

Эколого-геохимическая оценка мерзлотных почв Среднесибирского плоскогорья

Ю. И. ЕРШОВ

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: solum@ksc.krasn.ru*

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен почвенно-литологический блок природных и техногенных ландшафтов Норильского промышленного района. Оценен вклад основных источников поступления тяжелых металлов и серы в мерзлотные почвы. Показаны особенности концентрации элементов, отсутствующих в немерзлотных почвах. Установлены пространственная и внутрипочвенная концентрации элементов. На основе обобщения обширного количественного материала выполнено почвенно-геохимическое зонирование территории.

Ключевые слова: мерзлотные почвы, горные породы, техногенез, геохимические ландшафты, тяжелые металлы и сера, почвенно-геохимические зоны, Среднесибирское плоскогорье.

В последние десятилетия во всем мире значительно возрос интерес к Арктике и Субарктике, что связано с глобальной ролью приполярных областей в биосферных процессах. Одной из актуальных проблем является выявление реакции мерзлотных почв на техногенные воздействия. Окружающая среда в Норильском промышленном районе (НПР) характеризуется рядом особенностей. Это связано со спецификой как техногенных факторов (специализацией промышленных предприятий металлургической компании “Норильский никель”), так и со своеобразием самих депонирующих объектов воздействия – почв. Одним из главных процессов загрязнения техногенным веществом природной среды является аэральная миграция тяжелых металлов (медь, никель, кобальт, свинец) и сернистого ангидрида, составляющих основу минерального сырья и считающихся токсичными при их избыточном поступлении в окружающую среду. Почва как естественно-

историческое биокосное тело является одним из главных компонентов окружающей среды, аккумулирующим (депонирующим) и перераспределяющим техногенные и природные химические вещества. Тяжелые металлы (ТМ) и сернистый газ, попадая в почву, вступают в различные химические реакции, адсорбируются органическим и минеральным веществом. Концентрация этих элементов в разных почвах неодинаковая. Это зависит от многих природных и техногенных факторов. Промышленные выбросы изменяют состав и свойства почв, что отражается на емкости биогеохимического круговорота и функционирования ландшафтов (биогеоценозов). В этом отношении остро стоит проблема охраны почв, которая усугубляется, с одной стороны, легкой их ранимостью и замедленностью процессов восстановления, а с другой, интенсивностью техногенного пресса, который вызывает возрастающее накопление в них ТМ и серы. Это делает актуальным

исследование факторов и условий пространственной и внутрипочвенной дифференциации техногенных потоков элементов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в составе комплексных экспедиций Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН в 1988, 2001–2004 гг. на северо-западной окраине Среднесибирского плоскогорья (НПР) в области многолетней мерзлоты и развития трапповых пород (трапповых ландшафтов) с повышенным содержанием элементов, связанных с сульфидной и медно-никелевой рудной и гидротермальной медной минерализацией. Объектами исследования послужили горные породы, почвы, природные и техногенные элементы, обеспечивающие ход геохимических процессов в системе горные породы → почва ← техногенные элементы. Изучались автономные и гетерономные (геохимически подчиненные) мерзлотно-таежные почвы (подбуры, криоземы, торфяно-криоземы, криоземы глееватые, техноземы – хемокриоземы, хемоподбуры) фоновых (природных) и техноизмененных геохимически сопряженных ландшафтов (лесотундровые, горные и равнинные). Исследование почвенного покрова проводилось маршрутно-ключевым методом. “Ключи” представляют собой сопряженные ряды почв, или почвенные мезокомбинации (катены), расположенные по элементам мезорельефа рельефа от речной долины к водоразделу и на различном удалении от источника загрязнения; закладывались согласно “розе ветров”, с учетом состояния фитоценозов. В Норильской долине заложен широтный (субширотный) трансект “Норильск – Дудинка” протяженностью 70 км на запад-северо-запад от источника эмиссии (медный завод “Надежда”) с ключевыми участками, также ряд участков на западном макросклоне Путорана в юго-восточном (“Кутарамакан”, “Эндэ”) и северо-восточном (“Аван”) направлениях от г. Норильска. Полевые и физико-химические исследования почв проводились по общепринятым методикам [Аринушкина, 1962; Агрофизические методы..., 1966; Методические рекомендации..., 1981, 1995; Методические указания..., 1987а, б]. Концентрации ТМ и серы в почвах определяли в сертифицированной

