

УДК 550.47, 550.42, 504.054

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ СОСНЯКОВ ЛЕСОСТЕПИ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

© 2024 г. Н. В. Терехина*, А. Д. Глинских**

Институт наук о Земле СПбГУ, В.О., 10 линия, 33/35, Санкт-Петербург, 199178 Россия

**e-mail: n.terehina@spbu.ru*

***e-mail: ana.glin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 01.08.2023 г.

Принята к публикации 29.08.2023 г.

В работе дается комплексная оценка изменения интенсивности загрязнения почв и растений сосняков по мере удаления от основных источников загрязнения. В пределах лесостепной зоны Челябинской области выявлены зоны экологической напряженности по суммарным показателям загрязнения почв подвижными формами химических элементов и по уровню загрязнения корки сосны. Основными элементами-загрязнителями выступили Cr, Pb, Zn, Cd, содержание которых в почвах в десятки раз превосходило фоновые значения. Для корки сосны отмечены те же загрязнители и Cu, но их концентрации значительно ниже и превышают фоновые лишь в разы. Высокие значения коэффициентов корреляции между показателями загрязнения для почв и корки отмечены по Pb, Cu, Zn и суммарному показателю загрязнения. Содержание большинства изученных химических элементов в хвое сосны не превышает фоновые значения, но содержание Al и Ni на некоторых участках вблизи промышленных предприятий может в 2–4 раза превышать фоновые.

Ключевые слова: почвы, корка сосны, тяжелые металлы, экологическое зонирование лесостепи, Челябинская область

DOI: 10.31857/S0016752524020067, **EDN:** KOVXQR

ВВЕДЕНИЕ

Повышенная концентрация тяжелых металлов в почвах Южного Урала связана со сложной, мозаичной геохимической структурой ландшафтов, а также с воздействием антропогенных факторов. Челябинская область характеризуется высоким уровнем техногенной нагрузки, обусловленной многолетним влиянием крупных промышленных центров, преимущественно металлургических. Здесь находится 14035 источников загрязнения атмосферного воздуха, 99% из которых стационарные (Доклад ..., 2021). В 2019 г. Челябинская область занимала 3-е место в России по объему образующихся токсичных отходов, 5-е место по объему выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников и 10-е место по объемам сброса загрязняющих сточных вод в водные объекты (Улитина, 2020). По данным дистанционного зондирования техногенное загрязнение земель охватывает площадь 29.5 тыс. кв. км, то есть больше трети от площади области (Манторова, Зайкова, 2015). Челябинск входит в “черный список” природоохранной программы ООН.

Почвенный покров на западе области, вблизи промышленных зон, особенно в районах переработки руд цветных металлов (г. Карабаш), характеризуется высоким содержанием валовых форм Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, Co, превышающим фоновые концентрации в 2–20, 4–50, 10–20, 3–20, 2–3, 2–3 раза соответственно. В районе переработки руд черных металлов ситуация складывается лучше, но и там отмечено превышение фона по Cu, Zn, Cd в 14, 6 и 8 раз соответственно. Поступление металлов происходит в основном за счет аэропромвыбросов, и наряду с существующими геохимическими провинциями естественного происхождения образуются провинции техногенного происхождения (Головина, 2013; Зыбалов, Юдина, 2016; Макарова и др., 2022; Шабанов, Стрекулев, 2021).

В Челябинске в ряде районов, главным образом – в Металлургическом, для почв отмечается превышение ПДК по валовой форме более чем в 2 раза по Pb. В среднем по городу фоновые значения содержания Pb превышены в 1.7 раз. По Zn в Металлургическом районе отмечается превышение ПДК: по валовой форме в 1.8 раз, по подвижной – в 3 раза

(в среднем по городу – в 2.6 раз). Суммарный показатель загрязнения почв для Металлургического района равен 12.1 (допустимый уровень загрязнения) (Семенов и др., 2015). К Металлургическому району Челябинска примыкает Каштакский бор, где среднее превышение ПДК подвижных форм металлов в почве составляет по Zn 2.5 раза, по Mn 2 раза, по Pb 4 раза (Ищенко, 2021). Для Челябинского городского бора (памятника природы областного значения) – крупного соснового массива в западной части города – Т.А. Головина (2013) отмечает превышение ПДК по содержанию Zn в почве в 2 раза, Pb – в 1.5 раза.

Анализ почв сельскохозяйственных земель в трех районах лесостепной зоны, расположенных к северо-западу и северо-востоку от Челябинска, недалеко от наиболее мощных источников загрязнения, показал, что в Сосновском районе выявлено загрязнение Ni, Cr и Co на 8.1% территории. Превышение ПДК по Zn и Pb – в Красноармейском районе на 4.6% сельскохозяйственных угодий. В Аргаяшском районе превышение ПДК по Cu, Zn, Cr и Mn отмечено на 19.5% сельскохозяйственных угодий (Манторова, Зайкова, 2015).

Северо-восточнее города Челябинска располагается СНТ “Хлебосад”, территория которого находится в зоне действия промышленных зон металлургического и электрометаллургического комбинатов, а также ТЭЦ. Для почв там характерны превышения фоновой концентрации валовых форм металлов для Cr (в 8 раз), Ni (в 5.5 раз), Mo (в 2.5 раза), Cu и Pb (в 1.5 раза) (Грачева, Маркова, 2012). Южнее г. Челябинска, в СНТ “Локомотив-1” отмечается превышение ОДК (мг/кг) по содержанию Cu (в 3 раза), Ca и Fe (в 1.9 раза), Mn (в 1.5 раза) в ягодах облепихи, выращенной там. В ягодах, отобранных на территории СНТ “Дизелист-1” в окрестностях г. Троицк, расположенного в южной части лесостепной зоны, выявлены превышения ОДК по Mo и Sr (в 2–2.3 раза), Se (в 1.4 раза), Cr (на 76.2%) (Наумова, 2021). В районе г. Троицк так же отмечается незначительное повышение концентраций Pb, Cd, Ni в почве (Фаткуллин, Гизатулина, 2017).

Отмечается накопление тяжелых металлов в органах сельскохозяйственных животных, содержащихся в хозяйствах на территории области. Так, уровень Ni в разных органах животных превышал значения ПДК (для продуктов убоя животных) в 9.5–49.1 раза, содержание Pb – в 2.8–55.0 раз (Гертман и др., 2021).

Наряду с повышением общего содержания тяжелых металлов в загрязненных почвах происходит увеличение относительного содержания подвижных соединений металлов, что свидетельствует об ослаблении буферности почв по отношению к ним

и снижении способности почв защищать сопредельные среды от загрязнения. С показателями содержания подвижных соединений металлов непосредственно связано их токсическое воздействие на живые организмы (Мотузова, Карпова, 2013).

Все вышесказанное демонстрирует, что в достаточной мере изучено загрязнение территорий, прилегающих непосредственно к крупным промышленным центрам, и сельхозземли, но в меньшей степени исследованы лесные биогеоценозы. Цель данной работы – прояснить вопрос накопления элементов-загрязнителей в компонентах лесных сообществ подзоны лесостепи Челябинской области на примере сосняков, расположенных на разном удалении от источников загрязнения. В задачи входило: оценить количественные показатели подвижных форм химических элементов в поверхностных горизонтах почв и их пространственное распределение; рассмотреть особенности накопления химических элементов в корке и хвое сосны обыкновенной; на основе полученных биогеохимических данных провести экологическое зонирование изученной территории.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые работы проводились в период с 03.08.2021 по 03.09.2021. Общая протяженность маршрута составила 243 км. Данный маршрут проложен от северо-западной границы лесостепи Челябинской области к ее юго-восточной границе: это направление соответствует тенденции уменьшения количества промышленных предприятий. Выбор участков сосняков производился, по возможности, через 10 км – таким образом, чтобы участки были расположены на приблизительно равном друг от друга расстоянии (рис. 1). Однако следует отметить, что в настоящий момент доминирующей лесобразующей породой лесостепи Челябинской области является береза, а сосняки представлены главным образом островными и ленточными борами. В связи с этим на отдельных участках сосняки отсутствовали, поэтому шаг маршрута мог несколько увеличиваться.

