cr, S–SO₄. В качестве региональных фоновых величин валового содержания тяжелых металлов и водорастворимых сульфатов предлагаются их значения (мг/кг почвы): для Северо-Сибирской низменности – Cu 45, Ni 45, Co 15, Cr 80, S–SO₄ 10; для Норильского промышленного района – Cu 75, Ni 90, Co 40, Cr 170, S–SO₄ 20.

Ключевые слова: деградация почв, оценка загрязнения, тяжелые металлы, сульфаты, фоновое содержание, региональные нормативы

DOI: 10.31857/S0032180X22050082

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата и промышленная деятельность на циркумполярных территориях вызывают трансформацию почвенного и растительного покрова и других компонентов арктических экосистем, чувствительных к воздействию природных и техногенных факторов [10–13, 23–30].

В российской арктической зоне многолетнее негативное техногенное механическое и химическое воздействие на почвенный и растительный покров естественных ландшафтов оказывают предприятия нефте- и газодобычи, добычи и переработки руд цветных и благородных металлов, других полезных ископаемых. В результате их деятельности в разных районах Арктики сформировались техногенные ландшафты с разрушенными и/или загрязненными почвами, техногенными грунтами, отвалами и др.

Мощными источниками экологически опасных поллютантов, прежде всего тяжелых метал-

лов (ТМ) – Cu, Ni, Co, а также SO₂, служат предприятия по добыче и переработке сульфидных медно-никелевых руд. Установлено негативное воздействие на почвы, растения и животных наземных экосистем, компоненты водных экосистем газопылевых выбросов объектов ПАО “Горно-металлургическая компания “Норильский никель” (“ГМК “Норильский никель”) – комбинатов “Североникель” и “Печенганикель” на Кольском полуострове [2, 3, 10–13], предприятий на Таймыре [1, 8, 9, 20, 22].

В отличие от Кольского полуострова, где состав и свойства почв и их антропогенная трансформация в естественных и техногенных ландшафтах подробно изучены, на Таймыре, в том числе в Норильском промышленном районе (НПР), таких исследований проведено мало. Специфика почвообразования в естественных ландшафтах тундры Таймыра, свойств и элементного химического состава его почв описаны в работах Васильевской с соавт. [4–6]. Ими выявлено биоге-

ное обогащение тяжелыми металлами-микроэлементами (Mn, Ti, Co, Ni, Cu) поверхностных маломощных (0–4 (7) см) гумусовых и торфянистых (оторфованных) горизонтов тундровых почв, увеличение содержания меди, никеля, кобальта и хрома в почвах с утяжелением их гранулометрического состава, отсутствие четкой дифференциации содержания микроэлементов по профилю почв из-за криотурбации почвенной толщи. Весьма важным для познания и оценки пространственного изменения в почвенном покрове Западного Таймыра валового содержания микроэлементов является отмеченное закономерное его увеличение от наименьшего в районе р. Усть-Тареи, к среднему в долине р. Агапы и наибольшему в долине р. Косой, связываемое с Норильским медно-никелевым месторождением. На связь с ним указывают приведенные данные о возрастании в этом направлении содержания меди и никеля в почвах и почвообразующих породах.

Определение и оценка пространственного и профильного изменения содержания и статуса (форм химических соединений) меди, никеля и кобальта техногенных ландшафтов Норильского промышленного района [22] показали максимальную аккумуляцию ТМ в верхнем (0–5 см) слое почв. Она объяснялась накоплением в нем газопылевых техногенных выбросов, с которыми связывали чрезвычайно высокий уровень загрязнения территории г. Норильска и его окрестностей на расстоянии 4 км. Сильное загрязнение ТМ почв было выявлено на расстоянии 25 км и далее от границ города. В распределении ТМ в почвах, наряду с максимумом их содержания в поверхностном слое, в нижней части почвенного профиля вплоть до горизонта многолетней мерзлоты был выявлен второй максимум накопления ТМ. Его возникновение объяснялось исключительно переносом ТМ нисходящим током вод в надмерзлотный горизонт почв. При этом была проигнорирована возможная связь высокого содержания ТМ в нижней части профиля почв с Норильским медно-никелевым месторождением.

Исследования, проведенные ранее [8, 20], позволили определить влияние природных и антропогенных факторов на содержание микроэлементов в почвах, растениях и животных, поведение ТМ в системах почва–растение, газопылевые выбросы–почва–растение–животные. Полученные данные показали возможную связь высокого содержания ТМ в почвах и растениях с региональными рудопроявлениями, влияние свойств почв на подвижность ТМ в почвах и поступление их в растения, а также роль биологических факторов в аккумуляции ТМ в растительных и животных органах и тканях, миграции их в пищевой цепи.

Цель работы состоит в анализе данных многолетних почвенно-экологических исследований

состава и свойств почв естественных и техногенных ландшафтов на разных геоморфологических структурах Таймыра, в оценке экологического состояния почв, их антропогенной трансформации, с учетом региональной специфики почвообразования в районах рудопроявлений и загрязнения окружающей среды. Задачи работы : 1) оценка состава и свойств естественных, техногенно-нарушенных и техногенных почв на территориях с разным уровнем загрязнения окружающей среды и типом воздействия на почвенный покров; 2) определение закономерностей пространственного и профильного изменения состава и свойств почв, нормируемых химических веществ в них; 3) обоснование критериев оценки экологического качества почв Таймыра с учетом региональной специфики почвообразования и техногенного загрязнения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования служили разные по генезису и условиям формирования почвы естественных и техногенных ландшафтов Таймыра. Они изучались в период 2010–2020 гг. при проведении почвенно-экологических исследований на различных промышленных и природных объектах в наиболее освоенной западной части полуострова (рис. 1).

Исследованы почвы 12-ти объектов двух регионов Таймыра – северо-западной части Среднесибирского плоскогорья и западной части Северо-Сибирской (Таймырской) низменности, существенно отличающихся в геологическом, геохимическом, экологическом отношениях [7, 14, 16]. Почвообразование протекает здесь на разных по генезису, свойствам, гранулометрическому, минералогическому и элементному химическому составу почвообразующих породах, в различных природных и техногенных условиях. К последним относятся механическое разрушение почв и создание почвоподобных тел, загрязнение окружающей среды газопылевыми выбросами, различными стоками и разливами от разных производств, но прежде всего объектов компании “Норильский никель”. Относительно их определены границы зон его воздействия на окружающую природную среду Таймыра, включающие импактные и буферные зоны, фоновые и условно-фоновые территории. В качестве центра загрязнения принят район Надеждинского металлургического завода (НМЗ), от которого в табл. 1 указаны направления и расстояния до объектов исследований.

На Среднесибирском плоскогорье объекты располагались на хребте Лонгдокойский Камень (Норильское плато) и горах Харыялах (плато Харыялах) с абсолютными высотами 200–600 м, а также в разделяющей их Норило-Рыбнинской (Норильской) долине (длиной 170 км, шириной 40–60 км, абсолютными высотами 30–200 м). В по-

