

УДК 551.4 (571.5)

Содержание тяжелых металлов и микробиологическая характеристика почв в импактной зоне Красноярского алюминиевого завода

Пономарева Т. В.^{1,2}, Богородская А. В.¹

¹ Институт леса имени В. Н. Сукачева СО РАН
Россия, Красноярск
anbog@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет
Россия, Красноярск
bashkova_r@mail.ru

Исследованы антропогенно-преобразованные почвы (агрочернозёмы (*Anthrosols*), абразёмы и урбанозёмы (*Technosols*) на территории, примыкающей к Красноярскому алюминиевому заводу, в пределах санитарно-защитной зоны. По результатам детального анализа валового содержания элементов с шагом в 1 см по глубине выявлен характер распределения содержания алюминия и тяжелых металлов (ТМ) в верхнем 0–20 см слое почв, который сравнивался с кларками элементов и содержанием их в фоновых почвах. Установлено, что максимальное превышение концентрации тяжелых металлов в почвах по отношению к кларку в ближней зоне воздействия предприятия на расстоянии 0,3 км составляло для меди в 16 раз, для кадмия – в 8 раз, для никеля – в 2,5 раза, для алюминия – в 1,6 раза. Обследованные почвы содержали количество алюминия, меди, никеля и др. элементов в верхних горизонтах превышающее фоновые значения более чем в 3 раза, поэтому данные почвы можно относить к химически-преобразованным почвам. В профиле абразёма на расстоянии 0,3 км от предприятия в верхнем 0–5 см слое отмечалось минимальное содержание углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}=150\text{--}240 \text{ мкг С г}^{-1}$), повышенная интенсивность базального дыхания ($\text{БД}=1,25\text{--}2,92 \text{ мкг С-CO}_2 \times (\text{г} \times \text{ч})^{-1}$), а также значительные структурно-функциональные перестройки в гетеротрофном комплексе микробиоценоза. Высокие значения валового содержания ТМ и алюминия ближайшей зоны воздействия до 1,5 км оказывают достоверное влияние на содержание $C_{\text{мик}}$ и увеличивают интенсивность БД в профиле абразёма и урбанозёма, что свидетельствует о стрессе микробного сообщества.

Ключевые слова: антропогенно-преобразованные почвы, *Anthrosols*, *Technosols*, алюминий, тяжелые металлы, микробиоценоз.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов деградации почв, оценка их экологического состояния и нормирование техногенной нагрузки вблизи промышленных предприятий – актуальная проблема современности (Воробейчик и др., 1994; Богородская и др., 2012; Ильин, 2012; Алексеенко, Алексеенко, 2014). Аэротехногенное загрязнение Красноярска и прилегающих территорий происходит преимущественно от выбросов промышленных предприятий, объектов энергетики и автотранспорта. Одним из основных источников выбросов является предприятие АО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод» (КрАЗ).

Алюминиевые заводы входят в группу промышленных предприятий, в составе выбросов которых содержатся специфические примеси с токсичными свойствами: фтористые соединения, диоксид серы, полициклические ароматические углеводороды, техногенная пыль, обогащенная алюминием, кремнием и другими элементами, включая тяжелые металлы (ТМ) (Евдокимова, Зенкова, 2003; Давыдова, 2016). В выбросах КрАЗа преобладающими специфическими элементами являются фтор и алюминий, кроме того в составе твердых составляющих выбросов часто упоминается медь, никель, цинк, кадмий, кобальт, свинец (Ташлыкова, 2008). В почвах, находящихся в зоне воздействия алюминиевых заводов, в том числе и КрАЗа содержится повышенное содержание ТМ (Евдокимова, Зенкова, 2003; Евдокимова и др., 2013; Демиденко и др., 2016). ТМ поступают на поверхность почвы как в труднорастворимых, так и в виде аэрозолей в хорошо растворимых формах. Алюминий,

основной компонент твердого вещества выбросов алюминиевого завода, поступает в почвы в основном в малоподвижной форме в виде оксидов (Давыдова, 2016). Уровень содержания алюминия и ТМ в почвах зависит от окислительно-восстановительных и кислотно-основных свойств последних, гидротермического режима, содержания гумуса, гранулометрического состава (Ильин, 2012). Высокие концентрации фтористого водорода в выбросах алюминиевого завода могут косвенно влиять на увеличение подвижных форм металлов в почве за счет изменения рН, в процессе чего увеличивается подвижность алюминия и ТМ (Васильева, Кадацкий, 1998). Вместе с тем, подвижность металлов в почве, поступление их в растения очень изменчивы и зависят от многих факторов: вида растений, почвенных и климатических условий (Соколова и др., 2004; Водяницкий, 2011).

Для характеристики общей загрязненности почвы целесообразно контролировать валовое количество металлов (Ильин, 2012), поскольку при разработке предельно допустимых концентраций (ПДК) ТМ и неметаллов в почвах наибольшее распространение получил уровень содержания их валовых форм (Водяницкий, 2011, 2013; Ильин, 2012). Кроме того, валовое содержание металлов отражает потенциальный уровень загрязнения.

Ранее в зоне воздействия КрАЗа проводились исследования в основном сельскохозяйственных земель (Ташлыкова, 2008; Демиденко и др., 2016). Изучалось содержание ТМ в почвах и растительности (Демиденко, Васильева, 2016; Скрипальщикова и др., 2016). Подробно рассматривались проблемы загрязнения почв фтором, как одним из основных загрязняющих веществ при производстве алюминия (Кремленкова и др., 1991). Актуальность исследований почвенного покрова в ближней зоне воздействия КрАЗа, совпадающей с санитарно-защитной зоной данного предприятия (до 3 км), обусловлена необходимостью мониторинга содержания ТМ в компонентах экосистемы для определения региональных экологических стандартов с учетом природной и техногенной специфики региона, а также объективной оценки состояния нарушенных почв индустриальной зоны, поскольку в литературе разрозненны сведения о классификационной принадлежности техногенных почв, их морфологических и физико-химических особенностях, распределении ТМ, а также структурно-функциональных откликах почвенных микробиоценозов (Воробейчик и др., 1994; Никитина, Голодяев, 2003; Евдокимова и др., 2013, Терехова и др., 2021).