Данный выбор был сделан с целью определения радиуса воздействия промышленных предприятий на естественные биогеоценозы, выделения импактной, буферной и переходной зон. В районах наиболее сильного промышленного воздействия закладывалось несколько пробных площадок (ПП). Началом маршрута явились окрестности г. Кыштым, располагающегося на северо-западной границе лесостепи, в предгорьях Урала. Главный загрязнитель атмосферного воздуха здесь – ЗАО “Кыштымский медеэлектролитный завод”. Основным поллютантом выступает двуокись серы, хотя

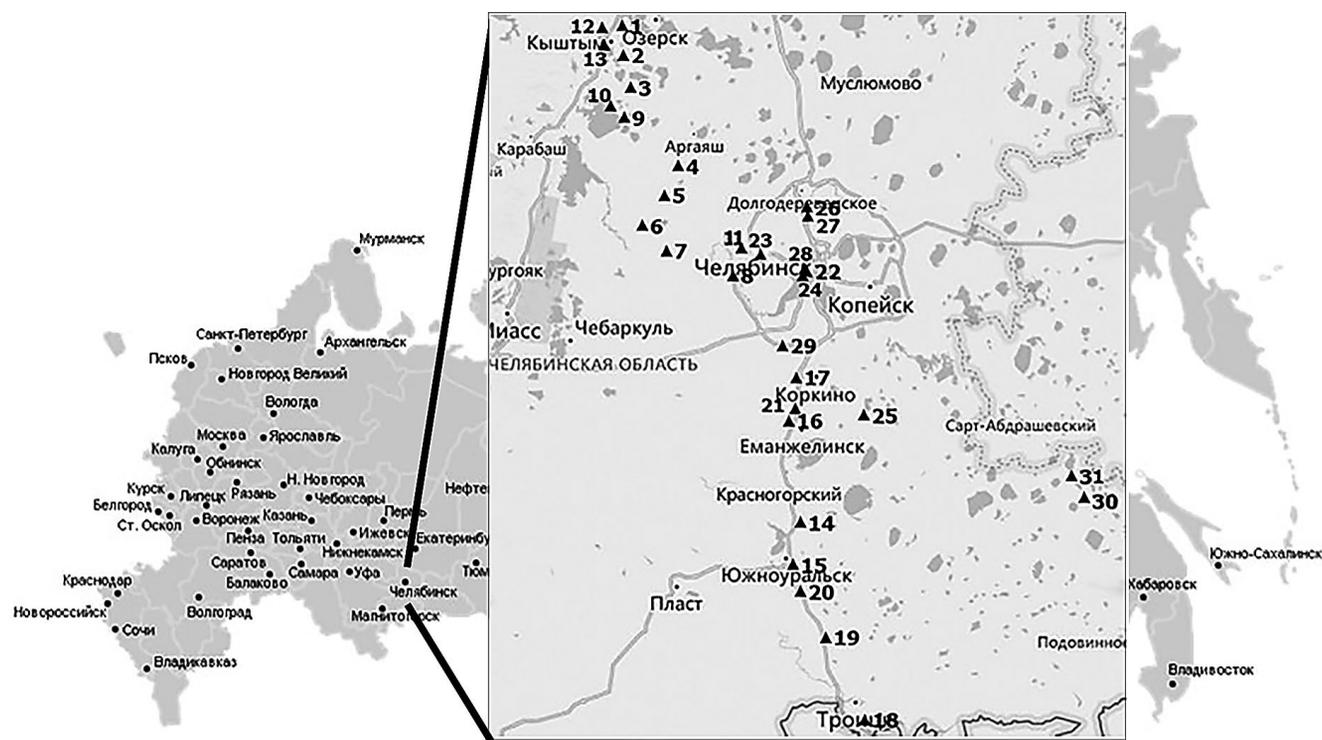


Рис. 1. Пробные площадки, заложенные на территории Челябинской области (цифрами обозначены номера пробных площадок).

недавно на предприятии были поставлены фильтры, резко снизившие количество ее выбросов. Также в Кыштыме широк спектр загрязняющих почву металлов, так как, начиная с 1757 г., здесь работал железодельный завод Никиты Демидова. Почвы города загрязнены Cu, Zn, Ni почти повсеместно, Pb, Co и Cd лишь локально. Среднее содержание Cu в четыре с лишним раза превышает довольно высокие для этой местности фоновые значения. Наиболее сильное загрязнение зафиксировано вокруг завода в радиусе 0.5–1.0 км (Левит, 2005). Затем маршрут проходил через г. Челябинск и далее на юг. Окончание маршрута – окрестности г. Троицк, который находится на юго-востоке лесостепи области, у границы с Казахстаном. Загрязнение атмосферного воздуха здесь связано в первую очередь с работой тепловой электростанции. Две ПП (№ 30, 31) заложены вне намеченного маршрута – на востоке области, в Октябрьском районе, где предполагались наименьшие показатели загрязнения почвы и растений – чтобы принять их за региональный фон.

Всего была заложена 31 ПП, на которых отбирались пробы почв и растений (корка и хвоя сосны *Pinus sylvestris* L.). Сбор образцов поверхностного горизонта почв (исключив подстилку) осуществлялся в 5-кратной повторности по методу конверта (ГОСТ 17.4.4.02-84) для каждой ПП. Корка и хвоя сосны

отбирались с пяти растений, характеризующихся достаточно высокими показателями жизнестойкости и располагающихся в разных частях исследуемых участков размером 20×20 м (Терехина, 2010). Таким образом, было отобрано по одному среднему образцу почв и частей растений с каждой ПП.

Согласно картографическим материалам, представленным в Национальном атласе почв Российской Федерации, ПП вблизи г. Кыштым, на пограничной с горно-лесной зоной территории, приурочены к серым лесным почвам. Наибольшее количество ПП расположено на территории, где распространены черноземы языковатые и карманистые выщелоченные с пятнами солончаков луговых (Национальный атлас..., 2011). В целом почвенный покров весьма пестрый. Как отмечает П.Л. Горчаковский (1968), массивы равнинных сосновых боров в Зауралье приурочены к древним песчаным наносам, располагающимся вблизи русел современных рек; нередко сосняки произрастают на сулинных наносах. Лесные посадки приурочены, как правило, к лесопригодным почвам, к которым относятся черноземы незасоленные и глубокослабосолончаковатые, темно-каштановые маломощные и среднемощные, а также остаточные солонцеватые и глубокосолончаковатые почвы (Фрейберг, 1968).

Пробоподготовка растений и почв осуществлялась по стандартным методикам и ГОСТам (Опекунова и др., 2015). Для каждой ПП пробы анализировались в двух повторностях. Растительные пробы подвергались сухому озолению при температуре 400–450 °С с последующим разложением 1n раствором азотной кислоты; вытяжка почв проводилась ацетатно-аммонийным буфером (рН = 4,8). Пробы анализировались в Ресурсном центре Научного парка СПбГУ “Методы анализа состава вещества” методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП–МС) на приборе ICP-E-9000. Во всех образцах определялось содержание тяжелых металлов (Fe, Ni, Cr, Co, Mn, Cu, Pb, Cd, Zn) и Al. В почвах дополнительно определялось содержание следующих элементов: Hg, S и P.

Также в лаборатории геоэкологического мониторинга института Наук о Земле СПбГУ оценивались показатели значений актуальной и потенциальной кислотности почв.

На основе результатов анализа вычислены биогеохимические коэффициенты.

Коэффициент концентрации $K_k = C_r/C_f$, где C_r – концентрация элемента в пробе растений или почв (мг/кг сухого вещества), C_f – средняя концентрация того же элемента в соответствующих пробах фоновых участков. Во избежание ошибок, вносимых как при пробоподготовке, так и при проведении анализов, в качестве регионального фона (C_f) использовали собственные данные по четырем ПП: № 19, 20 и 30, находящимся вдали от промышленных предприятий, компоненты которых характеризовались наименьшими концентрациями химических элементов, и ПП № 18, которая расположена не далеко к юго-западу от г. Троицка (оказалось, что загрязнение там не значительно, что позволило включить ее в число фоновых точек).

Коэффициент биологического накопления $K_{bn} = C_a/C_p$, где C_a – концентрация элемента в золе растений (мг/кг), C_p – содержание подвижных форм химического элемента в почве той же ПП.

Суммарный показатель загрязнения $Z_c = \sum K_k - (n-1)$, где K_k – коэффициенты концентрации элементов, для которых $K_k > 1.5$ (для почв) и $K_k > 1.0$ (для растений), n – число анализируемых элементов-загрязнителей. По значению Z_c почвы делятся на четыре категории: 1) < 16 – допустимая; 2) $16-32$ – умеренно-опасная; 3) $32-128$ – опасная; 4) > 128 – чрезвычайно опасная (СанПиН 2.1.7.1287–03).