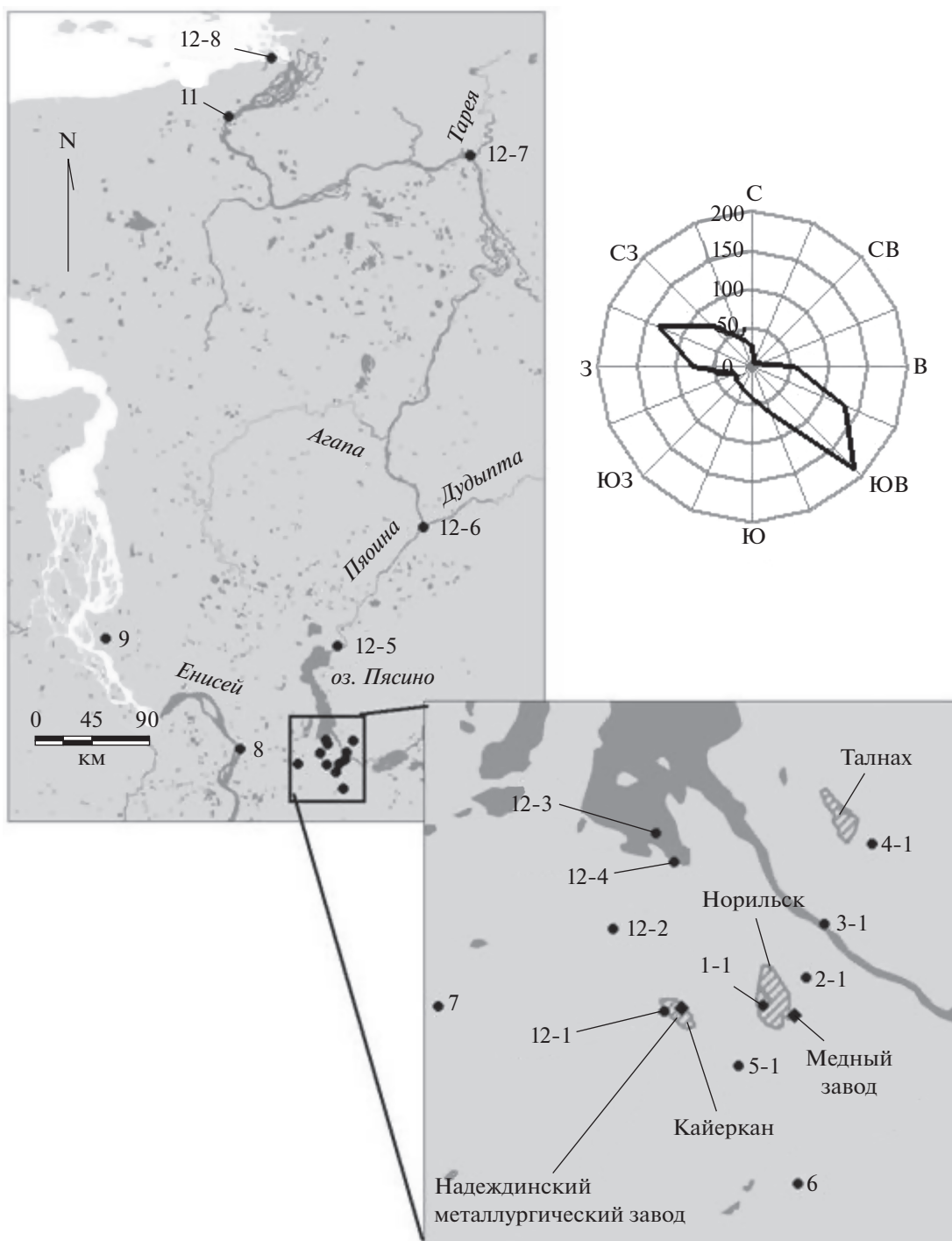


Рис. 1. Схема размещения объектов почвенно-экологических исследований на Таймыре.

следней находятся г. Норильск, реки Норильская, Амбарная, озеро Пясино и другие водоемы [14, 16, 18]. Здесь изучены почвы техногенных (т), техногенно-нарушенных (тн), условно-фоновых (уф) и фоновых (ф) ландшафтов НПР. К нему относятся: объект 1 – Норильская нефтебаза (участок (уч.) 1-1т – техногенный на литострате сильно-

скелетном с песчаным-легкосуглинистым мелкоземом (Spolic Technosols)); объект 2 – опытные поля НИИСХиЭА филиал ФИЦ КНЦ СО РАН в левобережной долине р. Норилка (уч. 2-1тн – техногенно нарушенный, естественный луг на криоземах (Turbic Cryosols)); объект 3 – правобережная долина р. Норилка до р. Талнах и Листвянка у подно-

Таблица 1. Общая характеристика объектов почвенных исследований

№ объекта	Участок	Направление	Расстояние, км	Основные типы почв	Год
1	1-1т	В	8	Литостраты	2010
2	2-1тн	В	15	Криоземы	2013
3	3-1тн	СВ	22	Подбуры	2013
4	4-1тн	СВ	26	Подбуры, криоземы	2013
5	5-1тн	ЮВ	8	Хемолитоземы	2016
6	6-1тн	ЮВ	15	Киоземы, хемокриоземы	2015–2016
	6-2уф	В	18	Подбуры	
7	7-1т	З	24	Органолитостраты	2010
	7-2уф			Криоземы	
8	8-1т	З	72	Литостраты	2010
	8-2уф			Криоземы	
9	9-1тн	СЗ	180	Криоземы	2012
	9-2ф–9-3ф			Криоземы	
10	10-1ф	С	250	Криоземы	2013
11	11-1ф–11-5ф	С	700	Глеезем, криоземы, болотные, аллювиальные	2014
12	12-1тн	С	0–5	Аллювиальные Торфяно-криоземы	2020
	12-2тн	С	14	Аллювиальные	
	12-3тн	С	24–28	Аллювиальные	
	12-4тн	С	31–33	Аллювиальные	
	12-5уф	С	111–118	Аллювиальные	
	12-6ф	С	256–258	Аллювиальные Торфяно-глеевые	
	12-7ф	С	626	Аллювиальные	
	12-8ф	С	941	Торфяно-глееземы, глееземы крио-турбированные	

зия гор у города Талнах (уч. 3-1тн – техногенно-нарушенный на подбурах (Spodic Cryosols)); объект 4 – гористые окрестности города Талнах (уч. 4-1тн – техногенно-нарушенный на подбурах (Spodic Cryosols), криоземах (Turbic Cryosols)); объект 5 – лицензионный участок месторождения Норильск 1 (уч. 5-1т – техногенно-нарушенный на хемолитоземе криогумусовом легкосуглинистом (Toxic Leptosols)); объект 6 – лицензионный участок Черногорского месторождения в северо-восточной части хребта Лонгдокойский Камень (уч. 6-1тн – техногенно-нарушенный на криоземах (Turbic Cryosols) и хемокриоземах (Toxic Turbic Cryosols), уч. 6-2уф – условно-фоновый на подбурах (Spodic Cryosols)).

Западнее г. Норильска, на Северо-Сибирской низменности изучены: объект 7 – почвы топливно-заправочного комплекса аэропорта Алыкель и прилегающей к нему ненарушенной территории (уч. 7-1т – техногенный на органолитострате торфяно-тяжелосуглинистом маломощном (Spolic

Technosols), уч. 7-2уф – условно-фоновый на криоземах грубогумусовых средне- и тяжелосуглинистых, торфяно-криоземах среднесуглинистых (Turbic Cryosols)); объект 8 – Дудинская нефтебаза в г. Дудинка (уч. 8-1т – техногенный на литострате скелетном с песчаным-легкосуглинистым мелкоземом (Spolic Technosols), уч. 8-2уф – условно фоновый на криоземах грубогумусовых (Turbic Cryosols)); объект 9 – Пайяхское нефтяное месторождение в верховьях реки Пайяха (уч. 9-1тн – техногенно-нарушенный, уч. 9-2ф и 9-3ф – фоновые на криоземах и торфяно-криоземах (Turbic Cryosols)).

На Северо-Сибирской низменности изучены: объект 10 – почвы естественных ландшафтов в устье реки Дудыпта (уч. 10-1ф – фоновый на криоземах и торфяно-криоземах (Turbic Cryosols и Histic Cryosols)); объект 11 – верховье устья реки Пясины на Пясинском кластере заповедника “Большой Арктический” (фоновые уч. 11-1ф–11-5ф, где в поймах и на надпойменных террасах сформиро-

вались аллювиальные (Fluvisols) и аллювиальные глеевые (Gleyic Fluvisols) почвы, торфяно-глееземы (Haplic Cryosols), а на коренном берегу криоземы (Turbic Cryosols).

Наиболее полно исследованы состав и свойства техногенно-нарушенных и фоновых аллювиальных и тундровых почв трансекты юг-север Таймыра объекта 12 – на разноудаленных от Надеждинского завода в НПП участках Норило-Пясинской озерно-речной системы до Карского моря. Изученные 60 ключевых участков с пробными площадками и разрезами объединены в 8 участков (12-1тн–12-8ф) по общности загрязнения, состояния почвенного и растительного покрова.

Изучение почв трансекты юг-север Таймыра представляло особый научный интерес, поскольку его участки испытывают различный уровень техногенного воздействия, расположены на разных геоморфологических структурах и отличаются между собой по состоянию почвенного и растительного покрова. В долинах рек Амбарная, Далдыкан, Пясины (на уч. 12-1тн–12-7ф) почвенный покров формируют аллювиальные (Fluvisols), аллювиальные глеевые (Gleyic Fluvisols), аллювиальные гумусовые (Folic Fluvisols) почвы, а на уч. 12-1тн еще и торфяно-криоземы (Histic Cryosols), торфяно-глеевые (Histic Gleysols) почвы. На берегу Карского моря (уч. 12-8ф) почвенный покров образуют торфяно-глееземы и торфяно-глееземы криотурбированные (Histic Cryosols), глееземы криотурбированные (Dystric Gleysols).

Важным для понимания различий экологического состояния почв долин рек Далдыкан, Амбарная и прилегающих к ним территорий НПП является то, что они формируются с участием техногенных пород среди техногенных ландшафтов, при перепаде высот между уч. 12-1тн и 12-2тн в 140 м или до 10 м/км. В таких условиях реки имеют сильные течение и энергию переноса растворенных и взвешенных веществ, а ландшафты – потенциально хорошую дренируемость и способность к самоочищению от поллютантов за счет их выноса с тальми и ливневыми водами. В переходной к Северо-Сибирской низменности зоне, расположенной между уч. 12-2тн и 12-3тн перепад высот меньше – около 10 м или до 0.7 м/км. Далее на уч. 12-4тн р. Амбарная становится равнинной, в южной части озера Пясино. Снижение энергии речных вод уменьшает их способность переносить поллютанты и усиливает осаждение последних в донные отложения рек и почвы их долин.

Отбор почвенных проб на топографически привязанных пробных площадках объектов исследований проводили стальной или пластиковой лопаткой в полиэтиленовые мешки. Площадки характеризовали типичные техногенные или техногенно-нарушенные участки объекта, сходные по положению в ландшафте с условно-фоно-

выми или фоновыми участками. Для лабораторных исследований почв объединенные образцы отбирали преимущественно из слоя 0–20 см, а при возможности из слоев 0–5(10) и 5(10)–20 см. В разрезах пробы отбирали по генетическим горизонталам почвы до мерзлого слоя (40–70 см).

Подготовка почвенных проб к анализам включала их высушивание до состояния воздушно-сухого вещества, растирку фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, просеивание через сито с ячейками 1 мм для получения мелкозема на исследование и определения скелетных частиц. Для определения органического вещества мелкозем дополнительно растирали в агатовой ступке и просеивали через сито 0.25 мм, а для атомно-эмиссионного анализа пробы растирали до состояния пудры.