лаборатории Института биофизики СО РАН с использованием метода атомно-абсорбционной спектрометрии (Аттестат “Системы...” № ГСЭН.RU. ЦОА/ТОА. 086.324 от 26.06.2002 г., зарегистрированный в Госреестре № РОСС.RU.0001.513313 от 26.06.2002 НД на методы испытаний: ИСО 7980 – 86, ИСО 8288 – 86, ИСО 9174 – 98, РД 52.24.40 – 95). Для оценки концентрации пространственного и внутрипочвенного распределения ингредиентов выбросов использовались кларки (среднее содержание элементов в почвах мира – педосфере) [Виноградов, 1957] и коэффициент техногенной концентрации (K_{TK}), показывающий, насколько увеличено содержание элементов в горизонтах, обогащенных органическим веществом, по сравнению с минеральной частью почвы. В методологию исследования состояния почв заложен системный эколого-геохимический подход, который основывается на концепции целостности ландшафта и единства внутренней динамики всех входящих в него компонентов (человека, горной породы, почвы, биоты, атмосферы, природных вод и др.), связанных между собой потоками вещества и энергии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эколого-геохимическая обстановка окружающей природной среды в НПР тесно связана с характером горных пород, климата, рельефа, многолетней мерзлоты, почв и техногенеза, определяющих и контролирующих концентрацию природных и техногенных элементов. Среднесибирское плоскогорье характеризуется горно-равнинным рельефом и разнообразием горных пород. В геоморфологическом отношении рассматриваемая территория охватывает западные-северо-западные горы и предгорья плато Путорана и Норильскую котловину (долину). Господствуют трапповые и лавовые плато со столообразной поверхностью и ступенчатыми склонами, расчлененными глубоко врезанными речными и ледниковыми долинами. Рельеф котловины представлен плоской (с моренными всхолмлениями) равниной, выполненной ледниковыми отложениями, перекрытыми суглинисто-глинистыми дериватами трапповых пород разных петрохимических серий.

Горы сложены траппами, которые представлены интрузивными и эффузивными изверженными породами (долеритами, габбро-долеритами, базальтами) ультраосновного, основного, среднего, кислого и щелочного состава [Лурье, Масайтис, 1966; Ленькин, 1968]. Траппы состоят из основных плагиоклазов, моноклинного пироксена, оливина, вулканического стекла, рудных минералов. Особенностью химико-минералогического состава пород является обогащение их железомagneзиальными силикатами и основными плагиоклазами и, как следствие, высокое содержание кальция, магния и низкое – щелочных элементов и кремнезема. В рудах основными минеральными носителями меди являются халькопирит, самородная медь, кубанит, никеля – пентландит (основной никелевый минерал сульфидных руд) и др. [Додин, 1968]. Специфика геохимической специализации траппов выражается в повышенном содержании кальция, железа, меди, никеля, серы по сравнению с базальтоидами других регионов. Кроме эндогенной рудной минерализации отмечается экзогенная, в виде ореольных зон (вторичных ореолов рассеяния), приуроченных к рыхлым почвообразующим отложениям (делювиальные суглинки и др.), имеющим элементный состав, характерный для месторождений различных формационных типов [Додин и др., 1990]. Вторичные ореолы рассеяния в рыхлых образованиях и почвах над рудными телами обладают теми же ассоциациями элементов, что и первичные ореолы, но превосходят их по площади. В пределах НПР выявлено свыше 600 первичных и вторичных ореолов рассеяния меди, никеля, кобальта и их спутников (площадь 0,5–25 км²), приуроченных к элювиально-делювиальным, аллювиальным и другим экзогенным образованиям. На участках рудопроявлений наблюдается обогащение золы растений никелем, медью, кобальтом, титаном и другими элементами. Концентраторами меди и никеля являются сфагновые мхи, лишайники, карликовая береза, багульник [Иванова и др., 1973].

В качестве почвообразующих пород выступают продукты выветривания траппового комплекса и карбонатных пород, имеющие разный генезис (элювиальный, элювиально-делювиальный, ледниковый и т. п.) и грану-

лометрический состав (от супесей до суглинков и глин). Для оценки геохимического влияния траппов на почвы рассмотрим особенности их петрохимической и рудной специализации. Средневзвешенный петрохимический состав трапповых интрузий складывается следующими макро-и микроэлементами, % [Додин и др., 1990]: SiO₂ (44,8–50,8), TiO₂ (0,9–1,9), Al₂O₃ (10,2–15,7), Fe₂O₃ (2,5–5,2), FeO (8,7–11,1), MnO (0,2–0,3), MgO (4,5–19,4), CaO (6,9–11,2), N₂O (1,2–3,5), K₂O (0,3–1,3), P₂O₅ (0,1–0,3), S (0,01–0,31), Ni (0,002–0,172), Co (0,001–0,015), Cu (0,003–0,047). Средневзвешенный химический состав сплошных руд, %: SiO₂ (0,7–3,0), TiO₂ (0,02–0,10), Al₂O₃ (1,9–4,8), Fe₂O₃+FeO (32,1–52,0), MnO (0,004–0,09), MgO (0,11–0,31), CaO (0,05–0,60), Na₂O (0,09–0,31), K₂O (0,08–0,14), P₂O₅ (0,07–0,13), S (31,6–37,5). В минерализованных породах установлена повышенная концентрация Cu (0,01–2,0), Ni (0,15–2,0), Pb (0,03–0,60), Co (0,01–0,2) [Комарова, 1968; Урванцев, 1973], в сплошных рудах (жилах) – Cu (1,1–3,0), Ni (0,7–1,7), Co (0,1–0,16), в единичных пробах – 9,4–2,2–0,1 соответственно [Урванцев, 1973; Старичина, 1973].

Многолетнемерзлые толщи совпадают с нижней поверхностью слоя летнего протаивания. Глубина сезонно-талого слоя 0,2–2,0 м и более. Мощность его определяется макро-, мезо-, микрорельефом, составом и свойствами почв (гранулометрическим составом, наличием органогенных горизонтов, увлажнением), растительностью. Глубина протаивания уменьшается от водоразделов к горным долинам и впадине, что связано с температурными инверсиями (понижением температуры от вершины к подножию). Многолетняя и сезонная мерзлота оказывает большое влияние на миграцию, концентрацию и рассеяние природных и техногенных элементов. Она обуславливает закономерности распределения элементов в талом слое. Многолетняя мерзлота служит механической преградой (геохимическим барьером) для радиальной миграции химических элементов, что приводит к своеобразию многих геохимических процессов. В этих условиях “классические” ряды миграционной подвижности элементов, установленные Б. Б. Полюновым, изменяются едва ли не на противоположные [Заворотных, 1970].