Цель исследований – изучить морфологические и физико-химические особенности техногенных почв в ближней зоне воздействия Красноярского алюминиевого завода распределения тяжелых металлов, а также микробиологического состояния почвенных микробиоценозов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Красноярский алюминиевый завод расположен в черте городской застройки на левом берегу реки Енисей на участке лесостепи, ранее представляющем собой сочетание луговых степей и мелколиственных лесов. Почвенный покров был представлен сочетаниями черноземов, серых и дерново-подзолистых почв (Крупкин, Косицина, 2006). В настоящее время на прилегающих к заводу площадях естественный растительный и почвенный покров не сохранился из-за глубокой трансформации естественных ландшафтов в техногенные в ходе строительной и последующей хозяйственной деятельности. В результате сформировались синантропные растительные комплексы, в которых большую роль играют синантропные древесные и кустарниковые сообщества и травянистая рудеральная растительность.

На данный момент общая площадь санитарно-защитной зоны предприятия составляет более 3,7 тыс. га (<http://www.mpr.krskstate.ru/presscentr/0/news/88037>).

Исследования эколого-функционального состояния почв проводились в 2017–2018 годы в ближней зоне воздействия КрАЗа (до 3 км). Были заложены три пробные площадки (ПП), разной удаленности от источника воздействия (табл. 1). В качестве объектов исследований выбраны наиболее представленные на исследуемой территории почвы. Идентификация почв нарушенных территорий осложняется комплексом факторов, воздействующих на почвообразовательный процесс. Вследствие этого, почвы диагностированы по

классификации 2004 года (Шишов и др., 2004) как агрочернозёмы (по WRB *Anthrosols*), абразёмы (по WRB *Technosols*), и по классификации городских почв (Строганова и др., 1997) как урбанозёмы (по WRB *Technosols*). Основная масса элементов загрязнителей сосредотачивается в верхней части профиля (Ильин, 2012), поэтому распределение алюминия и ТМ оценивалось в слое 20 см. Для определения фонового содержания тяжелых металлов были отобраны образцы почв на прилегающей к экспериментальным участкам территории, удаленной от КраЗа на расстояние 25 км, расположенной в зоне Красноярской лесостепи. Почвы фонового участка представлены агросерыми постагрогенными (по WRB *Anthrosols*).

Учитывая сложность структурной организации профилей антропогенно-преобразованных почв и большую вариабельность морфологических характеристик обследуемых почв в импактной зоне КраЗа, отбор почвенных образцов проводился послойно с большой дискретностью по глубине (каждый 1 см) в трехкратной повторности во второй половине августа.

Определение валового содержания элементов проведено в лаборатории минералогии техногенеза и геоэкологии Института минералогии УрО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП–МС) (ФР.1.29.2006.02149) на приборе Agilent 7700 после стандартной пробоподготовки в системе микроволнового вскрытия (SpeedWave) с использованием навесок почв 50 мг и смеси кислот HF+HCl+HNO₃. Для метрологического контроля качества анализа использовались международные стандарты почв NIST SRM 2710a (Soil) и SRM 2711a (Montana soil). Актуальную кислотность определяли потенциометрически из водной суспензии, приготовленной в соотношении почва:раствор 1:2,5 в минеральных и 1:25 в органогенных горизонтах (Соколова и др., 2007), плотность сложения почвы (объёмный вес) – буровым методом (Качинский, 1965).

При изучении таких относительно небольших геохимических систем биосферы, как отдельные (в первую очередь – техногенные) геохимические ландшафты и их определенные компоненты практически всегда возникает необходимость сравнения геохимических особенностей данных систем с соседними и с особенностями характерными для всей биосферы. В связи с этим оценку состояния почв проводили на основании сравнения содержания алюминия и ТМ в почвах с их кларками – средним содержанием отдельных элементов в земной коре (Виноградов, 1962), а также с содержанием элементов в почвах фоновых участков.

Структуру и численность основных функциональных групп микроорганизмов в техногенных почвах и на фоновом участке изучали методом посева почвенной суспензии на диагностические среды (Методы..., 1991). Определяли содержание микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) методом субстрат-индуцированного дыхания и интенсивность базального дыхания (БД) хроматографически (Anderson, Domsh, 1978; Ананьева, 2003). Подробное описание методик и рабочие параметры хроматографа приведены ранее (Богородская и др., 2012). Выявляли корреляционную зависимость между микробиологическими, физическими, физико-химическими показателями почв, а также с содержанием ТМ при доверительной вероятности 95 %. Достоверность различий микробиологических показателей разных категорий участков проверялась по критерию Стьюдента ($P=0,05$). При обработке данных и построении графиков зависимостей использовали статистический пакет программы Microsoft Excel 2007.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология почв импактной зоны КраЗа. Почвенный покров на исследуемой территории представлен антропогенно-преобразованными почвами и техногенными почвенными образованиями; почвы с ненарушенным строением профиля занимали очень незначительную часть территории. На примыкающих с северо-восточной стороны к территории предприятия участках земель (ПП 5) (на удалении ~0,3 км от источника выбросов), где при строительстве проводилось снятие верхнего слоя почвы, на минеральном субстрате формировались абразёмы глинисто-иллювиальные (ВІ – С). Далее по мере