Все лабораторные исследования почв выполнены по действующим в России стандартным методикам, на поверенных приборах и оборудовании.

Потенциометрическим методом измеряли реакцию среды солевой суспензии при отношении почва : раствор 1 : 2.5 (pH_{KCl}), а также – водной вытяжки при отношении почва : раствор 1 : 5 (pH_{H_2O}). Колориметрическим методом определяли концентрацию обменного алюминия, гравиметрическим – сухой остаток водной вытяжки (СО) и содержание в ней сульфатной серы ($S-SO_4$), капиллярным электрофорезом – концентрацию сульфат- и других ионов.

Гранулометрический состав, в основном содержание физической глины (частиц <0.01 мм) в почвах, определяли пипеточным методом, органического вещества (ОВ) – окислением смесью 0.4 н. $K_2Cr_2O_7$ в разбавленной (1 : 1) H_2SO_4 при нагревании до $125^\circ C$ в сушильном шкафу.

Общее (валовое) содержание макро- и микроэлементов в основном определяли методом оптической атомно-эмиссионной спектроскопии с использованием дугового аргонного двухструйного плазмотрона, спектрометра (PGS-2) и многоканального анализатора эмиссионных спектров. Предварительно пробы озоляли в муфельной печи при температуре $+450^\circ C$.

Методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии в зольных растворах после кислотного разложения почвенных образцов определяли валовое содержание металлов, а концентрация их подвижной формы – в экстракте из почв 1 М ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4.8 (1 М CH_3COONH_4) при отношении почвы к раствору 1 : 10.

Содержание в почвах нефтепродуктов (НП), экстрагируемых гексаном, определяли флуориметрическим методом.

Калибровку приборов и контроль точности измерений химических элементов в почвах выпол-

няли по аттестованным значениям их массовой доли в стандартных образцах почв и растений. Относительная погрешность измерений была в пределах 10%.

Результаты измерений приведены в расчете на сухое вещество почв, химических элементов – на элемент.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью пакета программ Microsoft Excel и Statistika 10.0. В таблицах указаны медианные (для одного генетического горизонта) и медианные взвешенные (для нескольких горизонтов в слое) значения показателей состава и свойств почв. На рисунках приведены медианы, первый–третий квартили, минимальные–максимальные значения и выбросы. Корреляционный анализ проводили с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s), в отдельных случаях дополнительно использовали регрессионный метод. Во всех процедурах статистического анализа критический уровень значимости p принимали равным 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований показали, что почвы естественных и техногенных ландшафтов Таймыра существенно различаются по составу и свойствам (табл. 2). Реакция среды почв варьирует от средне- и слабокислой pH_{KCl} 4.6–5.5 и 5.1–5.5 до близкой к нейтральной и нейтральной pH_{KCl} 5.6–6.0 и 6.0–7.0 соответственно, характерной для тундровых почв Таймыра, по мнению Васильевской [4]. Между значениями pH_{H_2O} и pH_{KCl} обнаружены различия в 0.3–1.8 ед. pH , вероятно, обусловленные насыщенностью почвенного поглощающего комплекса ионами H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} .

Очень сильнокислые почвы ($pH_{KCl} < 4.0$) выявлены в наиболее техногенно-нарушенных ландшафтах, подобных техногенным пустошам. Сильная кислотность почв предполагает высокую подвижность и концентрацию в них ТМ и фитотоксичного обменного алюминия (Al^{3+}) [12]. Очень высокая концентрация последнего установлена в почвах пробных площадок вблизи (до 5 км) НМЗ – уч. 12-1тн, где $pH_{KCl} < 3.0$, а растительность отсутствовала, либо была сильно угнетена (рис. 2). Сильнокислые почвы, выявленные на объектах исследований, для условий произрастания на них растений нуждаются в проведении хемотабиллизации, включающей известкование почв [12, 13].

В Норильском промышленном районе есть несколько причин возникновения сильной кислотности техногенно-нарушенных почв. Первой причиной может быть образование в почвах серной кислоты и ее солей из серы и диоксида серы

техногенных газопылевых выбросов и водных сбросов, приводящее к подкислению почв, обогащению их подвижными, в том числе водорастворимыми, солями, содержащими $S-SO_4$ и ТМ. Другой причиной этого считают окисление сульфидных медно-никелевых руд, отходов их добычи и переработки, с чем связывают повышенную минерализацию речных вод и концентрацию в них сульфатов и ТМ [1, 18].

В литостратах Норильской нефтебазы (уч. 1-1т) и органолитостратах Дудинской нефтебазы (уч. 8-1т) обнаружена слабощелочная реакция среды, возможно, обязанная присутствию в них карбонатов и карбонатов, из покровных и горных пород Таймыра. Наличие этих минералов в почвах и почвообразующих породах объясняет отмеченную ранее естественную близкую к нейтральной реакцию среды (pH_{H_2O} 6.5–7.5) фоновых почв [4] и поверхностных вод [1] на его территории, а также может служить основой потенциальной буферности почв по отношению к SO_2 и другим кислотным компонентам техногенных газопылевых выбросов, в том числе ТМ.

Гранулометрический состав почв Таймыра широко варьирует – от песчаного до тяжелосуглинистого (табл. 2, рис. 2). Его особенность – малое содержание илистых частиц (< 0.001 мм), медиана которого 5.8%, а варьирование от 0.7 до 10.1%. Глинистые минералы в почвах Таймыра слабо изучены, но установлено, что в горных подбурях велика доля гидрослюд, а в тундровых почвах Северо-Сибирской низменности – монтмориллонита [4]. Невысокое содержание в почвах глинистых минералов и органического вещества предполагает их незначительную способность сорбировать ТМ и другие поллютанты.

В почвах естественных ландшафтов фоновых территорий Северо-Сибирской низменности низкое содержание легкорастворимых солей, их сухой остаток в водной вытяжке, как правило, менее 0.05%, но он возрастает до 0.1% в направлениях на север к Карскому морю и на юг к г. Норильску.

По агрохимическим нормативам содержание $S-SO_4$ в почвах Средне-Сибирской низменности в основном низкое (менее 6 мг/кг), но иногда возрастающее до среднего (6.1–12.0 мг/кг). Пространственное изменение содержания $S-SO_4$ в почвах Таймыра аналогично описанному для солей и отражает зависимость его от природных и техногенных факторов. К первым относятся засоленные морские осадочные отложения низменности и морские соли, ко вторым – газопылевые выбросы и стоки предприятий НПП, а также продукты выветривания руд, отвалов горных пород и хвостохранилищ (табл. 2, рис. 2).

Содержание нефтепродуктов в фоновых почвах в основном низкое, иногда достигающее 20 мг/кг. В

Таблица 2. Медианные значения показателей состава и свойств почв естественных и техногенных ландшафтов Таймыра

Участок	Слой, см	Выборка, <i>n</i>	рН _{KCl}	Частицы <0.01 мм, %	ОВ, %	рН _{H₂O}	СО, %	S		НП	
								мг/кг			
1-1г	0–20	9	7.6	12.8	6.6	—*	—	—	—	395	—
2-1гн	0–20	3	6.2	21.3	24.0	6.9	0.11	69	—	32	—
3-1гн	0–20	3	5.0	17.8	3.8	5.8	0.13	45	—	<5	—
4-1гн	0–20	4	5.6	17.9	4.7	6.3	0.12	30	—	<5	—
5-1гн	0–5	6	3.8	33.1	6.0	—	—	<6	—	<5	—
	5–20	6	3.7	29.7	5.2	—	—	<6	—	<5	—
	0–20	6	3.7	30.5	5.4	—	—	<6	—	<5	—
6-1гн	0–5	15	5.3	19.9	24.8	—	—	—	—	—	—
	5–20	15	5.7	25.2	10.6	—	—	—	—	—	—
	0–20	15	5.6	22.6	9.0	—	—	—	—	—	—
6-2уф	0–20	4	3.7	19.4	7.4	—	—	—	—	—	—
7-1г	0–20	16	4.6	49.5	4.1	—	—	—	—	7	—
7-2уф	0–10	4	5.1	25.0	14.7	—	—	—	—	7	—
	10–20	4	5.7	47.4	6.2	—	—	—	—	<5	—
	40–60	4	6.1	47.6	3.8	—	—	—	—	<5	—
8-1г	0–20	8	7.8	10.3	1.4	—	—	—	—	66	—
8-2уф	0–20	7	7.5	21.5	1.6	—	—	—	—	6	—
9-1гн	0–20	8	5.0	35.9	3.3	6.1	0.06	14	—	29	—
9-2ф	0–20	20	4.9	34.9	1.4	6.3	0.04	9	—	7	—
9-3ф	0–20	8	4.2	24.3	0.6	5.9	0.02	4	—	3	—
10-1ф	0–20	6	5.2	27.5	3.4	6.7	0.04	9	—	7	—
11-1ф	0–20	5	4.8	23.2	3.1	5.9	0.04	1	—	6	—
11-2ф	0–20	11	5.9	13.9	0.8	7.2	0.03	1	—	10	—
11-3ф	0–20	1	6.3	25.4	0.8	7.1	0.05	2	—	9	—
11-4ф	0–20	2	—	—	34.0	—	—	—	—	—	—
	35–47	2	5.0	35.1	4.0	6.6	0.02	1	—	<5	—
11-5ф	0–20	6	5.2	27.5	3.4	6.8	0.04	1	—	7	—
12-1гн	0–5	6	2.6	18.8	3.6	2.9	0.94	1720	—	30	—
	5–20	7	5.0	17.4	2.1	6.6	0.15	111	—	38	—
	30–40	3	5.1	22.7	2.0	6.5	0.09	90	—	5	—
12-2гн	0–5	2	6.4	15.8	1.9	7.2	0.23	329	—	68	—
	5–20	2	7.0	9.2	1.3	7.8	0.09	39	—	8	—
12-3гн	0–10	3	5.0	28.8	4.7	6.1	0.25	342	—	258	—
	10–20	3	5.6	29.3	4.1	6.6	0.13	159	—	110	—
	50–60	2	5.9	32.8	2.6	7.4	0.08	50	—	<5	—
12-4гн	0–10	4	5.8	21.2	3.6	6.7	0.26	452	—	75	—
	10–20	4	5.8	15.1	1.8	6.8	0.62	624	—	75	—
12-5уф	0–5	3	4.8	36.2	4.5	6.3	0.13	19	—	15	—
	5–20	5	4.7	32.4	3.1	6.5	0.07	10	—	9	—
	20–45	3	5.6	27.1	1.5	7.4	0.07	16	—	13	—
	50–70	4	6.0	31.4	1.3	7.8	0.06	5	—	6	—
12-6ф	0–10	2	4.8	9.5	5.0	6.4	0.04	2	—	<5	—
	10–20	2	4.8	9.5	0.6	6.4	0.03	2	—	<5	—