Также оценивались превышения ПДК подвижных форм металлов в почвах (ГН 2.1.7.2041–06). Статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью пакета программ STATISTICA12. Вычислены коэффициенты корреляции Пирсона

(на 5% уровне значимости) между коэффициентами концентрации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Средние содержания подвижных форм химических элементов в почвах убывали в ряду: $Mn > Al > Fe > Pb > Cu > Cr > Co > Cd$. Содержания Ni и Hg во всех пробах, а также Cr, Cd и Co в ряде проб не достигали предела обнаружения. Сравнивая полученные результаты с региональным фоном, были получены значения коэффициентов концентрации, представленные в табл. 1.

Средние значения K_k для почв в целом по исследованной территории демонстрируют повышенное относительно фона содержание Cr (в 12.6 раз), Zn (в 9.6 раз), Pb (в 8.3 раза), Cd (в 4.1 раз), что может быть результатом как наличия естественных геохимических аномалий, так и техногенного воздействия. Для Cu и Fe превышения фоновых значений составляют около 2 раз, для таких элементов, как Al, Co, Mn, K_k варьирует в пределах 1–2 раза.

Корреляционный анализ содержаний химических элементов в почве позволил выявить тесные связи, существующие между некоторыми элементами (табл. 2). Так Al с Fe и Cr имеют высокие значения коэффициентов корреляции. ПП №№ 1, 2, 11, 12, почвы которых характеризуются максимальными показателями K_k по этим элементам, приурочены к г. Кыштым. Значимые коэффициенты корреляции имеют Cd, Zn, Pb, Cu. Эти элементы-загрязнители (а также Co), вероятно, имеют другие источники и связаны с тонкодисперсными частицами, переносимыми на большие расстояния от источника загрязнения, так как максимальные значения K_k по ним отмечены для почв ПП № 5, 6, 7, 9, 10, расположенных к югу от г. Кыштым, при том, что там преобладают ветра западного, юго-восточного и южного направлений. Особо выделяется ПП № 9 около пос. Увильды, находящегося на восточном берегу одноименного озера. Именно на ней почвы имеют максимальные K_k из всех изученных ПП, и превышения фоновых значений составляют: Zn (51.6 раз), Pb (87.1 раза), Cd (26.1 раза), Cu (18.6 раз). Также высокие значения K_k по этим элементам отмечены для почв ПП №№ 22, 23, 24, 26, 27, 28 в пределах г. Челябинска и его окрестностей. Обращает на себя внимание значительное превышение фоновых концентраций по содержанию Zn (более чем в 20–25 раз), Pb (в 4.9–6.2 раз), Cd (в 6.4–9.3 раз). Отдельно рассматриваются P и S, коэффициент корреляции между которыми составляет 0.59. Эти элементы не коррелируют ни с одним из металлов, а содержания их в почвах, по большей части, не превышают фоновые значения (об исключении будет сказано ниже).

Таблица 1. Коэффициенты концентрации, показатели суммарного загрязнения (Zc), pH водной и солевой вытяжек почв на ПП исследованной территории

№ПП	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	P	S	Zc	pH водн.	pH солев.
1	3.5	3.1	1.1	106.9	3.7	11.6	2.4	9.8	5.8	0.9	0.6	140.0	4.96	3.84
2	3.0	1.7	0.9	216.6	2.2	3.3	1.0	13.1	5.6	0.6	0.8	239.4	4.27	3.52
3	1.1	н/о	0.5	0.1	1.1	1.8	0.9	1.0	1.7	0.6	0.3	2.6	5.99	5.09
4	0.3	3.3	0.7	н/о	1.5	0.3	5.0	4.1	7.5	5.1	1.0	17.3	6.50	5.84
5	1.4	2.9	3.2	0.3	1.8	2.4	2.8	3.6	5.7	н/о	1.0	16.8	5.45	4.48
6	0.9	5.1	3.6	0.7	2.0	0.9	2.4	17.5	8.7	1.2	1.0	34.3	5.27	4.56
7	1.4	2.5	4.2	0.7	1.5	0.9	2.8	7.7	5.8	0.6	0.8	19.8	5.91	5.21
8	0.6	1.5	0.3	н/о	1.0	0.5	2.4	1.7	2.4	0.9	1.1	4.9	6.14	5.44
9	1.5	26.1	3.1	1.5	18.6	2.5	2.3	87.1	51.6	2.2	1.6	186.2	4.47	3.69
10	1.7	9.4	3.1	0.4	6.7	2.8	3.1	20.1	15.8	0.6	0.5	55.6	5.32	4.64
11	2.9	0.9	7.4	4.9	1.1	2.3	2.9	1.8	2.2	н/о	0.7	18.4	5.71	4.80
12	2.9	5.0	1.9	2.9	1.7	9.3	3.6	10.1	7.8	0.9	0.7	38.4	5.02	4.04
13	1.8	2.1	1.2	н/о	1.1	1.1	2.5	4.2	6.1	1.7	1.1	13.1	5.78	4.60
14	2.1	2.1	1.8	0.5	1.3	1.2	2.8	4.5	6.3	1.8	1.1	15.1	5.57	4.82
15	1.5	0.9	0.4	0.3	1.3	1.0	1.0	0.9	2.1	1.2	0.5	3.1	6.20	5.25
16	1.6	н/о	н/о	н/о	1.1	2.4	0.2	1.5	1.5	0.4	0.2	4.2	5.84	5.43
17	0.4	н/о	0.6	н/о	0.9	0.3	0.9	0.0	2.4	34.7	2.2	1.4	6.55	5.90
18	1.6	н/о	0.7	0.7	1.5	1.4	0.9	0.9	1.0	0.8	1.3	2.5	6.13	5.20
19	0.6	н/о	н/о	н/о	1.0	0.4	0.8	0.6	0.7	1.6	1.1	0.0	5.76	4.90
20	1.0	н/о	0.7	1.3	0.8	1.4	0.9	1.2	1.3	0.9	0.8	2.2	5.53	4.76
21	0.7	н/о	0.2	н/о	1.0	0.5	0.7	1.3	2.0	1.3	1.5	2.3	5.76	5.20
22	0.5	8.1	н/о	н/о	1.0	0.4	1.0	6.2	20.3	1.0	1.3	32.6	6.09	5.56
23	0.9	6.3	н/о	0.2	0.9	0.9	1.0	4.9	15.7	1.3	1.2	24.9	5.60	4.87
24	1.3	8.9	н/о	1.7	1.3	1.3	1.6	6.4	25.3	0.8	1.0	40.9	6.19	5.41
25	0.8	0.7	0.2	н/о	1.0	1.4	0.6	1.4	1.6	0.8	1.1	1.4	5.63	4.77
26	1.4	7.5	н/о	н/о	1.0	1.2	0.9	4.9	18.4	2.2	0.9	29.3	6.16	5.22
27	0.7	9.3	0.1	н/о	1.2	0.5	1.0	5.4	26.9	2.2	1.4	39.7	6.18	5.50
28	1.7	2.9	н/о	0.3	1.3	1.6	1.5	2.2	7.2	1.1	0.9	12.5	5.38	4.49
29	1.5	1.1	2.8	1.0	1.2	1.0	1.3	0.8	2.5	0.8	1.5	4.4	6.90	6.28
30	0.8	н/о	1.6	н/о	0.7	0.8	1.4	1.2	1.1	0.6	0.8	2.3	5.43	4.57
31	0.8	н/о	1.3	2.1	2.3	1.0	0.8	1.1	0.8	1.0	3.9	3.9	5.65	4.95
среднее	1.4	3.6	1.4	11.1	2.1	1.9	1.7	7.3	8.5	2.2	1.0	32.6	5.72	4.93

Примечания. Средние значения Кк вычислены не по "нулевым" значениям (н/о), а по значениям, полученным исходя из половины предела обнаружения (Зайцев, 2022).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Пирсона между содержаниями химических элементов в почве и показателями рН водной вытяжки почв

Химические элементы	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	P	Pb	S	Zn
Al	1										
Cd	0.02	1									
Co	0.38	0.12	1								
Cr	0.56	-0.07	-0.05	1							
Cu	0.15	0.83	0.26	0.05	1						
Fe	0.77	0.07	0.13	0.44	0.19	1					
Mn	0.27	0.21	0.53	-0.05	0.22	0.29	1				
P	-0.26	-0.09	-0.11	-0.07	-0.05	-0.15	-0.07	1			
Pb	0.13	0.88	0.27	0.08	0.97	0.15	0.23	-0.06	1		
S	-0.43	0.23	-0.1	-0.17	0.16	-0.36	-0.11	0.59	0.18	1	
Zn	-0.04	0.98	0.03	-0.06	0.74	-0.01	0.12	-0.07	0.80	0.27	1
pH	-0.53	-0.34	-0.22	-0.55	-0.46	-0.52	-0.14	0.30	-0.54	0.27	-0.25

Примечания. Полу жирным шрифтом отмечены значения (r), которые выше табличных критических значений коэффициента корреляции Пирсона для 5%-ного уровня значимости.