Почвенный покров состоит из двух различных морфогенетических групп, объединяющих почвы с одинаковым гидротермическим режимом профиля: глубокомерзлотными мезоморфными (подбуры) и собственно мерзлотными (криоземы). Подбуры формируются на каменисто-мелкоземистых продуктах выветривания плотных пород основного и смешанного (среднего-основного) состава, в автономных и гетерономных (геохимически подчиненных) ландшафтах преимущественно под листовничниками кустарничково-лишайниковыми и кустарничково-зеленомошными. Эти почвы распространены главным образом в горах и занимают расчлененные и прогреваемые элементы рельефа (верхние и средние уровни плато, склоны южных румбов) с хорошим поверхностным дренажем.

Обобщенный морфологический профиль подбуров имеет строение $O_v-O_1-(O_2)-(O_3)-AO (AOA_1)-B_{h,f}-(B_f)-BC-C$. В профиле выделяются сухоторфянистая подстилка O (до 30 см), грубогумусовый (органоминеральный) AO , AOA_1 (реже – торфянисто-перегнойный O_2 или перегнойный O_3), иллювиально-альфегумусовый ($B_{h,f}$) и иллювиально-железистый (B_f) горизонты. Собственно гумусово-аккумулятивный, подзолистый (оподзоленный) и оглеенный горизонты отсутствуют. Профиль маломощный и щебнистый, обладает хорошей водопроницаемостью. В летнее время мерзлота опускается глубже почвенного профиля и находится в толще скальных пород. Почвы имеют преимущественно средне- и тяжелосуглинистый гранулометрический состав. Реакция среды сильноокислая-кислая. Для почв характерно высокое содержание органического вещества в верхних горизонтах. Потеря при прокаливании в подстилочных (O) горизонтах составляет 62–92 %, в грубогумусовых (AO) – 30–58 %, что связано со слабым разложением растительных остатков. Валовой химический состав почв отражает таковой материнских пород. Почвы обогащены R_2O_3 и щелочноземельными основаниями, которые входят в состав слабоустойчивых к выветриванию минералов (плагиоклазов, оливина). В органогенных горизонтах отмечается биогенное накопление кремнезема, марганца, калия и особенно фосфора (в 7–11 раз выше по сравнению с материнской породой и в 11–16 раз – с мелко-

земом). Минеральная толща обогащена Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O и обеднена MnO , CaO , MgO , Na_2O .

Криоземы формируются в автономных и гетерономных позициях рельефа под листовничными лесами с гидрофильным олиготрофным кустарничково-мохово-лишайниковым напочвенным покровом (горы) и тундровыми группировками (долина). Почвообразующими породами служат самые разнообразные по составу современные рыхлые отложения – продукты выветривания траптовых и карбонатных пород. Почвы занимают горные склоны северных направлений, делювиальные шлейфы и надпойменные террасы.

Профиль криоземов $O_1-(O_2)-(O_3)-A_1O(A_1OB)-B (g,ca,l)-(BCg,ca,l)-(Cg,ca,l)$ состоит из влажно-торфяной подстилки O до 20 см, переходного горизонта A_1O , минерального (нередко глееватого и карбонатного) горизонта $B(g,ca,l)$, переходного BC и материнской породы C (два последних могут отсутствовать в профиле), которые на глубине 30–130 см подстилаются льдистой многолетней мерзлотой \perp . Мощность почвенного профиля равна мощности деятельного слоя. Характеризуются затрудненным внутренним дренажем почвенной толщи (высокой влагоемкостью и плохой водопроницаемостью), приводящим к переувлажнению почвенного профиля. Льдистый водоупор играет роль надмерзлотного геохимического барьера, на котором осаждаются вещества (соединения гумуса, минеральные частицы, техногенные элементы). Почвы имеют однородный или малокаменистый суглинисто-глинистый гранулометрический состав, сильноокислую-кислую (на дериватах траптов) и слабоокислую-слабощелочную (на карбонатных породах) реакцию. Емкость поглощения высокая, особенно в горизонтах O и A_1O . Почвы характеризуются аккумулятивным распределением органического вещества с максимумом в горизонтах O и A_1O (потеря при прокаливании соответственно 78–90 и 14–17 %, содержание углерода в подстилках 17–56 %). Содержание гумуса в минеральной толще профиля может достигать 10 %. Валовой химический состав мелкозема почв определяется химико-минералогическим составом материнских пород. Содержание и распределение валовых оксидов в профиле зависит от соотношения

органического и минерального материала в почвах. В горизонтах O, особенно в очесе мхов и лишайников, отмечается высокое биогенное накопление MnO, P₂O₅, CaO, MgO, K₂O. Особо следует отметить высокую биологическую аккумуляцию MnO и P₂O₅. Более полная аналитическая характеристика мерзлотных почв Среднесибирского плоскогорья приведена в работах Ю.И. Ершова [1992, 1993, 1994, 2004].