Таблица 1

Характеристика фитоценозов и почв на пробных площадях в импактной зоне Красноярского алюминиевого завода

№ ПП	Расстояние от завода, км	Характеристика пробной площади	Преобладающие виды ЖНП и проективное покрытие	Тип почвы	Морфологическая характеристика почв
5	0,3	Участок относится к зоне тяжелого поражения. Характеризуется рудеральной растительностью с большой пылевой нагрузкой	<i>Artemisia sieversiana</i> , <i>A. vulgaris</i> , <i>Cannabis sativa</i> , <i>Achillea millefolium</i> 80 %	Абразём глинисто-иллювиальный проградированный	0–1 см – сухой опад высокотравья, слаборазложившиеся растительные остатки с углями, очень рыхлый, сухой. АУх (1–6 см) – темно-серо-бурый, сухой, порошистый, суглинистый, пронизан тонкими корнями, много мелких углей. ВІ (6–45 см) – желто-бурый, сухой, плотный, глинистый, слитый, корни редко
6	1,5	Искусственные насаждения тополя с луговыми фитоценозами. На поверхности почвы встречаются многочисленные артефакты в виде строительного и бытового мусора	<i>Artemisia sieversiana</i> , <i>A. vulgaris</i> , <i>Atriplex hortensis</i> , <i>Sisymbrium loeselii</i> , <i>Cannabis sativa</i> , <i>Chamérion</i> 60–70 %.	Урбанозём	0–2 см – сухой опад листьев тополя и трав, формирующий маломощную сплошную подстилку. 2–6 см – темно-серо-бурый, сухой, порошистый, суглинистый, рыхлый, густо пронизан тонкими корнями, содержит антропогенные включения. 6–25 см – серо-бурый, неоднородно окрашен, сухой, рыхлый, глинистый, порошистый, галька, корни редко. 25–33 см – более светлый серо-бурый с желтыми пятнами, сухой, более плотный, глинистый, галька, корни редко.
7	3	Полого-холмистый рельеф, луг злаковый, периодически подвергается воздействию пирогенного фактора	<i>Bromus mollis</i> , <i>Artemisia sieversiana</i> 70 %	Агрочернозём глинисто-иллювиальный	0–7 см – темный, сухой, порошистый, рыхлый, супесчано-суглинистый. 7–25 см – темногумусовый горизонт, сухой, порошистый, суглинистый, плотный, тонкие корни реже. 25–40 см – темно-бурый, более плотный, сухой, глинистый

Примечание к таблице. ЖНП – живой напочвенный покров.

зарастания растительностью на поверхности образовался дерновый горизонт и почвы переходили в подтип реградированных абразёмов, по содержанию ряда элементов данные почвы относились к химически преобразованным (АУх(6 см) – ВІ – С). Верхние 3–4 см дернового горизонта содержали большое количество мелких углей и золы, поэтому почва имела палевый оттенок. Гранулометрический состав легкоглинистый.

На рекультивированных участках, где ранее располагался поселок «Индустриальный» (ПП 6) (на удалении 1,5 км от КрАЗа) почвы в пределах одной пробной площади в значительной степени отличались по морфологическому строению, но все разности почв

можно отнести к урбанозёмам. Почвенный профиль не имел классической системы горизонтов, а представлял хаотически устроенную систему, включающую большое количество антропогенных артефактов. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый.

На территории, используемой в сельско-хозяйственном назначении (ПП 7), почвы относились к агрочернозёмам глинисто-иллювиальным (PU(25 см) – AU – VI – C). По морфологическим признакам данные почвы имели типичное строение для агроценозов, антропогенных включений не обнаружено. Гранулометрический состав легкоглинистый.

Почвы фоновых участков агросерые, имели типичный для постагрогенных экосистем профиль (AУра (25 см) – AEL – BEL – BT – C). Гранулометрический состав тяжелосуглинистый.

Почвы на ПП 5 и ПП 6 имеют более щелочную реакцию почвенной среды относительно фоновой почвы, характеризующейся нейтральной реакцией (рис. 1).

Несмотря на значительные морфологические и некоторые физико-химические различия, почвы можно рассматривать в единой системе объектов эколого-функционального мониторинга для зоны воздействия КРАЗа. Содержание и распределение по профилю углерода, объемный вес рассматриваемых антропогенно-преобразованных почв сопоставимы с фоновыми почвами (рис. 1), минеральные горизонты имеют близкий (легкоглинистый, тяжелосуглинистый) гранулометрический состав, кроме того, почвы формировались в одних климатических условиях.

Содержание элементов металлов в почвах импактной зоны КРАЗа. Содержание определяемых элементов металлов в профиле техногенных почв, а также средние фоновые значения приведены на рисунке 2.