В ходе анализа данных отмечены значимые отрицательные величины коэффициентов корреляции между показателем кислотности почв и содержанием Al, Cr, Cu, Fe, Pb, то есть с группой основных элементов-загрязнителей. Этот факт подтверждает известное положение о том, что в почвах, подвергшихся антропогенной трансформации, особенно при подкислении почвенного раствора, многие химические элементы становятся более мобильны, резко увеличивается доля подвижных форм химических элементов, что отрицательно воздействует на растения (Ильин, Сысо, 2001; Опекунова, Опекунов, 2013).

Вычисленные показатели суммарного загрязнения Zc позволили сгруппировать ПП по сходным значениям, что нашло отражение в зонировании территории. На картосхеме загрязнения почв представлены три зоны (рис. 2, табл. 3), выделенные по категориям оценки степени химического загрязнения почв (СанПиН 2.1.7.1287–03).

Первая зона относится к опасной категории загрязнения. Сюда включена территория, приле-

гающая к г. Кыштым и находящаяся под воздействием выбросов со стороны г. Карабаш. Здесь среднее значение суммарного показателя загрязнения составляет 96.5, а местами (ПП № 2) достигает 239.4. Основными загрязнителями здесь выступают элементы с высокими значениями Кк: Cr(54.7) > Pb(20.8) > Zn(13.5) > Cd(7.9) > Cu(5.0) > Fe(4.6). Показатели кислотности продемонстрировали кислую и слабокислую реакции почв. Наиболее низкими значениями рН 4.27–4.96 характеризуются почвы (ПП №№ 1, 2, 9). Сопоставляя результаты с литературными данными по валовому содержанию металлов в почвах вблизи г. Карабаш (Шабанов, Стрекулев, 2021), надо отметить, что показатели превышения концентраций над фоновыми значениями: Cu (404), Cd (233), Zn (68), Co, Ni (2–3), – несколько отличаются от полученных нами для подвижных форм. Вероятно, это связано как с тем, что авторы отбирали пробы в непосредственной близости от промышленных предприятий, так и с особенностями используемых методов анализа проб.

Таблица 3. Средние значения Кк и Zc для почв в зонах экологической напряженности

Зона	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	P	Pb	S	Zn	Zc
1 зона	2.2	7.9	1.7	54.7	5.0	4.6	2.3	1.1	20.8	0.8	13.5	96.5
2 зона	1.2	4.6	2.5	1.0	1.3	1.1	2.1	1.3	5.2	1.1	11.4	23.5
3 зона	1.1	1.0	1.0	0.8	1.2	1.2	1.0	3.8	1.3	1.1	2.0	3.7

Примечания. Полу жирным шрифтом выделены значения Кк выше 1.5.

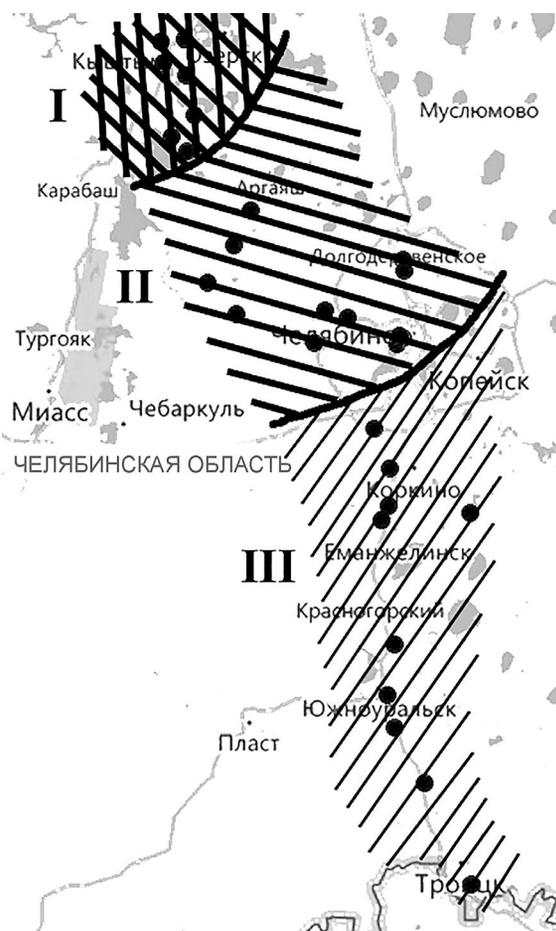


Рис. 2. Подразделение исследованной территории Челябинской области на зоны экологической напряженности по показателям суммарного загрязнения почв. I – опасная категория загрязнения (среднее значение $Z_c = 96.5$), II – умеренно опасная категория ($Z_c = 23.5$), III – категория с допустимым загрязнением почв ($Z_c = 3.7$).

Вторая зона относится к умеренно опасной категории. Средний суммарный показатель загрязнения составляет 23.5, а местами можно отметить повышение его до 40 и более. Элементы-загрязнители немного меняются местами, формируя следующий ряд показателей Кк: $Zn(11.4) > Pb(5.2) > Cd(4.6) > Co(2.5) > Mn(2.1) > Cu(1.3) > Al(1.2) > Fe(1.1) > Cr(1.0)$. В пределах этой зоны расположен г. Челябинск, промышленные предприятия и транспорт которого выступают основными загрязнителями. А.И. Семенов, А.В. Кокшаров, Ю.И. Погодин (2015) для г. Челябинск так же показали превышения значений валового содержания Pb и Zn над фоновыми значениями в 1.7 и 2.6 раз соответственно. Подобные значения приведены и в других работах (Головина, 2013; Ищенко, 2021). Для сравнения можно привести данные по Оренбургу – промышленному городу, расположенному в Южном Предуралье, и урбаноземы которого характеризуются следу-

ющим геохимическим рядом превышения фоновых значений для подвижных форм элементов: $Zn(3.3) > Pb(3.2) > Ni(1.5) > Cu(1.3) > Cd(0.9) > Cr(0.7)$ (Ложкин, 2014). Видно, что основными загрязнителями выступают Zn и Pb, но уровни загрязнения в г. Челябинске намного превышают аналогичные показатели для г. Оренбург.

Третья зона относится к категории с допустимым загрязнением почв. Для нее суммарный показатель весьма низок и составляет лишь 3.7. Элементами-загрязнителями выступает Zn (Кк = 2.0), а на некоторых ПП – Pb и Co. В целом зона однородна по химическому составу почв, но несколько выделяется ПП № 14, расположенная к югу от пос. Синий бор – там высокие значения Кк для Zn (6.3), Pb (4.5), Mn (2.8), Cd (2.1) и Al (2.1). Достоверно установить, чем обусловлены такие показатели для данной ПП, затруднительно. К востоку от нее расположен завод по переработке молока “Камэлла молочные продукты”, к западу, на расстоянии около 2 км, в пределах пос. Нагорный, – ОАО “Кварц” – крупный горно-обогатительный комбинат по переработке песка. Эти предприятия не являются металлообрабатывающими и не должны давать такого загрязнения. В качестве источника повышенных концентраций указанных элементов в почвах могут быть феррохромовые шлаки, которые, согласно М. Ершовой (2014), в прошлом могли использоваться здесь для раскисления почв.

Что касается фосфора, то для него количество ПП с небольшим в 1.5–2.0 раза превышением фоновых значений не многочисленно, и они равномерно распределены по экологическим зонам. Только почвы ПП № 17, расположенной к юго-западу от пос. Тимофеевка, характеризуются повышенным относительно фона содержанием P(34.7), S(2.2) и Zn(2.4). Причиной этого может являться расположенный на расстоянии 7.5 км к востоку от поселка Коркинский угольный разрез. Кроме того, Кк по P (5.2) имеет почва для ПП № 4, находящаяся во второй зоне и загрязненная Zn(7.5), Pb(4.1), Cd(3.3). Промышленные предприятия поблизости отсутствуют, загрязнение может быть вызвано атмосферным переносом, но так как повышенные относительно фона концентрации P на более северных ПП отмечено не было (лишь для ПП № 9 Кк = 2.2), то ведущим фактором, влияющим на этот показатель, возможно является наличие здесь естественной биогеохимической провинции, так как ранее отмечалось на территории, подчиненной г. Кыштым, наличие аномалии фосфора, титана, ванадия, молибдена (Доклад Челябинского..., 1994). Также возможна иная причина высоких концентраций тяжелых металлов: на ПП № 4 насаждения сосны являются искусственными и, вероятно, они были сделаны на субстрате антропогенного происхождения.