Техноземы – преобразованные механическими и/или химическими антропогенными воздействиями естественные минеральные почвы, формирующиеся в эпицентре загрязнения. Естественное залегание генетических горизонтов нарушено. Подстилочные горизонты почв уничтожены. Характеризуются кислой-сильнокислой реакцией, связанной с влиянием кислых твердых (пылевые выпадения, богатые серой и сульфидами) и жидких (“кислотных дождей”) атмосферных осадков. Подкисление почв, вероятно, является одним из основных факторов почвенно-растительных деградационных процессов. Древесная растительность представлена единичными угнетенными листовыми растениями.

Итак, эколого-геохимическая обстановка окружающей среды в НПР характеризуется рядом особенностей, связанных со спецификой как природных (рельеф, климат, биота, почвы и др.), так и техногенных факторов (специализация промышленных предприятий, высота труб, характер очистки пылегазовых выбросов, стоками урбанизированных территорий и т. д.).

Рассмотрим количественные уровни валового содержания и распределения ТМ и серы в техногенных и фоновых почвах ключевых участков (табл. 1, 2, 3). Концентрация элементов в почвенном покрове подвержена значительной вариабельности (в разы, на порядок и более). По мере приближения к источнику загрязнения происходит резкое увеличение элементов, превышающее их фоновое и “кларковое” значения. Это связано как с пространственной изменчивостью техногенного воздействия, пестротой первичной литохимической основы, так и со свойствами почв. На фоновых участках (“Дудинка”, “Кутарамакан” “Эндэ”, “Авам”) варьирование концентрации элементов определяется материнской породой, а внутрипрофильное распределение – геохимическими барьерами (акку-

Т а б л и ц а 1
Концентрация элементов в почвах Норильского промышленного района, мг/кг

Участок	Расстояние от источника эмиссии, км	Ni	Cu	Co	Pb	S
Надежда	1	37-1705/1139	63-4089/1408	9-114/78	1,8-21/14	2525-6074/3887
	1,1	24-2731/537	22-5730/1065	11-134/37	1,6-53/11	80-4986/1725
	1,3	42-2173/580	55-5487/1417	16-126/45	2,7- 28,9/10	191-4904/1731
	1,7	58-3224/821	54-9850/1955	22-267/73	3,0-36,7/11	80-10470/2633
	2,7	56-1599/430	90-4365/1100	21-71/36	3,0-21,3/7	126-2024/840
Кайерган	5	39-2882/366	62-5913/632	5-160/28	1,0-30,2/5	63-7331/1248
	9	45-641/287	33-875/350	19-35/25	2,0-10,2/5	188-2500/1071
	17	44-402/148	50-438/161	1-23/14	1,7-8,3/5	80-2573/779
	25	44-190/107	58-258/122	6-26/17	3,9-8,0/5	64-1435/509
	40	15-280/65	12-343/62	3-27/15	1,6-13,5/5	80-1830/655
	70	5-98/39	4-88/28	1-20/9	0,7-13,4/3	80-2051/601
	163	4-46/7	6-90/43	1,0-21/9	0,1-7,4/2	253-1905/952
	222	8-63/29	19-125/67	2-25/10	0,5-5,5/2	440-1455/1053
	246	2-45/21	2-93/45	0,2-22/10	0,01-6,2/2	253-1527/787

Примечание. За чертой – среднее значение.

Т а б л и ц а 2

Концентрация элементов в техногенно загрязненных почвах равнинной тундры, мг/кг

№ разреза	Горизонт	Глубина, см	Ni	Cu	Co	Pb	S
1	2	3	4	5	6	7	8
Надежда							
1 км. Торфяно-криозем. Фитоценозы сильно нарушены.							
1-04Н	О	0-1	1674	117	107	21,0	6074
	AOv	1-12	1705	4089	114	20,0	3063
	OЗL	12-32	37	63	9	1,8	2525
1,1 км. Криозем глееватый							
2-04Н	Ov	0-5	2731	5730	134	53,0	4986
	AO	5-12	353	468	27	2,2	1115
	Bca	12-18(22)	24	22	11	1,6	<80
	[OЗ]	18(22)-30	43	88	16	3,1	1890
	[Bg,ca,L]	30-44	30	24	14	2,2	511
	[OЗL] (линза)	30-44	39	60	18	1,9	1841
1,3 км. Криозем глееватый							
3-04Н	О	0-3	2173	5487	126	28,9	4904
	B1h,g,ca	3-21	61	59	20	3,0	695
	B2g,ca	21-48(56)	46	63	19	2,9	312
	BCh,ca,L	48(56)-83	42	60	16	3,3	1012
1,75 км. Хемокриозем							
4-04Н	О	0-1	1436	1511	81	13,7	4296
	Ox	1-4	3224	9850	267	36,7	10470
	B1h,ca	4-14	66	84	20	3,0	316
		14-34	59	54	22	3,1	255
	B2ca,L	34-54	58	90	23	3,3	<80
		54-75	80	140	26	3,6	381
2,7 км. Хемокриозем							
5-04Н	Ox	0-2	1081	2856	67	11,7	1648
	AO (линза)	2-20	1599	4365	71	21,3	2024
	B1h,ca	2-20	67	90	25	3,3	760
		20-45	67	91	21	3,6	315
	B2ca	45-63(77)	56	96	22	3,8	250
	BCca	63(77)-84	62	107	22	4,1	759
	Cca,L	84-100	77	94	26	3,0	126
Надежда							
5 км. Криозем. Плоская вершина увала							
6-04Н	О	0-2(3)	1000	3216	5	11,6	2677
	AO	2-(3)8	198	211	18	3,3	377
	AOA1ca	8-25(28)	45	71	19	2,3	189
	Bca	25(28)-34	50	88	19	2,5	<80
	BCca,L	34-54	56	92	19	1,5	63
		54-64	61	106	23	3,0	383
Торфяно-криозем глееватый. Привершинный уступ							
7-04Н	AOv	0-5(10)	526	1163	34	7,9	1136
	OЗ	5-17	50	68	12	1,6	1664
	B/OЗ (линза)	5-33(50)	39	78	11	1,0	2863