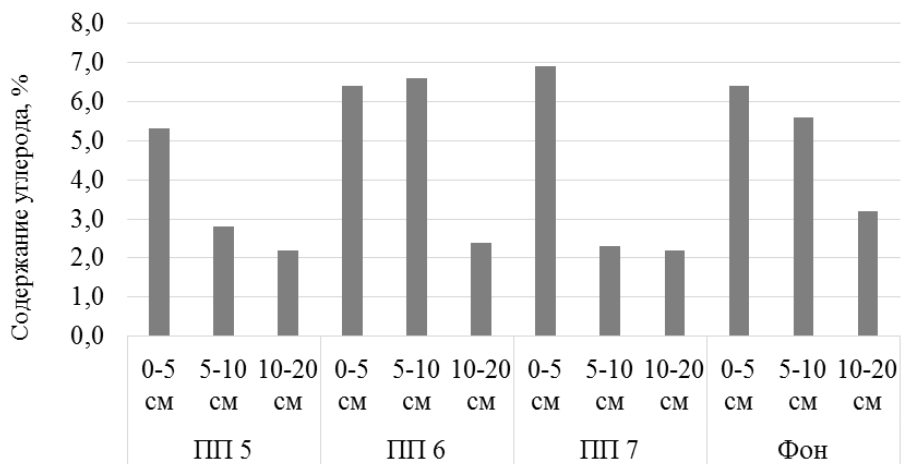
Алюминий по концентрации в земной коре занимает третье место после кислорода и кремния, составляя $80500 \text{ мг} \times \text{г}^{-1}$ (Виноградов, 1962), содержится в составе алюмосиликатов, гидратов и фосфатов, то есть в труднорастворимом состоянии. Содержание алюминия в почве не нормируется, тем не менее, отмечено негативное влияние высоких концентраций алюминия на биоту (Воробейчик и др., 1994; Самофалова, 2009). В литературе приводятся в значительной степени различающиеся значения среднего содержания алюминия в почве: $71300 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$ (Виноградов, 1962), $38200 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$ (Алексеевко, Алексеевко, 2014), $150\text{--}600 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$ (Ташлыкова, 2008).

Валовое содержание алюминия в профиле агросерой почвы фонового участка составляло $8000\text{--}12000 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$, что до 10 раз ниже кларка, но выше приведенных средних значений концентраций в почвах в 20 раз. Таким образом, целесообразно при оценке эколого-функционального состояния почв в импактной зоне КРАЗа наряду с кларком использовать именно фоновые концентрации элементов.

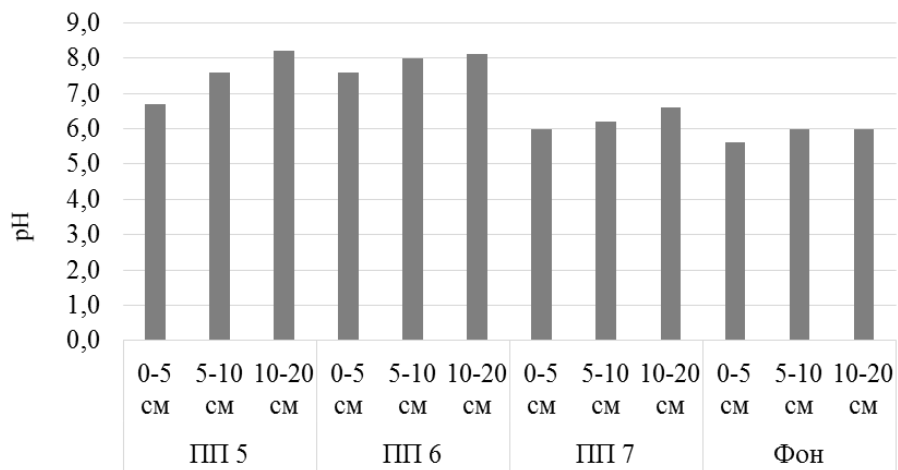
Валовое содержание алюминия в верхнем горизонте (до 5 см) абразёма на расстоянии 0,3 км от предприятия превышало уровень кларка почти в 2 раза, тогда как в верхних горизонтах техногенных почв на более удаленных ПП в пределах санитарно-защитной зоны содержание алюминия не выходило за пределы кларка. Незначительное превышение кларка наблюдалось в слое 0–2 см урбанозёма (ПП 6). В минеральных горизонтах ниже 5–7 см во всех исследованных антропогенно-преобразованных почвах превышения кларка по алюминию не наблюдалось.

Использование нормативно установленных ПДК ТМ для оценки загрязнения почв справедливо подвергалось критике (Водяницкий, 2011; Ильин, 2012) и другими. Средние значения содержания алюминия и ТМ в почвах, приведенные в литературе, значительно варьируют, поэтому в настоящее время при оценке эколого-функционального состояния почв в импактной зоне КРАЗа целесообразно проводить сравнение содержания элементов с кларком и с фоновыми концентрациями.

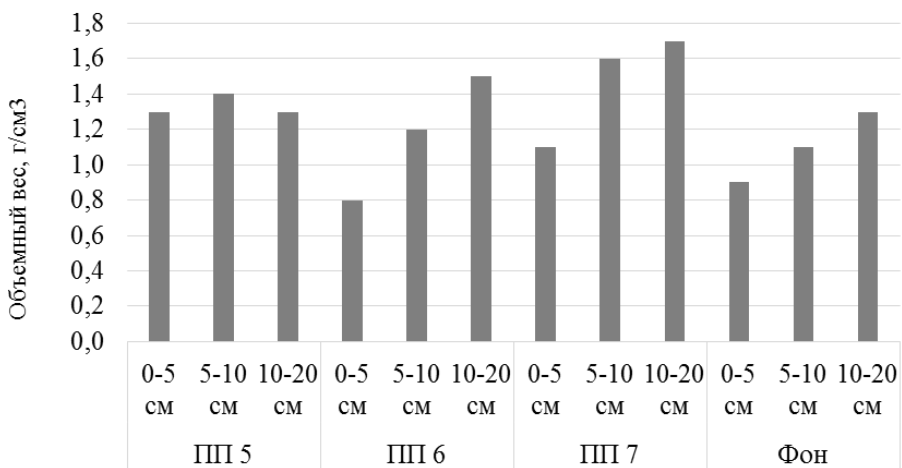
Сравнивая валовое содержание алюминия в профиле фоновой почвы с таковым в верхних слоях антропогенно-преобразованных почв, отмечено превышение его содержания в абразёме более чем в 10 раз, в верхних слоях урбанозёма и агрочернозёма – 8–9 раз. В минеральных горизонтах ниже 5–7 см во всех исследованных антропогенно-преобразованных почвах



a



б



в

Рис. 1. Содержание углерода (*a*), pH (*б*) и объемный вес (*в*) в слое 0–5 см, 5–10 см и 10–20 см техногенных почв в импактной зоне КРАЗа и в фоновой агросерой почве ПП 5 – пробная площадь 5; ПП 6 – пробная площадь 6; ПП 7 – пробная площадь 7.