На гистограмме распределения средних показателей Кк для почв по экологическим зонам (рис. 3) видно, что первая зона имеет максимальные значения практически по всем исследованным элементам, а вторая – высокие значения лишь по Zn, Pb, и Cd.

Для установления степени опасности загрязнения почв для человека, были вычислены превышения ПДК по подвижным формам металлов. Для первой зоны экологической напряженности наблюдается превышение средних значений по Pb (в 4.7 раза), Cu (в 4.7 раза), Zn (в 2.7 раза), Mn (в 2.3 раза), Cr (в 2.3 раза). По Co превышения ПДК не обнаружено. Но надо отметить, что в пределах этой зоны находятся всего семь ПП, и не для всех из них отмечены чрезвычайно высокие показатели Кк. Так, например, по Cr только две ПП существенно загрязнены, для остальных пяти этого не наблюдается; для Zn так же две ПП характеризуются очень высокими значениями Кк, а для остальных этот показатель варьирует в пределах 0.3–1.6. Что касается Cu, Pb и Mn, то большинство ПП для этих элементов имеют превышения ПДК. Согласно данным А.А. Перваковой (2012), почвы под г. Карабаш имеют превышение ПДК по валовому содержанию Cu (в 4.4 раза), Zn (в 2 раза), Cr (в 20 раз), Co (в 1.7 раза), Pb (в 1.5 раза), что, в принципе, сходно с нашими данными (за исключением Cr).

Во второй зоне экологической напряженности превышение ПДК вдвое по Zn и Mn отмечено для половины ПП, по Pb – превышение ПДК в 4 раза для ПП № 6. Полученные данные согласуются с литературными: так в статье А.И. Ищенко (2021) указано, что для почв Каштакского бора (северо-вос-

ток Челябинска) отмечено превышение ПДК по Zn, Pb и Mn; в работе О.А. Гуменюк, М.А. Башкатова, И.С. Гуменюк (2020) указывают превышение ПДК для подвижных форм Ni, Zn, Cu, Pb, Cd, Mn в 7.2; 5.9; 5.1; 4.8; 3.0 и 1.3 раза соответственно в почвах Metallургического района г. Челябинска.

В пределах каждой выделенной зоны распределение интенсивности загрязнения неравномерно. Так в наиболее загрязненной зоне можно встретить ПП с относительно невысокими концентрациями тяжелых металлов в почве (ПП № 3 близ озера Акакуль – березово-сосновый лес с разнотравьем). А в относительно чистой зоне, наоборот, – ПП с повышенными концентрациями таких элементов-загрязнителей, как Zn, Pb, Mn (описанная выше ПП № 14 близ пос. Синий бор – сосняк мертвопокровный). Для установления причин этого необходимо проводить дополнительные исследования.

Анализ химического состава корки сосны, которая обычно выступает хорошим фитоиндикатором атмосферного загрязнения, позволил выявить высокие средние значения Кк по всем отобраным пробам для Cu(4.1) > Pb(3.9) > Cd(2.8) > Cr(2.4) (табл. 4), однако, не достигающие аналогичных величин Кк для почв.

Корреляционный анализ (коэффициент Пирсона) содержаний химических элементов в корке сосны продемонстрировал значимые коэффициенты между теми же элементами, что и для почв: Al–Fe, Cr–Fe, Cu–Pb, Pb–Zn (табл. 5). Отличие заключается в том, что для корки выявлены корреляции между Cr–Ni, Cr–Cd, Cr–Co при том, что Ni выступает связующим звеном между двумя группами, так как имеет значимые коэффициенты корреляции

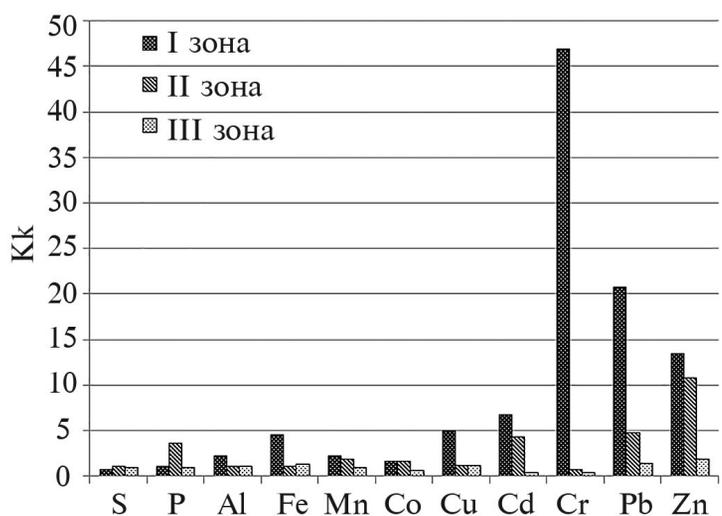


Рис. 3. Средние значения коэффициентов концентрации (Кк) подвижных форм химических элементов для почв в разных зонах экологической напряженности Челябинской области.

так же с Al, Fe, Zn и Mn. С представителями этой группы элементов коррелирует и показатель зольности корки сосны. Можно допустить, что многие из этих элементов попадают на корку деревьев с пылевидными частицами выбросов промышлен-

ных предприятий, что приводит к возрастанию показателя зольности.

Разница в содержании химических элементов в корке сосны для разных ПП позволила выделить

Таблица 4. Коэффициенты концентрации и показатели суммарного загрязнения (Zc) для корки сосны на ПП исследованной территории

№ПП	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Ni	Zc
1	1.5	4.7	1.2	2.48	17.7	1.2	0.9	7.5	1.1	1.7	31.1
2	2.8	0.2	н/о	0.09	4.4	1.3	1.4	4.2	1.3	1.5	10.8
3	0.8	0.1	н/о	0.05	5.2	0.8	0.7	5.7	1.3	1.1	10.3
4	0.6	0.2	н/о	0.04	6.1	0.7	0.7	6.4	2.5	1.3	13.3
5	0.8	7.4	2.5	2.24	5.3	0.9	0.8	4.6	2.8	1.5	20.4
6	0.9	7.5	2.6	2.97	8.2	1.2	0.5	9.9	2.8	1.6	29.8
7	0.5	0.2	н/о	0.07	3.6	0.6	0.4	2.5	1.8	1.3	6.2
8	0.7	1.7	0.6	1.53	1.8	0.6	0.5	2.0	1.0	0.8	4.2
9	0.8	0.4	н/о	0.07	18.9	1.3	1.2	15.3	4.4	1.6	37.7
10	0.9	3.0	1.2	2.73	12.9	1.5	0.6	11.4	1.6	1.2	28.5
11	1.1	5.2	2.9	3.66	3.4	1.2	0.6	4.1	1.5	1.5	16.6
12	0.9	3.8	2.1	2.11	2.3	0.6	0.9	2.3	0.7	1.5	8.9
13	0.7	5.0	1.9	1.68	3.6	0.5	0.8	3.5	1.0	1.3	11.9
14	1.5	4.6	3.4	3.95	1.9	1.2	1.6	1.6	1.3	1.9	13.9
15	1.7	1.8	2.5	3.95	1.0	1.6	1.1	1.3	0.9	2.2	9.2
16	1.2	4.8	3.2	3.47	2.2	1.4	1.1	2.3	1.7	1.2	13.6
17	1.3	2.2	2.0	3.00	1.8	1.5	0.9	1.8	1.4	1.0	7.9
18	1.1	0.1	н/о	0.07	1.4	1.2	0.9	0.6	1.0	1.5	2.3
19	1.1	0.1	н/о	0.07	0.6	0.9	1.5	0.8	0.9	1.0	1.7
20	1.5	4.2	3.6	3.37	2.0	1.8	0.7	1.8	1.0	1.9	12.9
21	1.3	1.7	2.3	2.65	1.2	1.3	0.9	1.4	1.4	1.2	6.4
22	1.0	0.1	0.0	0.40	1.7	1.2	0.8	2.0	1.8	1.3	3.9
23	1.1	6.5	2.6	7.75	2.0	1.1	1.0	3.0	2.3	1.9	20.3
24	1.5	0.3	н/о	0.67	2.7	1.7	1.4	5.3	2.9	1.9	11.3
25	1.4	1.8	1.5	2.61	1.3	1.1	1.2	1.5	1.2	1.1	5.7
26	1.9	0.5	н/о	0.58	3.3	2.2	2.1	5.1	4.9	2.2	15.7
27	1.4	8.7	2.0	12.54	2.6	1.9	1.5	4.5	5.3	1.9	33.3
28	1.7	0.1	н/о	0.16	1.8	1.3	1.3	1.9	1.5	1.0	4.5
29	1.7	5.6	3.4	5.75	2.9	1.6	0.8	3.2	2.0	1.7	20.0
30	1.0	1.4	1.2	2.03	0.9	1.0	0.7	1.2	1.0	0.8	2.9
31	0.7	2.4	0.8	1.83	1.1	0.8	0.9	1.4	1.1	0.6	3.8
среднее	1.2	2.8	2.0	2.4	4.1	1.2	1.0	3.9	1.9	1.4	13.5