1	2	3	4	5	6	7	8
	Bg,ca	5-33(50)	52	66	23	2,3	247
	[O3/Bca]	33(50)-60	57	66	20	2,1	685
	Dg,ca,⊥	60-75	53	75	20	2,4	190
Хемокриозем. Средняя часть склона							
8-04Н	B1ca	4(10)-30	52	70	20	2,4	315
	B2h,ca	30-61	47	70	18	1,9	310
	BCh,ca,⊥	61-85	54	62	19	2,4	254
Криоземы глееватые. Нижняя часть склона							
9-04Н	O2v	2-9	212	184	23	2,6	1328
	B1g,ca	9-26	60	83	18	2,3	190
		26-38	55	82	21	2,7	<80
	B2h,ca	38-54	63	109	19	2,5	191
	BCg,ca,⊥	54-70	50	74	23	2,1	124
10-04Н	O1	0-2	2590	4340	89	22,0	7331
	O2v	2-11	601	637	37	7,6	1778
	B1ca	11-26	56	73	21	2,6	192
	B2g,ca	26-44	49	66	18	2,6	<80
	BCg,ca,⊥	44-58	48	77	18	2,6	1002
		58-107	56	81	19	3,2	639
Торфяно-криозем глееватый. Надпойменная терраса							
11-04Н	O1	0-2	1539	2221	68	16,8	4152
	O2v	2-14	2882	5913	160	30,2	5778
	O3	14-40	52	76	14	3,1	2091
	Bg,ca	40-70	67	75	22	3,5	256
	[O3⊥]	70-73	42	76	17	4,1	2048
Кайеркан							
9 км. Криозем глееватый. Средняя часть склона.							
Фитоценозы сильно нарушены							
12-04К	O1	0-1	641	704	29	10,2	2500
	AOv	1-4	597	875	35	7,8	1521
	B1ca	4-14	100	33	22	2,8	704
	B2h,g,ca	14-54	52	66	21	2,3	446
	BCca,⊥	54-102	45	74	19	2,0	188
Кайеркан-Алыкель							
17 км. Криозем глееватый. Средняя часть склона.							
Фитоценозы умеренно нарушены							
13-04КА	Ov	0-2(3)	402	438	17	8,3	2573
	O1	2-5	169	160	1	1,7	1594
	A1Bv	5-9	257	291	23	5,4	444
	B1ca	9-14	63	74	19	3,4	316
	B2h,g,ca	14-51(62)	44	50	18	2,8	127
	B3ca	62-75	49	56	18	3,2	<80
	BCca,⊥	75-88	51	60	20	3,5	317
Алыкель							
25 км. Криозем глееватый. Средняя часть склона							
14-04КА	Ov	0-2	190	258	26	6,4	1435
	O1	2-4	160	160	6	5,0	692

1	2	3	4	5	6	7	8
	AOv	4-8	130	132	18	8,0	<80
	A1Bv	8-15	68	62	21	4,6	64
	Bg,ca	15-46	51	58	12	3,9	<80
	BCca,⊥	46-80	44	63	17	3,9	696
“Богонидское”							
40 км. Криозем. Слабонаклонная поверхность равнины							
Фитоценозы слабо нарушены							
15-04БК	Ov	0-4	75	90	4	5,3	1651
	O2v	4-11	89	89	13	6,7	767
	Bca	11-31	48	57	20	3,4	319
	BCca,⊥	31-57	60	60	20	3,3	124
		57-80	44	44	19	3,1	<80
Криозем глееватый							
21-04БК	O1v	0-5	200	235	18	13,4	1830
	O2v	5-12	37	38	13	3,4	1718
	AO	12-22	43	42	21	4,3	318
	Bca	22-44	47	43	21	4,3	316
	BCh,g,ca,⊥	44-54	42	40	18	3,6	<80
Криозем							
17-04	Ov	0-3	85	99	4	6,0	1654
	O2v	3-8	280	343	12	13,5	1704
	AOA1	8-17(24)	15	13	5	2,3	126
	B1ca	17(24)-39	30	12	9	2,1	249
		28-36	17	12	8	2,0	376
	BCca,⊥	39-73	29	28	9	1,6	<80
		73-82	50	45	20	3,9	440
Криозем. Склон речной долины.							
18-04БК	O1	0-1	54	48	5	3,0	1331
	O1v,z	1-7	130	113	17	7,9	829
	AOA1ca,z	7-15	44	50	17	4,0	<80
	B1ca,z	15-31	37	41	19	3,9	<80
	BCca,z	31(48)-71(78)	71	74	27	7,1	685
		71(78)-96	51	54	21	5,0	126
	BCca,⊥	96-128	56	54	23	6,3	<80
Криоземы глееватые. Надпойменная терраса							
20-04БК	Ov	0-6	83	83	3	4,3	1429
	O1	6-13	94	132	4	4,2	1524
	AO	13-17	54	31	24	5,8	318
	B1ca	17-36	25	29	13	4,0	<80
	B2h,ca	36-44	54	58	22	6,4	310
	BCh,ca,⊥	44-57	45	36	16	4,2	315
16-04БК	Ov	0-3	65	35	6	3,5	1143
	O2v	3-10	45	43	9	3,5	1328
	Bg,ca	10-27(35)	45	26	15	2,9	832
	BCh,ca,⊥	27(35)-56	50	52	22	5,9	349
19-04БК	Ov	0-3	87	88	17	7,5	640