валовое содержание алюминия превышало фоновое в 3–5 раз. Полученные данные позволяют говорить об обогащении почв импактной зоны алюминием по сравнению с фоновыми участками, особенно на расстоянии до 0,3 км от источника выбросов.

Повышенные концентрации алюминия в исследованных почвах могут оказывать негативное воздействие на растения, которое связано, прежде всего, с увеличением кислотности почвы и, как следствие, повышение мобильности и доступности для растений ТМ (Колесников и др., 2006). Исследованные почвы в импактной зоне КраЗа имели нейтральную (ПП 7) либо слабощелочную среду (ПП 5, ПП 6), которая изменялась по профилю в пределах 0,5 ед., что предопределяет неподвижность форм алюминия (рис. 1). Тем не менее, высокие концентрации валового алюминия обуславливают потенциальную опасность загрязнения почв. Так, в абразёмах на расстоянии 0,3 км от источника выбросов на ПП 5 в верхней органо-аккумулятивной части почвенного профиля до глубины 5–6 см, где отмечено наиболее высокое содержание алюминия, реакции почвенной среды нейтральная – слабокислая (рис. 1), что может уже влиять на подвижность алюминия в почвенном профиле.

Все исследуемые элементы, за исключением кобальта, имели техногенно-аккумулятивный характер распределения по профилю почв, аккумулируясь на глубине от 2 до 6 см (рис. 2), что подтверждает мнение о накоплении ТМ органической частью почвы (Gupta, 1992; Благодатская и др., 2008; Водяницкий, 2013). Металлы по общему содержанию в исследованных почвах образуют убывающий ряд: Al>Zn>Ni>Cu>Pb>Cd.

На основании расчета кларка концентрации (отношения концентраций элементов в почвах к их кларку) установлено значительное обогащение почв алюминием и ТМ в верхней части почвенного профиля. Так в верхнем слое почвенного профиля абразёма (до 5–7 см) на ближней к источнику выбросов пробе отмечалось максимальное превышение концентрации ТМ по отношению к кларку: меди в 16 раз, кадмия – в 8 раз, никеля – в 2,5 раза, алюминия – в 1,6 раза. По кларку концентрации элементы образуют убывающий ряд Cu>Cd>Ni>Al>Pb>Zn.

Выявлено значительное превышение содержания элементов в исследуемых почвах относительно фоновых участков (рис. 2). В органогенных горизонтах максимальное превышение алюминия в 10,9 раз, никеля – в 10,2 раза, свинца – в 9,7 раза, меди в 9,5 раз, кадмия – в 9,4 раз, цинка – в 5,7 раз. В верхних минеральных горизонтах максимальное превышение составляет для меди в 45 раз, алюминия – в 13 раз, никеля – в 5,3 раза, кадмия – в 4,4 раза, свинца – в 4,1 раза, цинка – в 1,8 раз (на ПП 6 – в 6,5 раз). В нижних минеральных горизонтах максимальное превышение содержания алюминия в 6 раз, цинка – в 5,5 раз, кадмия – в 2,5 раза, меди в 2,3 раза, свинца – в 2,3 раза, никеля – в 1,5 раза.

Все обследованные почвы в 3 км зоне, примыкающей к предприятию, содержали повышенное количество алюминия, меди, никеля и др. элементов в верхних горизонтах. Их количество превышало фоновые значения более, чем в 3 раза, поэтому данные почвы можно относить к химически-преобразованным почвам.

Структурно-функциональные особенности микробоценозов почв в импактной зоне КраЗа. Поступающие в почву алюминий и соединения ТМ, участвуют в почвообразовательном процессе, включаясь в трофические цепи, значительно сокращают активную микробную биомассу и численность разных эколого-трофических групп микроорганизмов, вызывая микробостатический эффект, ингибируют процессы минерализации и синтеза органических веществ (Brooks, 1995; Евдокимова, Зенкова, 2003; Никитина, Голодяев, 2003; Евдокимова и др., 2013).

В абразёме ближней к КраЗу ПП 5 отмечен перевернутый профиль по распределению содержания $S_{\text{мик}}$ – низкое содержание в верхнем слое почвы (150–240 мкг $C \times \Gamma^{-1}$) и увеличение на глубине 7–15 см до 600–1000 мкг $C \times \Gamma^{-1}$ (рис. 3а). Содержание $S_{\text{мик}}$ в верхней 20 см части профиля абразёма имело тесную связь с влажностью ($r=-0,77$) и pH ($r=0,86$). В профиле урбанозёма на удалении 1,5 км от источника выбросов (ПП 6) наибольшее содержание $S_{\text{мик}}$ отмечено в верхнем слое (1015 мкг $C \times \Gamma^{-1}$), при этом с глубиной снижается незначительно и имеет высокую вариабельность, что связано с неоднородностью сложения и перемешиванием

Содержание тяжелых металлов и микробиологическая характеристика почв
в импактной зоне Красноярского алюминиевого завода