Таблица 2. Окончание

Участок	Слой, см	Выборка, <i>n</i>	рН _{KCl}	Частицы <0.01 мм, %	ОВ, %	рН _{H₂O}	СО, %	S	НП
								мг/кг	
12-7ф	0–10	2	6.2	5.2	0.4	7.3	0.04	5	<5
	10–20	2	6.4	10.8	1.0	7.4	0.04	5	<5
12-8ф	0–10	2	5.2	20.5	6.3	6.4	0.07	7	<5
	10–20	2	5.6	23.5	4.3	6.8	0.09	7	<5

Примечание. Здесь и далее прочерк – значение не определено.

литостратах территории Норильской нефтебазы (уч. 1-1т), а также в почвах пойм рек (уч. 12-1тн–12-4тн) обнаружены наибольшие количества нефтепродуктов, которые, однако, не превышали величин допустимого остаточного их содержания в антропогенных почвоподобных образованиях земель промышленности (5000 мг/кг), а также в почвах земель водного фонда (500 мг/кг) тундры и лесотундры, принятых в Ненецком автономном округе [17].

В элювиальных почвах уч. 12-1тн–12-4тн отмечено сходство картин пространственного и профильного распределения нефтепродуктов, S–SO₄ и легкорастворимых солей. Высокая концентрация этих поллютантов в почвах прослеживается на расстоянии более 33 км – до устья реки Амбарная, впадающей в озеро Пясино (уч. 12-4тн). Только на его северном берегу, в истоках реки Пясино, на расстоянии более 111–118 км от г. Норильска на уч. 12-5уф в 0–5 см слое почв содержание водорастворимых солей, S–SO₄, нефтепродуктов приближается к фоновому для почв естественных ландшафтов Северо-Сибирской низменности (табл. 2, рис. 2). В целом, фоновым для почв Таймыра можно считать содержание легкорастворимых солей 0.1%, S–SO₄ – 10(20), нефтепродуктов – 20(40) мг/кг.

Установлено существенное различие почв геоморфологических структур естественных и техногенных ландшафтов Таймыра не только по основным свойствам и составу, но и по валовому содержанию Cu, Ni, Co и Cr, концентрации их подвижной формы, ее доле в валовом содержании ТМ, характеризующей их подвижность и доступность растениям (табл. 3).

Эти различия почв Таймыра обусловлены, по нашему мнению, расположением на его территории Таймыро-Норильской платиноидно-медно-никелевой провинции, длиной около 2000 км и шириной около 250 км, с сульфидными медно-никелевыми месторождениями. Они сосредоточены в рудных полях, связанных с дифференцированными интрузиями габбро-диоритов. Рудоносные интрузии Норильск I, Норильск II, Черногорская находятся в Норильском рудном поле, а Талнахская и Хараелахская – в Талнахском [19].

Рудные месторождения, их ореолы рассеяния и оруденения располагаются на разной глубине, иногда выходя на поверхность и влияя на минералогический и элементный химический состав почв плоскогорья и низменности. Почвы естественных ландшафтов в основном формируются на покровных отложениях флювиогляциального, моренного и морского генезиса, подстилаемых более древними породами. На плоскогорье почвообразование идет и на элювиально-делювиальных образованиях.

Рудопроявления предопределили превышение в почвах естественных ландшафтов Таймыра значений среднего валового содержания (кларка) Cu, Ni, Co и Cr в почвах мира, приведенных Кабата-Пендиас [26].

Наибольшее валовое количество Cu, Ni, Co и Cr и концентрации их подвижной формы имели техногенные и техногенно-нарушенные почвы Норильского промышленного района. Это почвы объектов 1-7, участки 12-1тн–12-4тн объекта 12, где валовое содержание Cu и Ni превышало значения ориентировочно допустимых концентраций (ОДК), а концентрации подвижной формы Cu, Ni и Cr – предельно допустимые (ПДК). Несмотря на 5–10-кратное превышение в техногенно-загрязненных почвах кларка кобальта, концентрация его подвижной формы превышала ПДК только в 0–5 и 0–10 см слое почв уч. 12-1тн и 12-3тн. В других горизонтах и почвах количество его подвижной формы было невелико, что говорит о низкой подвижности элемента. В большинстве почв естественных ландшафтов в Северо-Сибирской низменности имели концентрации подвижных Cu, Ni, Co и Cr меньше ПДК, а для кобальта были низкими по агрохимическим нормативам.

Высокое содержание ТМ в почвах и грунтах НТР связано как с месторождениями руд, так и с продуктами их добычи и переработки, загрязнением окружающей среды газопылевыми выбросами и стоками.

Результаты геологических изысканий показали, что в Норильском районе в породах интрузивных комплексов содержание ТМ варьирует в широких диапазонах и составляет (в мг/кг)

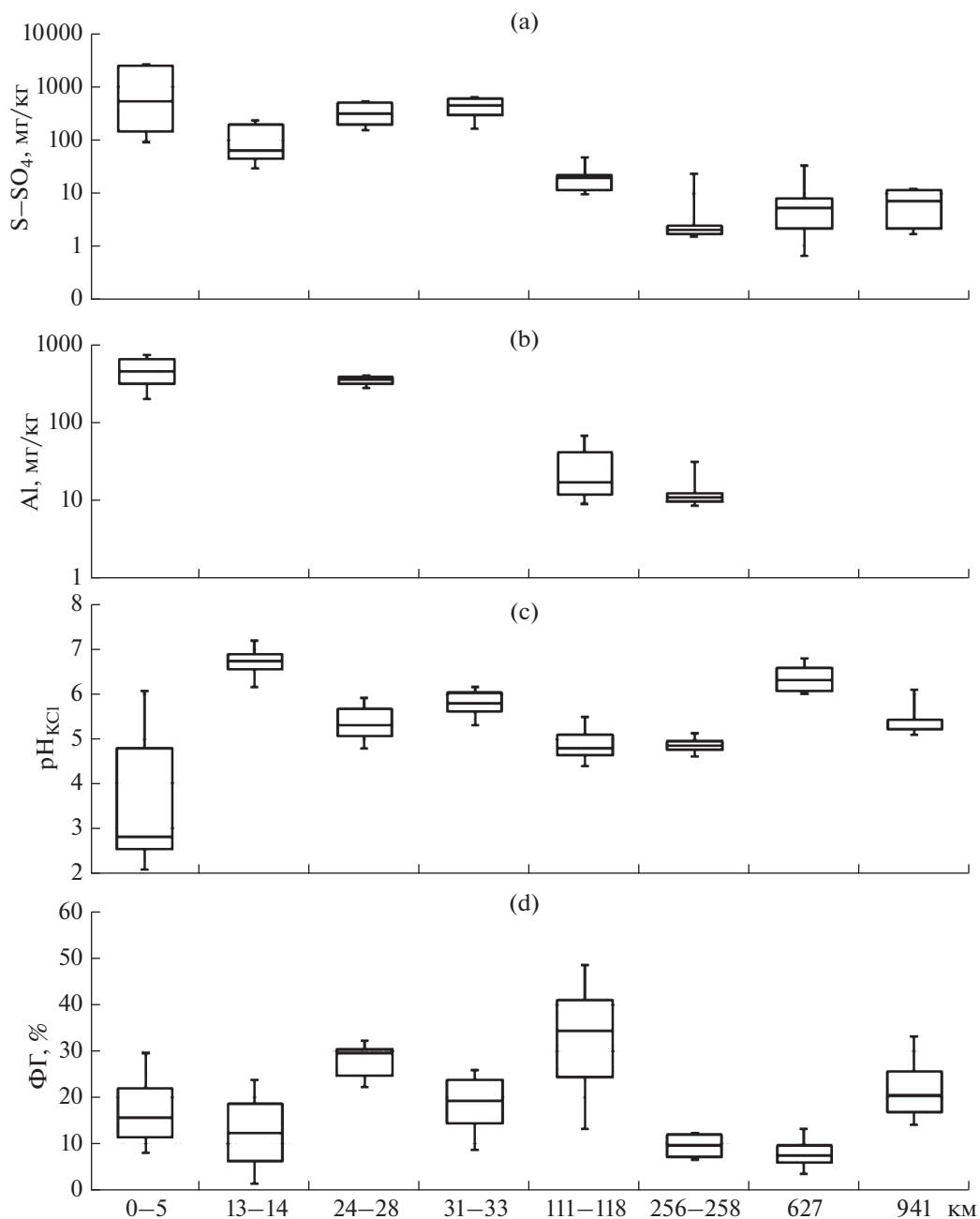


Рис. 2. Пространственное изменение состава и свойств в слое почв 0–20 см. Трансекта юг-север Таймыра: а – концентрация $S-SO_4$; б – концентрация обменного алюминия; в – pH_{KCl} ; д – содержание частиц <0.01 мм.