Таблица 5. Коэффициенты корреляции Пирсона между содержаниями химических элементов в образцах корки сосны и их показателями зольности

Химические элементы	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Al	1									
Cd	-0.05	1.00								
Co	0.21	0.72	1.00							
Cr	0.15	0.78	0.65	1.00						
Cu	-0.14	0.08	-0.18	-0.13	1.00					
Fe	0.67	0.10	0.19	0.36	0.02	1.00				
Mn	0.63	-0.16	-0.16	0.09	-0.14	0.56	1.00			
Ni	0.43	0.32	0.30	0.37	0.15	0.60	0.40	1.00		
Pb	-0.17	0.11	-0.19	-0.07	0.89	0.11	-0.09	0.20	1.00	
Zn	0.05	0.21	-0.13	0.32	0.30	0.48	0.40	0.46	0.53	1.00
зольность	0.65	-0.08	0.10	0.31	-0.21	0.87	0.66	0.45	-0.15	0.32

Примечания. Полужирным шрифтом отмечены значения (г), которые выше табличных критических значений коэффициента корреляции Пирсона для 5%-ного уровня значимости.

на изучаемой территории зоны экологической напряженности. Если рассматривать зонирование по загрязнению почвенного покрова, то средние значения Z_c по корке сосны, вычисленные по этим зонам, хоть и отличаются, но не очень показательны: для I зоны $Z_c = 15.8$, для II зоны $Z_c = 12.0$, для III зоны $Z_c = 4.8$. Немного сместив границы зон и перераспределив ПП, входящие в зоны, удалось получить несколько иную картину (рис. 4, табл. 6).

Так, первая зона имеет среднее значение $Z_c = 20.3$ с тремя преобладающими элементами-загрязнителями, Кк которых составляет ряд – $Cu(8.5) > Pb(7.1) > Cd(3.2)$, а Cr и Zn, имеющие высокие показатели Кк для почв в первой зоне, для корки сосны не имели таковых. Вторая зона с $Z_c = 13.6$ характеризуется высокими показателями Кк у $Pb(3.4) > Cr(3.3) > Cd(3.2) > Cu(2.6) > Zn(2.5)$, что имеет большое сходство с загрязнением почв. Третья зона имеет немного меньшее значение $Z_c = 9.9$, а элементами-загрязнителями с высокими значениями Кк выступа-

ют $Cr(3.3) > Cd(3.0) > Co(2.6)$. Кроме того, четыре ПП, расположенные на юге исследованной территории, позволили выделить фоновый участок, так как практически по всем химическим элементам Кк оказались низкими. Таким образом, для корки сосны так же, как и для почв, наблюдается полиэлементное загрязнение. Для первой зоны общими элементами-загрязнителями выступают Pb и Cd, для второй Pb, Cd, Zn.

Анализ хвои сосны не показал результатов, ярко отражающих картину загрязнения окружающей среды (табл. 7).

Для первой экологической зоны суммарный показатель загрязнения хвои составил $Z_c = 4.4$ за счет Кк для $Ni(2.1) = Al(2.1) > Mn(1.5) > Zn(1.4)$; во второй зоне $Z_c = 3.0$ за счет тех же элементов, Кк которых варьирует в пределах Ni (0.9–3.2), Al (0,5–2.9), Zn (0.9–3.2); третья зона оказалось практически не загрязненной. Таким образом, хвою не рекомен-

Таблица 6. Средние значения коэффициентов концентрации и показателей суммарного загрязнения (Z_c) для корки сосны в разных зонах экологической напряженности Челябинской области

Зона	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Z_c
1 зона	1.1	3.2	1.1	1.5	8.5	1.0	0.8	1.4	7.1	2.0	20.3
2 зона	1.3	2.9	1.2	3.3	2.6	1.4	1.0	1.6	3.4	2.5	13.6
3 зона	1.4	3.0	2.6	3.3	1.6	1.4	1.1	1.5	1.7	1.3	9.9
4 зона	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.7

Примечания. Полужирным шрифтом выделены значения Кк выше 1.5.

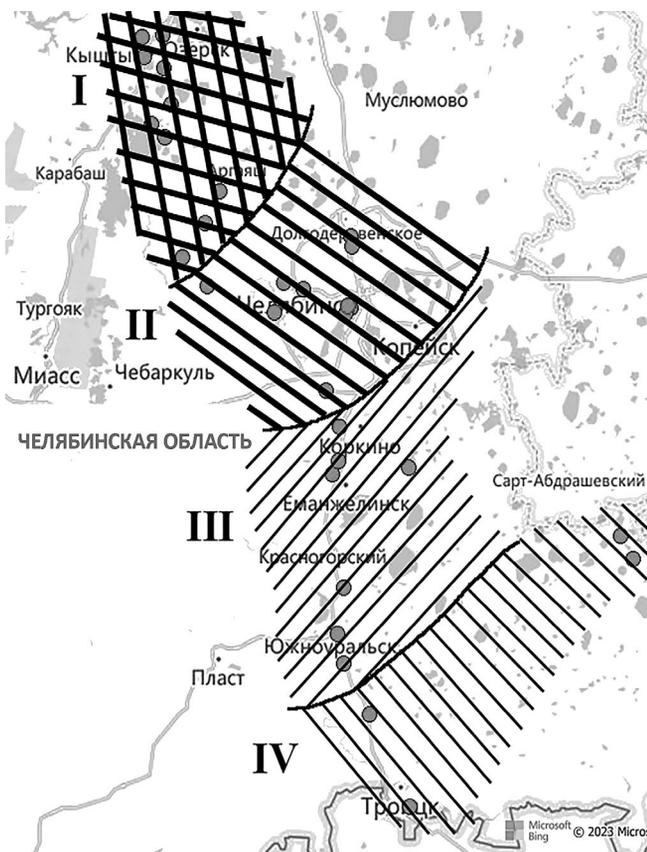


Рис. 4. Подразделение исследованной территории Челябинской области на экологические зоны по показателям суммарного загрязнения корки сосны. I зона ($Z_c = 20.3$), II зона ($Z_c = 13.6$), III зона ($Z_c = 9.9$), IV зона ($Z_c = 2.7$).

дугается использовать в качестве фитоиндикатора загрязнения окружающей среды химическими элементами.

На данный момент не существует законодательно утвержденных значений, характеризующих уровень опасности загрязнения растений, поэтому мы останавливаемся лишь на количественных показателях. Существуют средние значения содержания и шкалы допустимых для растений кон-

центраций химических элементов (Алексеев, 1987; Кабата-Пендиас, 1989; Markert, 1991), однако мы не сочли нужным использовать их, так как Уральский регион характеризуется весьма пестрой геохимической обстановкой, определяющей формирование естественных геохимических аномалий, где избыточные концентрации ряда химических элементов наблюдаются во всех компонентах биогеоценозов (Байтимилова, Медведев, 2010; Ложкин, 2014; Маричев, 2021).