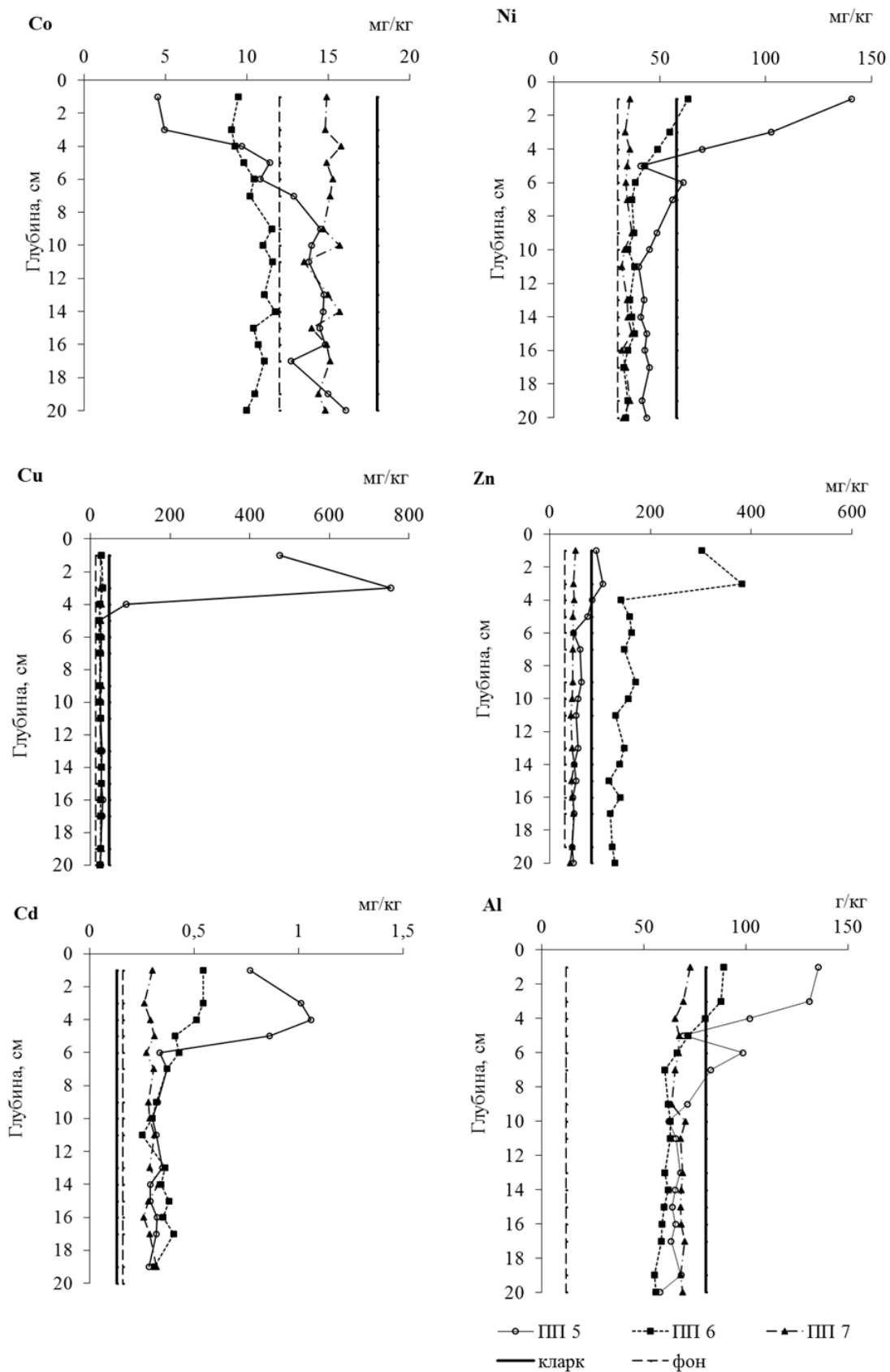


Рис. 2. Валовая концентрация элементов в почвах в импактной зоне КРАЗа

грунта с антропогенными артефактами. Распределение $C_{\text{мик}}$ в верхней 20 см части профиля отрицательно коррелировало с рН ($r=-0,57$) и не имело достоверной связи с другими физическими свойствами почвы. В агрочернозёме луга злакового наиболее удаленной ПП 7 максимальное содержание $C_{\text{мик}}$ в верхнем слое (1560–850 мкг $C \times g^{-1}$) и плавное снижение по профилю, что характерно для почв естественных ценозов (рис. 3а). Значимые связи $C_{\text{мик}}$ с влажностью ($r=0,88$), плотностью сложения ($r=-0,86$) и рН ($r=-0,72$) агрочернозёма отражают устойчивый характер распределения микробного компонента в профиле почвы.

Интенсивность БД не соответствовала профильному распределению $C_{\text{мик}}$ в верхнем слое 0–5 см абразёма ($r=-0,42$) и снижалась с глубиной на всех ПП, наиболее плавно в профиле агрочернозёма ПП 7, что соответствовало распределению содержания $C_{\text{мик}}$ ($r=0,97$) (рис. 3б). В верхнем 0–5 см слое абразёма (ПП 5) низкому содержанию $C_{\text{мик}}$ соответствовала высокая интенсивность БД (1,25–2,92 мкг $C-CO_2 \times (g \times ч)^{-1}$), что характерно для почв, загрязненных ТМ (Brooks, 1995; Ананьева, 2003; Благодатская и др., 2008; Богородская и др., 2012; Терехова и др., 2021). Увеличение дыхания может быть объяснено реакцией микробоценоза на преодоление стресса, когда повышаются энергетические затраты на поддержание пула микробной биомассы (Insam et al., 1996; Ананьева, 2003; Благодатская и др., 2008). Интенсивность БД в профиле абразёма имела достоверную зависимость только от влажности ($r=0,87$), тогда как в урбанозёме и агрочернозёме высокая корреляция обнаружена с влажностью ($r=0,91$, $0,86$ соответственно), плотностью сложения ($r=-0,75$, $-0,80$) и рН ($r=-0,92$, $-0,70$).