Cu 81–39300, Ni 34–29950, Co 33–1455, Cr 17–1160; в базальтах свит – Cu 24–155, Ni 24–245, Co 38–53, Cr 35–311 [16]; в рудах (%) месторождения Норильск во вкрапленных рудах – Cu 0.5, Ni 0.4, Co 0.01–0.03, а в жильных рудах – Cu 3.6–8.0, Ni 3.8–7.8; в рудах месторождения Талнахское во вкрапленных рудах – Cu 1.1, Ni 0.4, а в богатых рудах – Cu 4.0, Ni 2.6 [16]; в сульфидных рудах месторождения Норильск-1 – Cu 4.0–28.0%, Ni 3.5–7.1%, Co 660–1270 мг/кг, S 30.0–34.0% [15]; в осадочных и иных породах нижнего тече-

ния р. Микчангда (мг/кг) – Cu 111–2919, Ni 127–2439, Co 48–163 [14]. От этих пород многие почвы НПР унаследовали высокое содержание Cu, Ni, Co и Cr.

Одним из следствий промышленной деятельности в Норильском промышленном районе является распространение на его территории, в том числе в г. Норильске, толщ техногенных грунтов, содержащих (мг/кг) Cu 513–3893, Ni 733–5867, Co 64–157, Cr 378–1200 [21]. От этих грунтов, техногенных газопылевых выбросов, интрузивных

Таблица 3. Медианные значения содержания тяжелых металлов в почвах естественных и техногенных ландшафтов Таймыра, мг/кг

Участок	Слой, см	Cu	Ni	Co	Cr
1-1Г	0–20	3560/–*	3984/–	–/–	–/–
2-1ГН	0–20	549/–	391/–	63/–	55/–
3-1ГН	0–20	401/–	339/–	49/–	135/–
4-1ГН	0–20	268/–	686/–	–/–	123/–
5-1ГН	0–5	280/–	155/–	–/–	–/–
	5–20	41/–	56/–	–/–	–/–
	0–20	96/–	81/–	–/–	–/–
6-1ГН	0–5	674/7.5	629/7.5	64/1.6	125/<0.5
	5–20	42/0.9	69/2.4	29/0.9	176/<0.5
	0–20	167/3.4	186/3.6	38/1.1	175/<0.5
6-2уф	0–20	51/3.3	123/6.4	29/1.4	91/<0.5
7-1Г	0–20	41/–	57/–	–/–	–/–
7-2уф	0–10	519/–	636/–	–/–	–/–
	10–20	248/–	172/–	–/–	–/–
	40–60	178/–	108/–	–/–	–/–
8-1Г	0–20	86/–	73/–	–/–	–/–
8-2уф	0–20	35/–	48/–	–/–	–/–
9-1ГН	0–20	43/–	46/–	16/–	98/–
9-2ф	0–20	31/–	42/–	16/–	84/–
9-3ф	0–20	16/–	15/–	6/–	57/–
10-1ф	0–20	33/–	54/–	14/–	62/–
11-1ф	0–20	161/3.0	36/3.6	15/1.7	89/<0.5
11-2ф	0–20	82/2.7	35/1.6	14/1.2	72/<0.5
11-3ф	0–20	190/2.7	49/6.8	17/0.9	96/<0.5
11-4ф	0–20	48/3.6	54/2.9	10/<0.1	46/<0.5
	35–47	61/–	41/–	16/<0.1	63/<0.5
11-5ф	0–20	52/5.0	44/2.9	17/0.9	86/<0.5
12-1ГН	0–5	3065/178.0	1092/321.0	113/13.0	196/49.7
	5–20	2040/47.2	904/67.4	112/0.5	225/47.5
	30–40	447/7.8	264/2.0	69/0.1	253/1.2
12-2ГН	0–5	951/49.3	768/56.9	111/3.0	152/36.4
	5–20	796/18.6	546/27.9	71/0.6	218/21.5
12-3ГН	0–10	1710/133	1180/161	139/6.3	185/40.5
	10–20	1315/68.7	560/60.2	70/1.0	169/17.4
	50–60	172/4.4	133/1.8	51/0.1	181/<0.5
12-4ГН	0–10	2835/80.0	1040/133.9	121/4.3	266/38.8
	10–20	1500/90.2	708/57.8	81/1.6	134/41.3
12-5уф	0–5	515/20.6	299/24.1	65/0.2	134/2.4
	5–20	163/8.9	140/1.3	50/0.2	145/1.3
	20–45	149/6.5	120/2.4	46/0.2	160/<0.5
	50–70	124/2.9	113/0.7	44/0.1	104/<0.5
12-6ф	0–10	44/3.3	66/1.2	19/0.1	100/<0.5
	10–20	30/1.3	48/0.5	13/0.1	97/<0.5
12-7ф	0–10	70/0.9	85/0.1	16/0.1	53/<0.5
	10–20	44/1.7	67/0.6	16/0.1	91/1.3

Таблица 3. Окончание

Участок	Слой, см	Cu	Ni	Co	Cr
12-8ф	0–10	63/0.8	79/1.8	17/0.6	104/1.5
	10–20	63/1.0	76/2.1	18/0.7	112/2.2
Кларк [26]		39/–	29/–	11/–	60/–
ОДК(ПДК)		132/3.0	80/4.0	–/5.0	–/6.0

Примечание. Над чертой – валовое содержание, под чертой – содержание подвижной формы элемента.

пород в горных отвалах месторождений, использованных в качестве щебеночного покрытия, техногенные почвы НПР унаследовали очень высокое содержание ТМ, выявленное ранее [22].

Нами установлено достоверно большее содержание Cu, Ni, Co и Cr в 0–5(10) см слое, по сравнению с нижележащими слоями почв на уч. 6-1т, 7-2уф, 12-1тн–12-4тн (табл. 3). Очень высокое содержание меди и никеля в 0–20 см слое литостратов Норильской нефтебазы (уч. 1-1т) мы объясняем использованием щебня из отвалов горных пород рудных месторождений и загрязнением почв техногенными газопылевыми выбросами. По сравнению с литостратами Норильской нефтебазы, в органолитостратах Дудинской нефтебазы (уч. 8-1т) содержание меди и никеля меньше в 5 раз, а в криоземах (уч. 8-2уф) – в 10 раз. Последнее подтверждает вывод о том, что за пределами Норильского промышленного района, в Северо-Сибирской низменности, почвы техногенных и естественных ландшафтов имеют иные свойства и существенно более низкое содержание ТМ.

Различия свойств и состава почв разных геоморфологических структур Таймыра, обусловленные природными и антропогенными факторами почвообразования, хорошо просматриваются при анализе их изменения в почвах трансекты юг–север Таймыра (рис. 2–4). Наибольшие величины общего содержания Cu, Ni, Co и Cr и концентрации их подвижной формы обнаружены в поверхностном 0–20 см слое и лежащих на глубине 30–70 см слоях почв на удалении до 33 км от Надеждинского завода, в пределах НПР на участках 12-1тн–12-4тн (рис. 3 и 4).

За пределами НПР, в Северо-Сибирской низменности, на уч. 12-5уф (111–118 км), в почвах истоков реки Пясины на севере озера Пясино установлено высокое содержание ТМ. Но его мы связываем не столько с техногенным загрязнением почв, сколько с близ расположенными оруденениями сульфидных руд, содержащими Cu 100–7000, Ni 100–500, Co 20–300 мг/кг и связанными с Талнахским и другими рудными месторождениями на западном склоне Хараелахских гор [16]. Этим можно объяснить высокое содержание Cu, Ni, Co и Cr в слое 50–70 см на уч. 12-5уф, а также увеличение с севера на юг содержания в почвах

ТМ, установленное ранее [4–6]. С рудопроявлениями мы связываем высокое содержание Cu и Ni в слое 40–60 см криоземов на уч. 7-2уф, а не только с их миграцией из 0–5 см слоя почв, как полагают другие исследователи [22].

Оценка количества химических веществ, подлежащих экологическому нормированию и контролю, в генеральной выборке ($n = 98$) данных их определения в фоновых почвах естественных ландшафтов Северо-Сибирской низменности показала следующие их минимальные и максимальные значения, среднеарифметические и медианные величины соответственно (мг/кг): нефтепродукты – <5–35, 12, 7; S–SO₄ – 0.3–30.0, 6.3, 5.0; валовое содержание Cu – 4–353, 66, 44; Ni – 9–148, 52, 44; Co – 3–50, 18, 15; Cr – 37–177, 84, 80.