Концентрация элементов в фоновых почвах равнинной тундры, мг/кг

№ разреза	Горизонт	Глубина, см	Ni	Cu	Co	Pb	S
	AOv	3-8	103	106	19	8,9	501
	AOA1	8-17	40	39	19	4,3	497
	Bg,ca,⊥	17-37	52	44	20	5,6	566
Дудинка							
70 км. Криозем. Вершина холма							
Фитоценозы слабо нарушены и фоновые							
23-04ДК	O1	0-2	26	21	1	1,9	1785
	AOv	2-4	55	58	10	6,1	682
	B1ca	4-17	20	15	11	1,9	189
	B2ca	17-39	62	35	16	2,8	312
	BCca,⊥	39-68	43	49	19	2,7	<80
		68-96	78	11	9	1,0	<80
Криозем глееватый							
22-04ДК	Ov	0-4	21	31	1	3,1	892
	O2v	4-11	41	28	5	6,4	1082
	AOA1	11-19	12	10	5	1,7	316
	B1	19-24(33)	65	18	12	2,4	253
	B2ca	24(33)-43(48)	84	13	9	1,1	<80
	BCg,ca,⊥	43(48)-65	57	64	20	7,7	1024
Торфяно-криозем. Приозерное понижение							
24-04ДК	Ov	0-4	25	37	1	4,3	698
	O1	4-10	25	44	3	5,7	1118
	O2⊥	10-30	12	18	2	0,7	2051
Криоземы. Надпойменная терраса							
25-04ДК	O1	0-1	24	21	2	0,8	1972
	AO	1-4	76	63	8	7,6	128
	B1ca	4-14	38	8	5	2,0	<80
	B2h,ca	14-28(49)	41	6	5	1,8	570
	B3ca	28(49)-46(53)	36	17	11	3,1	444
	BCca,⊥	46-56	31	6	5	2,3	<80
		56-92	37	23	11	3,0	251
		92-130	8	4	4	0,9	<80
26-04ДК	AOv	0-5(7)	96	88	9	8,6	1456
	B1ca	5(7)-27	45	64	14	3,3	251
	B2ca	27-51	42	26	14	13,4	314
	BCca,⊥	51-77	42	32	13	2,9	188
		77-88	5	28	14	3,5	189
27-04ДК	AOv	0-2	25	24	7	2,6	884
	A1B	2-12	28	15	8	2,6	563
	Bca	12-27	18	11	9	2,4	314
	BCca,⊥	27-61	26	15	8	2,3	894
		27-85	53	41	19	6,6	945
		85-120	30	15	8	2,6	188

муляция в органогенных, иллювиальных и надмерзлотных горизонтах). Для почв характерен преимущественно аккумулятивный тип распределения элементов с максимальным накоплением их в верхней части профиля.

Основными горизонтами почв, аккумулятивными техногенные вещества, являются органогенные (О) и органоминеральные (АО, АОА1), где наблюдается повышенное содержание элементов по сравнению с фоновыми и “кларковыми” концентрациями, а также с минеральной частью почв. Эти горизонты служат биогеохимическими барьерами, в условиях которых происходит сопряженная аккумулятивная концентрация и трансформация техногенных элементов. То есть в этих горизонтах происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрации. Накопление веществ в них связано как с атмосферными выпадениями (в виде газов, кислотных осадков, аэрозолей), так и с биогеохимическими потоками, элементы которых прошли цикл биологического поглощения. Элементов концентрируются на глубине 0–5, реже, до 12–30 см. Сравнительно глубокое проникновение техногенных веществ обусловлено высокой порозностью (хорошей фильтрационной способностью) подстилочных (особенно слабозложенных) и грубогумусовых горизонтов, способствующей нисходящей миграции элементов, находящихся в составе растворов, тонкодисперсных частиц и газов. Максимальные концентрации элементов наблюдаются в криоземах (тяжелых по гранулометрическому составу), формирующихся на наветренных участках, вблизи источника выбросов и в нижней части склонов (трансаккумулятивные ландшафты). По мере удаления от центра эмиссии содержание техногенных элементов и глубина их проникновения уменьшаются. В горизонтах, обогащенных органическим веществом, по максимальным величинам ряд концентраций элементов имеет вид: $S > Cu > Ni > Co > Pb$, что соответствует концентрации элементов в рудах, вовлекаемых в промышленное производство. В минеральной части профиля количество элементов резко падает до средних (или ниже) значений в педосфере.