Экофизиологические параметры микробоценозов ($C_{\text{мик}}$ и БД) имели высокую взаимосвязь с содержанием ТМ в верхней 20 см части профиля абразёма и урбанозёма. Так, обнаружена тесная отрицательная связь $C_{\text{мик}}$ с валовым содержанием Al, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Co ($r= -0,84$, $-0,63$, $-0,54$, $-0,75$, $-0,74$, $-0,86$, $-0,83$ и $-0,81$) и положительная корреляция интенсивности БД с теми же элементами, кроме Co в верхней части профиля абразёма ($r= 0,79$, $0,92$, $0,66$, $0,65$, $0,77$, $0,62$, $0,51$, $-0,77$). При этом полученные степенные зависимости $C_{\text{мик}}$ от валового содержания алюминия ($R^2= 0,80$), кадмия ($R^2= 0,82$) и свинца ($R^2= 0,83$) показывают влияние техногенной аккумуляции ТМ, максимальное количество которых содержат верхние органо-минеральные слои абразёма, на пул активной микробной биомассы (рис. 4а). Интенсивность БД абразёма имела логарифмический рост от валового содержания алюминия, никеля и цинка ($R^2= 0,64$, $0,75$, $0,61$) (рис. 4б).

Распределение $C_{\text{мик}}$ по верхней 20 см части профиля урбанозёма менее связано с валовым содержанием ТМ: отрицательная корреляция обнаружена только для Co ($r= -0,70$) и положительная для Ni и Cd ($r= 0,61$, $0,66$). Линейная связь $C_{\text{мик}}$ с валовым содержанием Co, Ni и Cd в профиле урбанозёма более слабая ($R^2= 0,54$, $0,54$, $0,47$), чем в абразёме ближней к КРАЗу ПП 5 (рис. 5а). Интенсивность БД в верхней 20 см части профиля урбанозёма положительно коррелировала с валовым содержанием Al, Ni, Zn, Pb, Cd и отрицательно с Co ($r= 0,92$, $0,94$, $0,71$, $0,93$, $0,83$, $-0,64$) и имела достоверный логарифмический рост от валового содержания алюминия, никеля и свинца ($R^2= 0,83$, $0,89$, $0,86$) (рис. 5б). Таким образом, полученные зависимости показывают рост интенсивности БД от высоких значений валового содержания некоторых ТМ и алюминия в профиле абразёма и урбанозёма, что выше отмечено разными авторами для почв, загрязненных ТМ.

В агрочернозёме наиболее удаленной ПП 7 достоверных зависимостей рассматриваемых экофизиологических параметров микробоценоза от валового содержания ТМ в профиле не обнаружено.

Наиболее высокая численность гетеротрофных микроорганизмов, максимальная в верхних слоях с плавным снижением ее по профилю, отмечена в агрочернозёме злакового луга (ПП 7) (рис. 6). В верхних слоях агрочернозёма высока численность микроорганизмов, использующих органический и минеральный азот, с выраженной тенденцией преобладания последних, что отражает как высокую напряженность процесса минерализации органического вещества, так и может свидетельствовать о быстром вовлечении продуктов распада растительных остатков в биологический круговорот, что характерно для почв

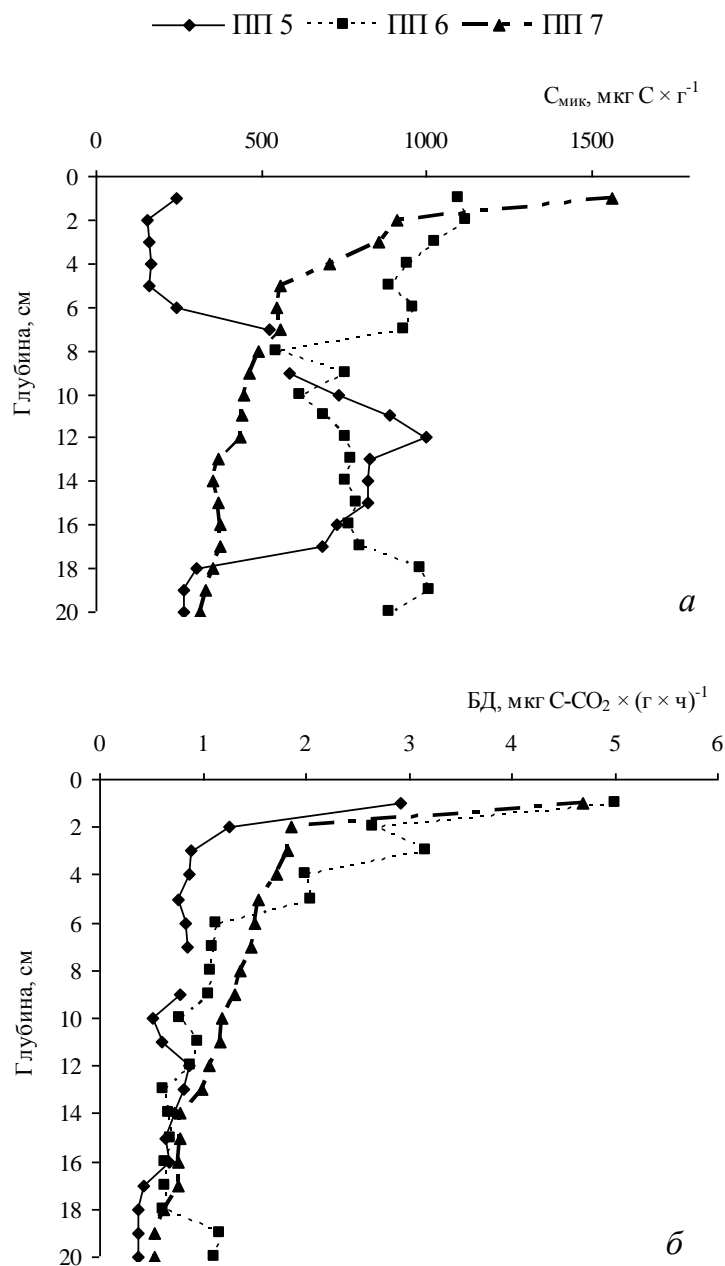


Рис. 3. Распределение содержания углерода микробной биомассы ($C_{мик}$) (а) и интенсивности базального дыхания (БД) (б) по профилю техногенных почв в импактной зоне КРАЗа