В фоновых и условно-фоновых почвах естественных ландшафтов Норильского промышленного района в генеральной выборке ($n = 61$) для некоторых химических веществ установлены следующие их минимальные и максимальные значения, среднеарифметические и медианные величины соответственно (мг/кг): нефтепродукты – <5–93, 19, 18; S–SO₄ – 5–91, 30, 15; валовое содержание Cu – 29–422, 106, 75; Ni – 40–349, 110, 95; Co – 20–69, 37, 38 мг/кг; Cr – 52–253, 160, 176 мг/кг.

Установленные параметры содержания химических веществ в фоновых почвах естественных ландшафтов Таймыра позволяют предложить региональные фоновые значения концентрации нефтепродуктов и водорастворимых сульфатов, валового количества ТМ для оценки загрязнения почв Средне-Сибирской низменности и Норильского промышленного района (табл. 4).

Полученные результаты лабораторных исследований почв трансекты юг–север Таймыра позволили рассчитать коэффициенты корреляции между валовым содержанием Cu, Ni, Co, Cr в почвах и их свойствами. Однако расчеты не выявили статистически значимых связей между ними. Это говорит о том, что элементный химический состав почв Таймыра, вероятно, сильно зависит от других факторов, в том числе их минералогического состава, специфики загрязняющих почвы веществ.

В целях определения влияния свойств почв на концентрацию в них подвижных форм химиче-

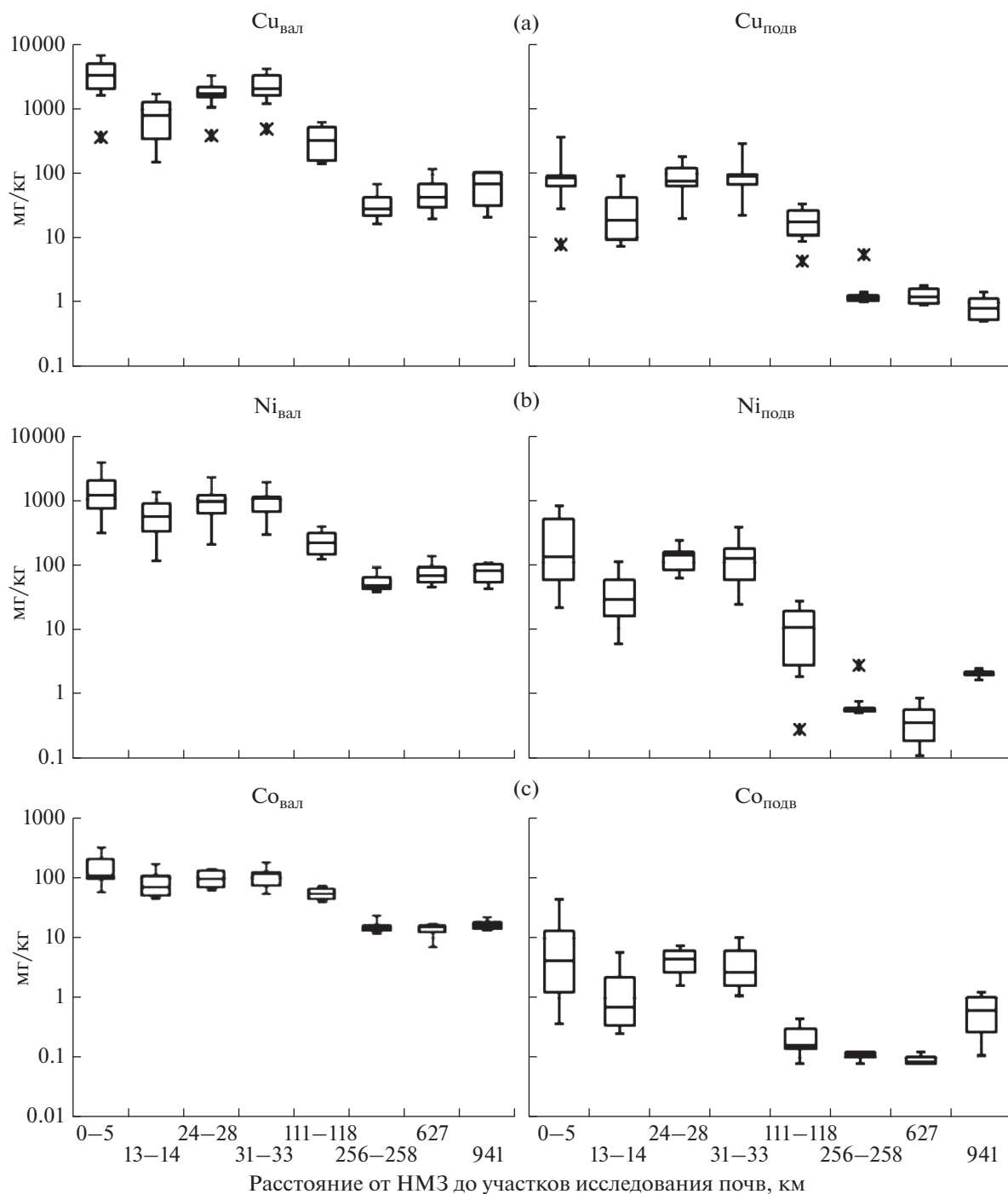


Рис. 3. Пространственное изменение содержания Cu, Ni и Co в слое 0–20 см аллювиальных почв трансекты юг–север Таймыра: Cu_{вал}, Ni_{вал}, Co_{вал} – валовое содержание; Cu_{подв}, Ni_{подв}, Co_{подв} – содержание подвижной формы.

ских элементов рассчитаны коэффициенты корреляции между обменной и актуальной кислотностью, содержанием ОБ, частиц физической глины (ФГ) и ила (ИЛ), с одной стороны, и содержанием в почвах водорастворимых сульфатов (S–SO₄) и обменного Al, концентрациями подвижной формы Cu, Ni, Co и Cr, их подвижно-

стью – доли (%) в валовом содержании элементов (Cu, Ni, Co, Cr), с другой стороны (табл. 5).

Расчеты не выявили связи показателей химического состава почв с содержанием в них физической глины. Обнаружено влияние количества в почвах ила и органического вещества на концентрацию подвижных Cu и Al.

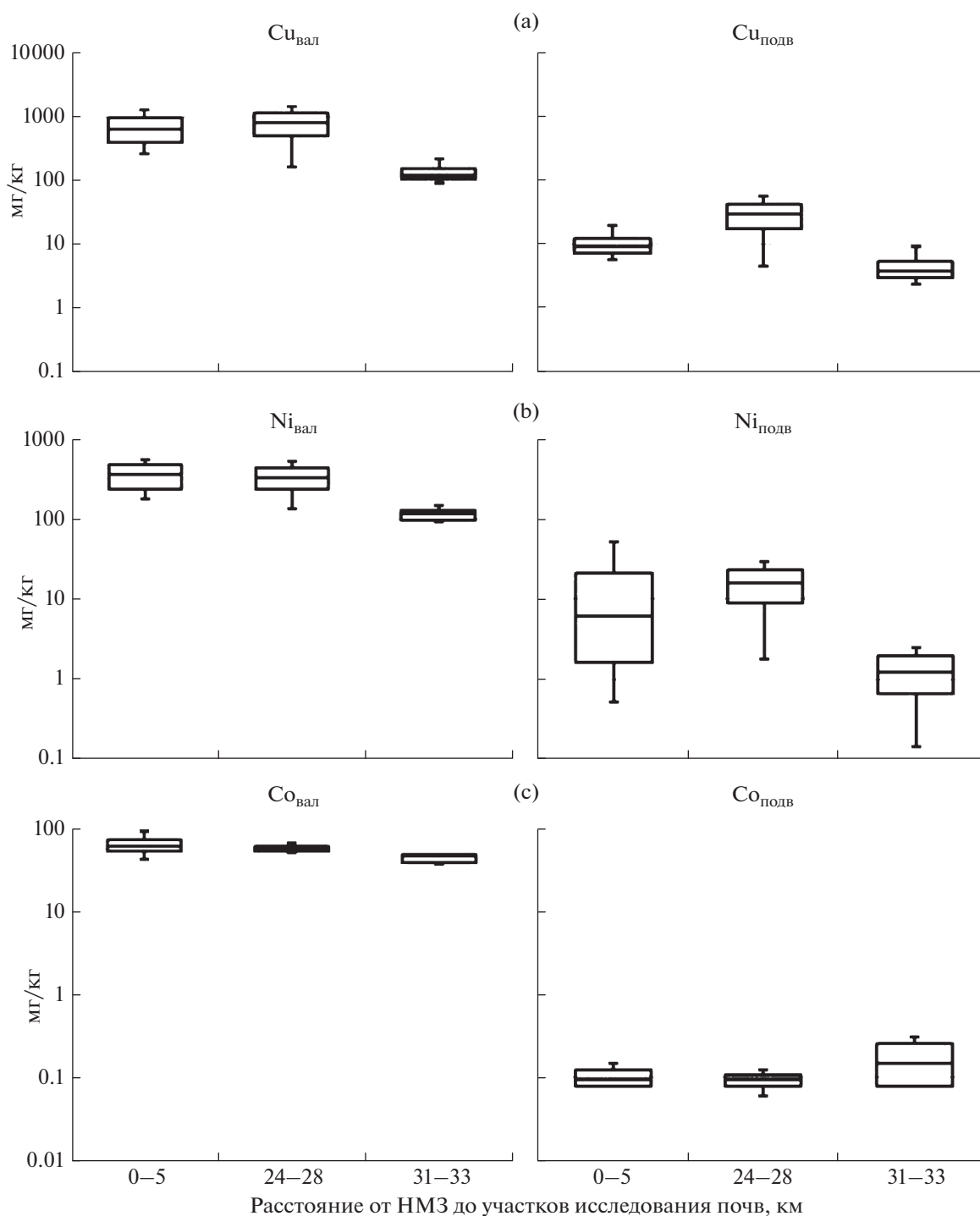


Рис. 4. Изменение содержания Cu, Ni и Co в слоях 30–70 см аллювиальных почв трансекты юг–север Таймыра: $Cu_{\text{вал}}$, $Ni_{\text{вал}}$, $Co_{\text{вал}}$ – валовое содержание; $Cu_{\text{подв}}$, $Ni_{\text{подв}}$, $Co_{\text{подв}}$ – содержание подвижной формы.