Так как количество проб для каждой зоны было не велико, то удалось провести статистический анализ только для всех данных сразу. Значимые коэффициенты корреляции Пирсона на 5% уровне значимости между Кк для корки сосны и почв были получены для Pb (0.79), Cu (0.78), Al (0.77), Zn (0.75), Zc (0.54), что демонстрирует биогеохимические взаимосвязи компонентов биогеоценозов и отражает влияние промышленных предприятий на них. Для Mn коэффициент корреляции между почвами и коркой имел отрицательное значение (-0.40), так как Кк почв для Mn демонстрировал точки с повышенными относительно фона концентрациями данного элемента до 5 единиц, а для корки сосны не обнаружено точек с аномально высокими значениями Кк по Mn. Несмотря на то, что это биофильный элемент, в корке он не играет существенной роли, поэтому не накапливается. Хвоя же содержит в 2–6 раз больше Mn, чем корка, и значимый коэффициент корреляции показателей Кк его в почвах и хвое составляет 0.39. Так же значимые показатели корреляционной связи между Кк почвы и хвои отмечено для Al (0.42), Zn (0.59), Zc (0.67), что подтверждает влияние увеличения подвижных форм химических элементов в почве на вовлечение их в биологический круговорот.

Кбн корки сосны (рис. 5) позволяет оценить интенсивность вовлечения химических элементов в биологический круговорот.

Так, для разных экологических зон мы видим следующие закономерности: по большинству исследованных элементов наблюдается увеличение показателя Кбн от сильно загрязненных террито-

Таблица 7. Средние значения коэффициентов концентрации и показателей суммарного загрязнения (Z_c) для хвои сосны в разных зонах экологической напряженности Челябинской области

Зона	Al	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Zc
1 зона	2.1	1.0	0.5	1.5	2.1	1.4	4.4
2 зона	1.4	0.9	0.9	1.2	1.4	1.7	3.0
3 зона	1.0	0.8	1.0	1.0	1.3	1.0	1.8
4 зона	0.9	1.0	0.8	1.0	0.7	1.0	1.2

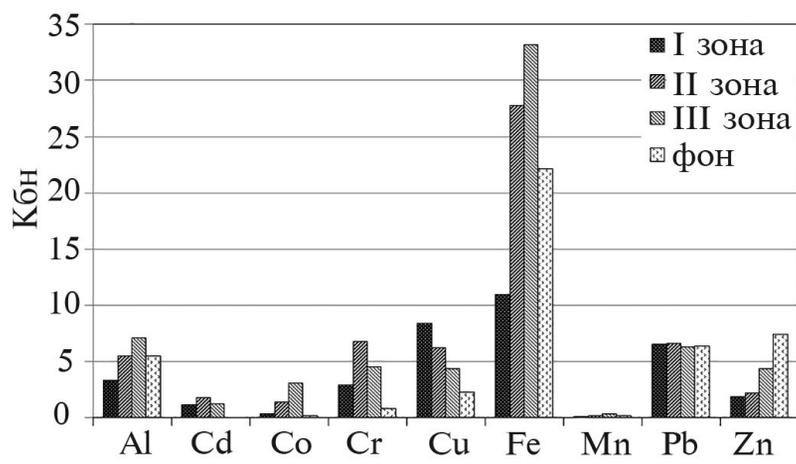


Рис. 5. Коэффициенты биологического накопления для корки сосны в разных экологических зонах.

рий к менее загрязненным; для Pb наблюдается отсутствие всякой тенденции – во всех зонах Кбн остается постоянным, что говорит о линейной зависимости между содержанием этого элемента в корке сосны и в почве. Для Cu и, частично, для Cr – другая картина: по мере продвижения в сторону условно чистых местообитаний Кбн уменьшается. Этот факт можно объяснить тем, что корка сосны накапливает элементы, которые поступают с выбросами предприятий, непосредственно из атмосферного воздуха, а та их часть, которая попадает в почву, пополняет ее валовое содержание, но в состав подвижных форм не входит, поэтому величина Кбн будет выше на загрязненном участке. Данное предположение подтверждается работой Ю.Н. Тация с соавторами (2015), где показано, что содержания основных элементов, присутствующих в пылевидных выбросах Карабашского медеплавильного комбината (As, Cd, Cu, Pb, Zn), многократно превышают локальный уровень фоновых содержаний, определенных для Карабашской геотехногенной зоны. Более того, эти содержания значительно выше максимальных концентраций в почвах Карабаша, существенно превышающих ПДК.

ВЫВОДЫ

1. Показатели кислотности почв имеют значимые отрицательные величины коэффициентов корреляции с такими элементами, как Al, Cr, Cu, Fe, Pb. Наиболее низкими значениями рН 4.27–4.96 характеризуются почвы для ПП с чрезвычайно высоким уровнем загрязнения почв.

2. На основе полученных данных проведено экологическое зонирование исследованной территории. Наиболее загрязненными оказались почвы

сосняков, приуроченные к северо-западной части лесостепной зоны Челябинской области, где сосредоточены металлургические предприятия. Средние показатели Кк для основных элементов-загрязнителей здесь являются: Cr(54.7) > Pb(20.8) > Zn(13.5) > Cd(7.9) > Cu(5.0) > Fe(4.6), а Zc = 96.5. Превышения ПДК составили: по Pb в 4.7 раза, по Cu в 4.7 раза, по Zn в 2.7 раза, по Mn в 2.3 раза, по Cr в 2.3 раза. Вторая экологическая зона с Zc = 23.5, включающая Челябинск и прилегающие территории, также характеризуется повышенными, по сравнению с фоновыми показателями, концентрациями химических элементов, но уже меньшей степени: Zn(11.4) > Pb(5.2) > Cd(4.6) > Co(2.5) > Mn(2.1) > Cu(1.3). Превышение ПДК вдвое по Zn и Mn отмечено для половины ПП в этой зоне, по Pb – превышение ПДК в 4 раза для ПП № 6. Третья зона с Zc = 3.7, расположенная на юго-восточной части лесостепи Челябинской области, условно чистая, лишь некоторые ПП имеют повышенное содержание тех или иных элементов.

3. Средние значения Кк во всех отобранных пробах корки сосны составили следующий ряд: Cu (4.1) > Pb(3.9) > Cd(2.8) > Cr(2.4). Зонирование исследованной территории по Zc корки сосны позволило выделить 4 зоны с различной степенью экологической напряженности: первая с Zc = 20.3, Кк Cu8.5 > Pb7.1 > Cd3.2; вторая с Zc = 13.6, Кк Pb(3.4) > Cr(3.3) > Cd(3.2) > Cu(2.6) > Zn(2.5); третья с Zc = 9.9, Кк Cr(3.3) > Cd(3.0) > Co(2.6); четвертая зона рассматривается как фоновая, условно чистая.

4. Значимые коэффициенты корреляции между Кк для корки сосны и почв были получены для Pb (0.79), Cu (0.78), Al (0.77), Zn (0.75), Zc (0.54). Для Mn коэффициент корреляции между почвами и коркой имел отрицательное значение (–0.40); Кк по Mn

для почв имеют повышенные значения до 5 единиц для некоторых ПП, а для корки сосны не обнаружено точек с аномально высокими значениями Кк по Мп. Несмотря на то, что содержание химических элементов в почве хорошо коррелирует с аналогичными показателями для корки сосны, существуют и определенные различия. Это связано, вероятно, с тем, что в почве определялись подвижные формы элементов, а корка анализировалась на общее содержание элементов. Принимая во внимание возможное осаждение пылевидных частиц на корке и влияние этого процесса на результат анализа, Кбн корки сосны для Си и Сг уменьшается по направлению с севера на юг, по мере снижения загрязнения воздуха промышленной пылью, в то время как для других элементов (кроме Pb) Кбн возрастает в этом направлении. Корка сосны позволяет выявить не столь контрастные, как для почв, но довольно наглядные картины распределения загрязнения.

5. Хвоя сосны не показала высокую индикаторную способность при оценке степени загрязнения сред, так как слабо накапливает загрязнители, но концентрации химических элементов в ней хорошо коррелирует с их содержанием в почве, что позволяет использовать ее при изучении миграционных способностей ряда элементов-загрязнителей.

6. На исследованной территории выявлены отдельные участки, выделяющиеся высокими или низкими концентрациями ряда химических элементов и резко отличающиеся от окружающих участков. Для объяснения этого явления требуются дополнительные исследования.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам и научному редактору Костицыну Юрию Александровичу за существенную помощь в работе над статьей.