В аэральных выбросах сера присутствует главным образом в виде сернистого газа

и аэрозолей растворимых сульфатов (купоросов), ТМ – в виде аэрозолей нерастворимых и слабо растворимых сульфидов и оксидов. Эти соединения оседают на почву в виде сухих и влажных атмосферных выпадений (кислотные дожди, туманы и др.). В процессе аэрального переноса сернистый газ рассеивается на гораздо большем по сравнению с ТМ пространстве. Распределение ТМ происходит в основном в составе тонкодисперсных пылевых частиц (сульфидов), основная часть которых выпадает вблизи источника эмиссии.

Коэффициент техногенной концентрации представляет собой превышение фактического уровня отдельного элемента в органогенных (О) и грубогумусовых (АО, АОА1) горизонтах по отношению к минеральным горизонтам (В, ВС). При ранжировании концентраций элементов выбрана логарифмическая шкала, выраженная в коэффициентах техногенной концентрации ($K_{\text{тк}}$: 64–128 и более – очень сильная; 32–64 – сильная; 16–32 – средняя; 8–16 – слабая; 4–8 – очень слабая; 2–4 – минимальная; меньше 2 – региональный фон).

В территориальном отношении $K_{\text{тк}}$ элементов варьирует. По уровню концентрации располагаются в ряд: $Cu > Ni > S > Pb > Co$. Вблизи источника эмиссии (расстояние до 40 км) происходит накопление всех элементов, на расстоянии от 20 до 40 км – никеля, меди, свинца, серы.

Выделены следующие участки (зоны) концентрации элементов.

Никель, $K_{\text{тк}}$: 1) Надежда (< 2,5 км от источника эмиссии) – сильная концентрация (60–40); 2) 2,6–5 км – средняя (до 37); 3) Кайеркан (5–10 км) – слабая (13–12); 4) Кайеркан-Алыкель, Алыкель (10–15 км) – очень слабая (6–3); 5) Богодинское (25–40 км) – минимальная (4–3); 6) Дудинка (40–70 км) – минимальная и фоновая (≤ 4); 7) Кутарамакан, Б. Авам, Эндэ (163–246 км) – фоновая концентрация. Ореол техногенного рассеяния никеля имеет протяженность до 40 км. Максимальное содержание элемента локализуется в пределах 2,5–5 км от центра эмиссии, что связано с выпадением его в составе пылевых частиц.

Медь, $K_{\text{тк}}$: 1) Надежда (< 2,5 км от источника эмиссии) – очень сильная концентра-

ция (70–69); 2) 2,5–5 км – сильная (до 54); 3) Кайеркан (5–10 км) – слабая (12–11); 4) Кайеркан-Алыкель, Алыкель (10–25 км) – очень слабая (6–3); 5) Богодинское (25–40 км) – минимальная (5–3); 6) Дудинка (40–70 км) – минимальная и фоновая (≤ 4); 7) Кутарамакан, Б. Авам, Эндэ (163–246 км) – фоновая концентрация. Пространственное распределение содержания меди в почвах подчиняется тем же закономерностям, что и никеля, но ее максимальные концентрации вблизи источника эмиссии значительно выше, что связано с промышленной специализацией медного завода “Надежда”.

Кобальт, K_{TK} : 1) Надежда (< 2,5 км от источника эмиссии) – слабая концентрация (10–7); 2) Надежда, Кайеркан, Кайеркан-Алыкель, Алыкель (2,5–25 км) – очень слабая (≤ 6); 3) Богодинское, Дудинка, Кутарамакан, Б. Авам, Эндэ (25–246 км) – фоновая концентрация (<1).

Свинец, K_{TK} : 1) Надежда (2,5 км от источника эмиссии) – слабая концентрация (17–7); 2) Надежда, Кайеркан (2,5–10 км) – очень слабая (8–2); 3) Кайеркан, Дудинка (10–70 км) – фоновая (2–0,7); 4) Кутарамакан, Б. Авам, Эндэ (163–246 км) – фоновая концентрация. Ореол рассеяния свинца имеет радиус до 40 км. Повышенные K_{TK} свинца в почвах участков Кутарамакан, Эндэ обуславливаются природно-аномальной концентрацией, связанной с породной металлогенической (рудогенной) специализацией почвообразующих пород и с ландшафтно-геохимическими барьерами.

Сера, K_{TK} : 1) Надежда (2,5 км от источника) – сильная концентрация (38–10); 2) Надежда, Кайеркан (2,5–25 км) – слабая (14–7); Алыкель, Дудинка (25–70 км) – фоновая (2–1); Кутарамакан, Б. Авам, Эндэ (163–246 км) – фоновая концентрация. Ореол техногенного рассеяния серы обнаруживается на расстоянии до 160 км от источника выбросов.

Конфигурация загрязнения территории ТМ и серой вокруг источника выбросов локализована. Степень происходящих количественных изменений техногенных элементов имеет сложный характер и зависит от ландшафтных и техногенных условий (техногенная нагрузка, удаленность от источника эмиссии, роза ветров, пластика рельефа и др.).