Установлены достоверные отрицательные связи реакции среды почв с концентрацией и подвижностью в них химических элементов. Они показывают, что в почвах Таймыра усиление кислотности почвенной среды вызывает увеличение концентраций подвижной формы Cu, Ni, Co, Cr, S–SO₄, Al.

Для последнего эта связь очень сильная, приводящая при pH_{KCl} менее 3 к появлению в почвах фитотоксичных концентраций обменного Al – более 80 мг/кг (рис. 5). Такие его концентрации возникают в почвах при загрязнении окружающей среды техногенными выбросами, содержа-

Таблица 4. Ориентировочные региональные фоновые значения концентрации нефтепродуктов и S-SO₄, валового содержания Cu, Ni, Co, Cr в почвах естественных ландшафтов Северо-Сибирской низменности и НПП, мг/кг

Регион	Нефтепродукты	S-SO ₄	Cu	Ni	Co	Cr
Северо-Сибирская низменность	20	10	45	45	15	80
Норильский промышленный район	40	20	75	90	40	170

Таблица 5. Коэффициенты корреляции Спирмена между свойствами и составом почв трансекты юг–север Таймыра (при $n = 22$, коэффициенты достоверны при $p < 0.05$)

Параметр	pH _{KCl}	pH _{вод}	ОВ	ФГ	ИЛ	S-SO ₄	Cu	Ni	Co	Cr	Al	%						
												Cu	Ni	Co	Cr			
pH _{KCl}	1																	
pH _{вод}	0.89	1																
ОВ	–	–	1															
ФГ	–	–	–	1														
ИЛ	–	–	0.70	0.78	1													
S-SO ₄	–0.60	–0.85	–	–	–	1												
Cu	–0.54	–0.76	0.56	–	0.54	0.85	1											
Ni	–0.52	–0.77	–	–	–	0.90	0.91	1										
Co	–0.60	–0.83	–	–	–	0.88	0.80	0.83	1									
Cr	–0.67	–0.86	–	–	–	0.90	0.88	0.91	0.86	1								
Al	–0.83	–0.92	0.45	–	0.48	0.84	0.85	0.84	0.79	0.87	1							
Cu, %	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1						
Ni, %	–0.49	–0.73	–	–	–	0.82	0.84	0.96	0.77	0.86	0.79	–	1					
Co, %	–0.58	–0.79	–	–	–	0.75	0.66	0.73	0.91	0.74	0.68	–	0.72	1				
Cr, %	–0.63	–0.85	–	–	–	0.85	0.83	0.91	0.86	0.98	0.84	–	0.90	0.83	1			

щими диоксид серы. Он и образующаяся из него серная кислота не только сжигают растительность, но и подкисляют почвы, повышая в них концентрацию алюминия и ТМ, подвижность Ni, Co, Cr (табл. 5).

Оценка подвижности Cu, Ni, Co, Cr в почвах Таймыра показала, что она минимальна в фоновых почвах естественных ландшафтов Северо-Сибирской низменности (Cu – 1.2–4.0, Ni – 0.1–2.4, Co – 0.2–4.0, Cr – 0.5–1.6%). Максимальна подвижность ТМ в слое 0–5(10) см техногенно-нарушенных почв техногенных ландшафтов Норильского промышленного района (Cu – 4.1–6.0, Ni – 12.9–19.1, Co – 1.9–5.3, Cr – 13.5–26.8%). Общим для почв естественных и техногенных ландшафтов является снижение подвижности ТМ сверху вниз по почвенному профилю. На уч. 12-1тн и 12-12-3тн подвижность Ni, Co, Cr в мерзлом слое на глубине 30–40 и 50–60 см соответственно была в 10–40 раз ниже, чем в поверхностном 0–5(10) см слое почв. Ранее такая закономерность изменения в почвенных профилях почв техногенных ландшафтов НПП concentra-

ции подвижной формы и подвижности ТМ была выявлена и объяснена почвоведом МГУ [22].

Полагаем, что указанное изменение статуса ТМ вниз по почвенному профилю обусловлено восстановлением подвижных сульфатов до малоподвижных сульфидов в переувлажненных нижних горизонтах почв. В них идут процессы трансформации форм соединений химических веществ в восстановительных условиях в почвах. Эти процессы характерны для гидроморфных, в том числе торфяных, почв и хорошо изучены. В частности, поэтому внесение сульфата меди в качестве микроудобрения на осушенных торфяных почвах приводит только к временному повышению в них концентрации подвижной меди. Через несколько лет она уменьшается, и медь вновь становится дефицитным микроэлементом. Возможно, влияние окислительно-восстановительных условий среды в почвах сказалось на подвижности в них меди и могло быть причиной отсутствия ее достоверных связей с изученными показателями состава и свойств почв трансекты юг–север Таймыра. Но

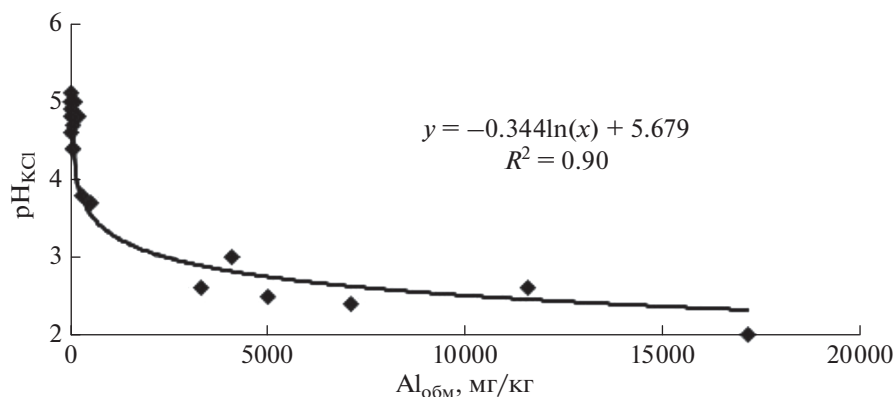


Рис. 5. Зависимость содержания обменного алюминия от реакции среды (pH_{KCl}) почв транsekты юг–север Таймыра.

этот вопрос в отношении меди и других ТМ еще нуждается в изучении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таймыр – сложная в природно-геоморфологическом и специфическая в металлогеническом отношении часть российской Арктики, где располагается уникальная Таймыро-Норильская платиноидно-медно-никелевая провинция. Она охватывает территории северо-запада Среднесибирского плоскогорья и сопряженной с ним Северо-Сибирской низменности, входящих в Норильский промышленный район, и влияет на элементный химический состав почв.

Рудные месторождения и рудопроявления обусловили формирование на Таймыре природной геохимической аномалии с высоким уровнем содержания Cu, Ni, Co в почвообразующих породах и почвах, в 2 раза и более превышающим их кларк в почвах мира. Такая аномальность состава почв Таймыра делает негодным использование при оценке их загрязнения и экологического состояния санитарно-гигиенических нормативов. Для этого необходимы региональные нормативы фонового содержания в почвах макро- и микроэлементов, являющихся приоритетными загрязнителями окружающей среды.

В Норильском промышленном районе разрабатываются и перерабатываются месторождения сульфидных медно-никелевых и других руд, что привело к распространению почв техногенных ландшафтов, а в естественных ландшафтах – к механической и химической трансформации почв. В результате в районе сформировалась природно-техногенная геохимическая аномалия, где почвы на породах и/или техногенных грунтах исходно и/или техногенно обогащены Cu, Ni, Co, Cr, S–SO₄.

В Северо-Сибирской низменности преобладают естественные ландшафты, а почвообразование идет на иных по составу и свойствам породах,

нежели на плоскогорье. Территория низменности локально нарушена нефте-, газодобычей, а в целом находится в близком к естественному состоянию, что обуславливает относительно низкое содержание в почвах Cu, Ni, Co, Cr, S–SO₄.

Естественная и антропогенная специфика геоморфологических структур Таймыра предопределили различие их по фоновым количествам в почвах приоритетных поллютантов – валового содержания Cu, Ni, Co, Cr и концентрации водорастворимых сульфатов (мг/кг почвы): Северо-Сибирская низменность – Cu 45, Ni 45, Co 15, Cr 80, S–SO₄ 10; Норильский промышленный район – Cu 75, Ni 90, Co 40, Cr 170, S–SO₄ 20. Их предлагается использовать как региональные нормативы для оценки загрязнения почв.