Исследования были проведены в Ресурсном Центре СПбГУ “Методы анализа состава веществ” (номер проекта 108-25495).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Ю. В. (1987) Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 260.
- Атлас Челябинской области (1976). М.: ГУГК, 27 с.
- Буйный Л. В., Зиновьева Е. Г. (2021) Экологическое загрязнение промышленных регионов российской федерации на примере Челябинской области. *Сборник докладов XV Международной конференции. Том 2*. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 260–266.
- Гертман А. М., Самсонова Т. С., Максимович Д. М. (2021) Патоморфологические изменения в органах крупного рогатого скота, содержащегося в условиях техногенной провинции. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2(167), 73–79.
- Головина Т. А. (2013) Влияние техногенного загрязнения на микобиоту почвы соснового леса. *Вестник Челябинского государственного университета*. 7(298), 160–161.
- Горчаковский П. Л. (1968) Растительность. *Урал и Приуралье*. М., 211–261.
- ГОСТ 17.4.4.02–84 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
- Грачева И. В., Маркова Л. М. (2012) Экологическая оценка состояния и функционирования культурных ландшафтов. *Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена*. 153–2, 113–117.
- Гуменюк О. А., Башкатов М. А., Гуменюк И. С. (2022) Влияние техногенных загрязнений на состояние почвенного покрова г. Челябинска. *Безопасный и комфортный город. Сборник научных трудов по материалам IV международной научно-практической конференции*. Челябинск, 439–442.
- Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2020 году. Министерство экологии Челябинской области. 2021. 434 с.
- Доклад Челябинского областного комитета по экологии и природопользованию от 15.03.1994 “Комплексный доклад о состоянии окружающей природной среды Челябинской области в 1993 году” <https://zakon-region.ru/1/147138/> (дата обращения 22.05.2023)
- Ершова Маргарита (2014) Белит от ЧЭМК против раскисления почв // 74.ru. Челябинск онлайн 7 февраля 2014.
- URL: <https://74.ru/text/business/2014/02/07/59498171/> (дата обращения 16.05.2023)
- Зайцев В. А. (2022) Geochemical functions – надстройка для обработки минералого-геохимических данных в Microsoft Excel. *Вестник Московского государственного университета, Сер 4. Геология*. (3), 54–60.
- Зыбалов В. С., Юдина Е. П. (2016) Влияние ТМ на плодородие почв Челябинской области. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Химия”*. 8(3), 13–18.
- Ильин В. Б., Сысо А. И. (2001) Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 229 с.
- Ищенко А. И. (2021) Оценка экологического состояния Каштакского бора на основе комплексного физико-географического описания с применением данных дистанционного зондирования. *Степи Северной Евразии: материалы IX международного симпозиума*. 9, 341–343.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. (1989) Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 240 с.
- Колесников Б. П. (1961) Очерк растительности Челябинской области в связи с ее геоботаническим районированием. *Тр. Ильменск. гос. заповед. им. В. И. Ленина*. 8, 105–129.
- Колесников Б. П. (1964) Растительность Челябинской области. *Природа Челябинской области. Справочник*. Челябинск, 135–158.
- Куликов П. В. (2005) Конспект флоры Челябинской области (сосудистые растения). Екатеринбург; Миасс: Геотур, 537 с.
- Куликов П. В. (2006) Ботанико-географические районы и флористические границы в лесостепном и степном Заура-

- лье. *Степи и лесостепи Зауралья: материалы к исследованиям: тр. музея-заповедника "Аркаим"*. Челябинск: Крокос, 6–22.
- Левит А. И. (2005) Южный Урал: География, экология, природопользование. Челябинск, 246 с.
- Ложкин И. В. (2014) Геоэкологическая оценка почвенного покрова урбанизированных территорий Оренбуржья. *Оренбургская область: география, экономика, экология. Сборник научных статей*. Оренбург, 56–74.
- Макарова Т. Н., Чернышова Л. В., Макарова А. О. (2022) Загрязнение почвы тяжелыми металлами в агроценозах. *Проблемы и перспективы устойчивого развития агропромышленного комплекса. Мат-лы Всеросс. науч.-практ. конф. п. Молодежный: изд-во Иркутский гос. аграрный ун-т им. А. А. Ежовского*, 144–151.
- Манторова Г. Ф., Зайкова Л. А. (2015) Техногенное загрязнение почв Челябинской области и их мониторинг. *Евразийский Союз Ученых*. 4–11 (13), 76–79.
- Маричев М. С. (2021) Оценка техногенной трансформации почв в районе воздействия горно-металлургического комбината (на примере Красноуральского промузла). Диссертация к. б. н. Уфа. 208 с.
- Михеева Е. В., Байтиминова Е. А., Медведев О. А. (2010) Воздействие природного геохимического фактора на здоровье населения Среднего Урала. *Экология человека*. 1, 14–18.
- Мотузова Г. В., Карпова Е. А. (2013) Химическое загрязнение биосферы. М.: Изд-во МГУ, 304 с.
- Наумова Н. Л. (2021) Химический состав плодов облепихи (*Hipporhae rhamnoides* L.), выращиваемой в Челябинской области. *Вестник Московского Государственного Технического Университета*. 24 (3), 306–312.
- Национальный Атлас почв Российской Федерации. (2011) Главный редактор чл.-корр. РАН С. А. Шоба. М.: Астрель: АСТ, 632 с.
- Опекунова М. Г., Арестова И. Ю., Елсукова Е. Ю., Шейнерман Н. А. (2015) Методы физико-химического анализа почв и растений. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 84 с.
- Опекунов А. Ю., Опекунова М. Г. (2013) Геохимия техногенеза в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения. *Записки Горного института*. 203. 196–203.
- Первакова А. А. (2012) Эктомикориза сосны: сравнение уровня развития в сообществах с различной степенью техногенного загрязнения на территории Челябинской области. *Ломоносов – 2012: тез. докл. междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. М.: МАКС Пресс, 152–153.
- СанПиН 2.1.7.1287–03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы и грунтов.
- Семенов А. И., Кокшаров А. В., Погодин Ю. И. (2015) Содержание тяжелых металлов в почве г. Челябинска. *Медицина труда и экология человека*. 3, 184–191.
- Степи и лесостепи Зауралья: материалы к исследованиям: тр. музея-заповедника "Аркаим" (2006) (Под ред. Петрова Ф. Н.). Челябинск: Крокос, 190 с.
- Таций Ю. Г., Федотов П. С., Ермолин М. С., Иванеев А. И., Карандашев В. К. (2015) Оценка состава и свойств пыли в зоне воздействия Карабашского медеплавильного комбината. *Биохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии. Труды IX Международной биогеохимической школы*. 2. 170–174.
- Терехина Н. В. (2010) Методические указания к проведению фитогеохимических исследований. Учебно-методическое пособие. СПб, 26 с.
- Улитина Е. А. (2020) Анализ экологической ситуации в Троицком районе Челябинской области. *Modern science*. 6–3, 28–30.
- Фаткуллин Р. Р., Гизатулина Ю. А. (2017) Оценка загрязненности трофической цепи "Почва-растение-тело пчелы-продукция пчеловодства" тяжелыми металлами в условиях лесостепной зоны Южного Урала. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 3 (65), 251–253.
- Фрейберг И. А. (1968) О типах лесных культур для лесостепного Зауралья. *Леса Урала и хозяйство в них*. Вып. 1. Свердловск. М. 397–402.
- Шабанов М. В., Стрекулев Г. Б. (2021) Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах южного Урала. *Известия Томского политехнического университета*. 1, 184–192.
- Markert B. (1991) Establishing of "Reference plant". Osnabruck, F.R.G., 533–538.

VARIABILITY OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF PINE FORESTS COMPONENTS IN THE FOREST-STEPPE OF THE CHELYABINSK REGION UNDER THE INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC LOAD

N. V. Terekhina*, A. D. Glinskikh**

St.-Petersburg University, Institute of Earth Sciences,
Vasilevskiy Island, 10th line, 33-35, St-Petersburg, 199178 Russia

*e-mail: n.terekhina@spbu.ru

**e-mail: ana.glin@yandex.ru

Received: March 1, 2023

Revised: August 1, 2023

Accepted: August 29, 2023

The work provides a comprehensive assessment of changes in the intensity of pollution of soils and plants of pine forests with distance from the main sources of pollution. Within the forest-steppe zone of the Chelyabinsk region,

zones of environmental tension have been identified based on the summary index of soil contamination with mobile forms of chemical elements and on the level of pine bark contamination. The main polluting elements were Cr, Pb, Zn, Cd, the content of which in soils was tens of times higher than the background values. The same pollutants and Cu were noted for pine bark, but their concentrations were significantly lower and exceeded the background only several times. High values of correlation coefficients between pollution indicators for soils and bark were noted for Pb, Cu, Zn and the total pollution indicator. The content of most of the studied chemical elements in pine needles does not exceed background values, but the content of Al and Ni in some plots near industrial enterprises can be 2-4 times higher than background values.

Keywords: soil, pine bark, heavy metals, ecological zoning of forest-steppe, Chelyabinsk region