Рассеяние и концентрация элементов в сфере воздействия комбината приводит к формированию техногенных почвенно-геохимических аномалий (зон), которые имеют разные протяженность, размеры, форму, направление и концентрацию элементов (даже в пределах одного ключевого участка). В целом площадное загрязнение в регионе отсутствует, оно носит полосчатый или точечный характер. Размеры зон концентрации представляют собой систему концентрических окружностей или имеют вытянутые неправильные очертания. Выявленные зоны осложняются “шумовыми” эффектами, связанными с естественными гипергенными (вторичными) геохимическими ореолами рассеяния элементов. Сравнение площадной концентрации элементов в почвах НПП с опубликованными данными по другим регионам России (например, промрайоны Кольского п-ова) показывает сопоставимые, но более сложные региональные закономерности, связанные с особенностями природно-экологических факторов (почвы, литологии, мерзлотно-климатические условия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетними исследованиями выявлены эколого-геохимические закономерности концентрирования ТМ и серы в мерзлотных почвах НПП. Уровень концентрации элементов в почвах определяется техногенным привносом и геохимически специализированной (рудогенной) горной (почвообразующей) породой, а распределение их контролируется внешними и внутренними (почвенными) условиями. Установлены особенности внутрипочвенной и площадной концентрации элементов, отсутствующие в немерзлотных ландшафтах. Максимальное накопление элементов, превышающее фоновые и “кларковые” концентрации, происходит в корнеобитаемых органогенном, органоминеральном и нередко в надмерзлотном горизонтах. По мере приближения к источнику эмиссии наблюдается резкое увеличение элементов (особенно Ni и Cu). На основе обобщения обширного количественного материала по концентрации элементов выполнено почвенно-геохимическое зонирование территории.

Результаты исследования дают основу для эколого-геохимического мониторинга и прогноза изменений почвенно-геохимических (ландшафтно-геохимических) условий окружающей среды, для детоксикации и рекультивации почв, а также для выявления региональных экологических нормативов.

ЛИТЕРАТУРА

- Агрофизические методы исследования почв. М.: Наука, 1966. 259 с.
- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1962. 491 с.
- Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
- Додин Д. А. К геохимии траппов северо-западной окраины Сибирской платформы // Геология и полезные ископаемые Норильского горнопромышленного района. Норильск, 1968. С. 79–82.
- Додин Д. А., Володько С. А., Сухов Л. Г., Костров Ю. В. и др. Оптимальная стратегия геохимических поисков рудных месторождений в закрытых районах (на примере севера Красноярского края) // Геохимические критерии прогнозной оценки оруденения. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. С. 36–44.
- Ершов Ю. И. Почвы предтундровых лесов Енисейского Заполярья, подверженные аэропромышленным выбросам серы // Геогр. и прир. ресурсы. 1992. № 1. С. 33–38.
- Ершов Ю. И. Почвы притундровых и северо-таежных лесов Средней Сибири // География и картография почв. М.: Наука, 1993. С. 133–142.
- Ершов Ю. И. Мезоморфное почвообразование в таежно-мерзлотном семигумидном секторе Средней Сибири // Почвоведение. 1994. № 10. С. 10–18.
- Ершов Ю. И. Почвы Среднесибирского плоскогорья. Красноярск, 2004. 86 с.
- Заворотных И. Р. Глубинные геохимические поиски месторождений в долинах рек и падах и влияние на них многолетней мерзлоты // Геохимические поиски в областях криогенеза. Л., 1970. С. 18–21.
- Иванова А. М., Куликов Ю. С., Егорова И. С. Эффективность геохимических исследований полезных ископаемых на северо-западе Сибирской платформы // Сибирский никеленосный регион и его промышленные перспективы. Л., 1973. С. 104–107.
- Комарова М. З. О контактовом ореоле Болгохтохской интрузии гранодиоритов // Геология и полезные ископаемые Норильского горнопромышленного района. Норильск, 1968. С. 103–104.
- Ленькин Е. Н. Геолого-петрохимические особенности траппов северо-западной части Сибирской платформы // Там же. С. 75–78.
- Лурье М. Л., Масайтис В. Л. Верхнепалеозойские-нижнепалеозойские долериты и базальты трапповой формации // Геология Сибирской платформы. М.: Недра, 1966. С. 247–284.
- Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. М.: Гидрометеоиздат, 1981. 109 с.
- Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. М., 1995. 48 с.
- Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почв химическими веществами. М.: Минздрав, 1987а. 25 с.
- Методические указания по оценке опасности загрязнения почв химическими веществами. М., 1987б. 11 с.
- Старицына Г. Н. Никеленосные траппы северо-восточного борта Тунгусской синеклизы // Сибирский никеленосный регион и его промышленные перспективы. Л., 1973. С. 65–73.
- Урванцев Н. Н. Северо-Сибирская никеленосная область // Северо-Сибирский никеленосный регион и его промышленные перспективы. Л., 1973. С. 5–15.

Ecological and Geochemical Assessment of Cryogenic Soils of the Central Siberian Plateau

Yu. I. YERSHOV

*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail:solum@ksc.krasn.ru*

Soils and rocks of natural and technogenic landscapes in the Norilsk industrial region were studied. The main sources of heavy metals and sulfur in cryogenic soils were identified. The peculiarities of elemental composition in cryogenic soils in comparison with non-cryogenic soils were presented. Spatial and subsoil element concentration were determined. Soil and geochemical zoning of the territory was carried out on the basis of rich quantitative data.

Key words: cryogenic soils, rock formations, technogenesis, geochemical landscapes, heavy metals and sulfur, soil geochemical zones, Central Siberian Plateau.