В почвах естественных и техногенных ландшафтов Таймыра не выявлена зависимость валового содержания тяжелых металлов от количества физической глины, ила, органического вещества, реакции среды. Установлено статистически значимое влияние усиления кислотности почв на увеличение подвижности Cu, Ni, Co, Cr и Al. Подвижность разных металлов отличалась и уменьшалась сверху вниз по профилю, возможно, из-за изменения реакции и окислительно-восстановительных условий почвенной среды.

В естественных и нарушенных ландшафтах пойм рек Норильского промышленного района локально встречаются почвы с мертвым растительным покровом и очень сильнокислой реакцией среды поверхностного (0–5 см) слоя или всего профиля. Генезис сильной кислотности почв не ясен, но определено, что ее усиление до $\text{pH}_{\text{KCl}} < 3$ приводит к появлению фитотоксичных концентраций обменного Al, который для растений может быть более губителен, чем тяжелые металлы. Для ремедиации таких почв предлагается их хеостабилизация известкованием, которое уменьшит кислотность почв и подвижность в них металлов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по темам госзаданий ФГБУН Институт почвоведение и агрохимии СО РАН № 1021052103985-7-1.6.23, № 1021053106773-4-1.6.23, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики, филиал ФИЦ КНЦ СО РАН № 0356-2019-0033.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базова М.М., Кошевой Д.В.* Оценка современного состояния качества вод Норильского промышленного района // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3(27). С. 49–60. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-3-49-60>
2. *Баркан В.Ш., Лянгузова И.В.* Изменение уровня загрязнения органогенного горизонта Al–Fe–гумусовых подзолов при уменьшении аэротехногенной нагрузки (Кольский полуостров) // Почвоведение. 2018. № 3. С. 338–346. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030085>
3. *Баркан В.Ш., Лянгузова И.В.* Эколого-геохимическая оценка содержания поллютантов в бугристых болотах Кольского полуострова // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1464–1477.
4. *Васильевская В.Д.* Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: Наука, 1980. 235 с.
5. *Васильевская В.Д., Горбачева О.В., Песочина Л.С.* Биологический круговорот микроэлементов в тундрах Западного Таймыра (стационар “Агапа”). Почвы и растительность мерзлотных районов СССР. Магадан, 1973. С. 357–363.
6. *Васильевская В.Д., Богатырев Л.Г.* Микроэлементы в почвах Западного Таймыра // Вестник Моск. ун-та. 1970. № 4. С. 53–59.
7. *Волков А.В., Галямов А.Л., Лобанов К.В.* Геодинамические обстановки формирования месторождений стратегических металлов в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2(34). С. 109–119. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-2-109-119>
8. *Ермолов Ю.В., Лебедева М.А., Бондарь М.Г., Колпацников Л.А., Черевко А.С., Смоленцев Н.Б.* Особенности аккумуляции химических элементов в биогеохимической пищевой цепи северной части Норильского плато // Геохимия. 2020. Т. 65. № 5. С. 499–510. <https://doi.org/10.31857/S0016752520040032>
9. *Иванов В.В., Румянцева Е.В.* Многолетняя изменчивость годового стока воды и химических веществ Норило-Пясинской водной системы в условиях антропогенного воздействия // Вода: химия и экология. 2011. № 12. С. 23–28.
10. *Кашулина Г.М.* Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2017. № 7. С. 860–873. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070036>
11. *Кашулина Г.М.* Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2018. № 4. С. 493–505. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804010X>
12. *Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е.* Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Арктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375–1391. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090082>
13. *Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е., Синичкина М.А.* Ремедиация почв техногенных пустошей в Кольской Субарктике: современное состояние и многолетняя динамика // Почвоведение. 2021. № 4. С. 489–501. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21040092>
14. *Криволицкая Н.А., Михайлов В.Н., Спирар С.Г., Гонгальский Б.И.* Внутреннее строение и состав микчангинского ультрабазит-базитового массива в Норильском рудном районе (Сибирская трапповая провинция) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2. Вып. № 14. С. 29–48.
15. *Лихачев А.П.* Специфические особенности норильских рудоносных интрузий, их природа и определяющее значение в открытии Pt–Cu–Ni месторождений // Отечественная геология. 2019. № 5. С. 36–52. <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2019-10037>
16. *Падерин П.Г., Деменюк А.Ф., Назаров Д.В., Чеканов В.И. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Сер. Норильская. Лист R-45 – Норильск. Объяснительная записка. – СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 2016. 366 с. (Минприроды России, Роснедра, ФГБУ “ВСЕГЕИ”).
17. Постановление администрации НАО от 15.12.2011 № 293-п (ред. от 17.08.2020) “Об утверждении региональных нормативов допустимого остаточного содержания нефтяных углеводородов и продуктов их трансформации в почвах и в донных отложениях водных объектов на территории Ненецкого автономного округа”.
18. *Румянцева Е.В.* Анализ многолетней изменчивости водных ресурсов Норило-Пясинской озерно-речной системы в условиях антропогенного воздействия. Автореф. дис. ... канд. геогр. н. С-Пб, 2012. 24 с.
19. *Степанов В.А.* Платиново-медно-никелевые провинции Северо-Азиатского кратона // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 78–87.
20. *Сысо А.И., Колпацников Л.А., Ермолов Ю.В., Черевко А.С., Сиромля Т.И.* Элементный химический состав почв и растений Западного Таймыра // Сибирский экологический журн. 2014. № 6. С. 855–862.
21. *Тирских С.А., Вашестюк Ю.Г., Штельмах С.И., Рященко Т.Г.* Комплексные исследования техногенных грунтов строительной площадки в районе г. Норильска (опыт интеграции производственных и научных результатов) // Вестник ИрГТУ. 2014. № 2(85). С. 80–85.

22. 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.
23. AMAP Assessment report 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2005. 265 p.
24. AMAP Assessment report 2006: Acidifying pollutants, Arctic Haze and Acidification in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2006. 111 p.
25. Ford J., Hasselbach L. Heavy Metals in Mosses and Soils Six Transects the Red Dog Mine Haul Road Alaska. Western Arctic National Parklands National Park Service, 2001. 73 p.
26. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton: CRC Press, 2010. 548 p.
27. Knudson K.L., Frink L., Hoffman B.W., Price T.D. Chemical characterization of Arctic soils: activity area analysis in contemporary Yup'ik fish camps using ICP-AES // J. Archaeological Sci. 2004. V. 31. P. 443–456.
28. Kuhlberg M., Miller S. Protection to the Sulphur-Smoke Tort-feasors: The Tragedy of Pollution in Sudbury, Ontario, the World's Nickel Capital, 1884–1927 // Canad. Historical Rev. 2018. V. 99. № 2. P. 225–257. <https://doi.org/10.3138/chr.99.2.03>
29. Panagos P., van Liedekerke M., Yigini Y., Montanarella L. Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network // J. Environ. Public. Health. 2013. 11 p. <https://doi.org/10.1155/2013/158764>
30. Winterhalder K. Environmental degradation and rehabilitation of the landscape around Sudbury, a major mining and smelting area // Environmental Reviews. 1996. V. 4(3). P. 185–224.

Anthropogenic Transformation of Soil Properties in Natural and Technogenic Taimyr Landscapes

A. I. Syso^{1, *}, D. A. Sokolov^{1, 2}, T. I. Siromlya¹, Yu. V. Ermolov¹, and I. D. Makhatkov^{1, 2}

¹ Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RA, Novosibirsk, 630099 Russia

² Scientific-Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Norilsk, 663305 Russia

*e-mail: syso@issa-siberia.ru

To assess the ecological status and anthropogenic transformation of the Taimyr soil cover the composition and properties of natural and technogenic soils were studied in geomorphologically different landscapes in the north-west of the Central Siberian plateau and in the North Siberian lowland. In the technogenic landscapes strongly skeleton lithostrata (Skeletal Technosols) and peat-heavy clay organic lithostrata (Endoskeletal Technosols) were investigated, whereas in the disturbed technogenic landscapes Spodic Cryosols, Turbic Cryosols, Toxic Turbic Cryosols and Toxic Leptosols were studied. In the natural landscapes Cryosols, Histic Cryosols, Haplic Cryosols, as well as Fluvisols and Gleyic Fluvisols were studied. The plateau and adjacent lowland areas belong to the platinoid-copper-nickel deposit province and constitute part of the Norilsk industrial region, where copper and nickel sulfide and other ores are excavated and processed. Therefore soils developing there on the natural parent bedrocks or technogenic rocks are originally or technogenically enriched in Cu, Ni, Co, Cr, S–SO₄. The studied soils and parent bedrocks in the North Siberian lowland were found to contain less heavy metals and S–SO₄ as compared with the plateau. To estimate soil contamination the following regional reference values for the background total heavy metal and water soluble sulfate contents (in mg/kg soil) are proposed: Cu 45, Ni 45, Co 15, Cr 80, S–SO₄ 10 for the North Siberian lowland; and Cu 75, Ni 90, Co 40, Cr 170, S–SO₄ 20 for the Norilsk industrial region.

Keywords: soil degradation, soil assessment, soil contamination, heavy metals, sulfates, background contents, regional norms