агроценозов (Ившина и др., 2014). В верхних слоях агрочернозёма численность олигонитрофилов достигала 4 млн. КОЕ г⁻¹ и превышала количество аммонификаторов на протяжении всего изученного профиля. Олигонитрофилы играют важную роль в поддержании запасов азота в почве, что обусловлено их способностью извлекать низкие концентрации азота, присутствующих в почве в «рассеянном» состоянии. Численность олигонитрофилов находится в прямой зависимости от концентрации в почве органического вещества и приурочена к гумусированным горизонтам (Никитина, Голодяев, 2003). Резкое преобладание олигонитрофилов над аммонификаторами наблюдается при поступлении растительных остатков, развитие которых стабилизируют соотношение С:N почвы. Количество олиготрофов преобладает над численностью аммонификаторов и это

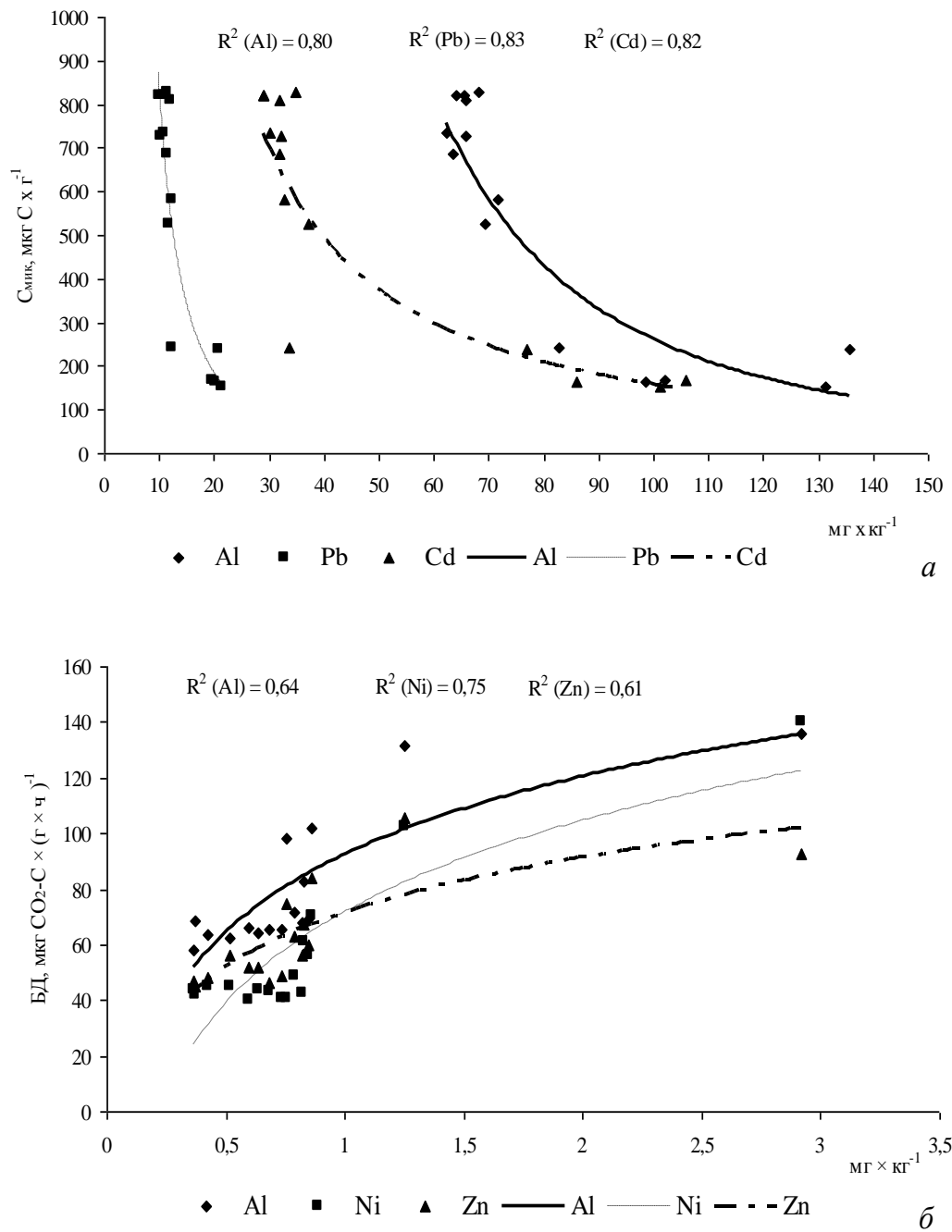


Рис. 4. Зависимость содержания углерода микробной биомассы (а) и интенсивности базального дыхания (б) от валового содержания ТМ в абразёме
 R^2 – величина достоверности аппроксимации. Для алюминия концентрации приведены в $г \times кг^{-1}$.

соотношение увеличивается с глубиной, что связано со снижением трофности почвы. В целом, в почвах импактной зоны КрАЗа количество олигонитрофильных и олиготрофных микроорганизмов в 4–16 раз ниже, чем в агросерой почве постагрогенного луга контрольного участка, удаленного от аэротехногенного воздействия КрАЗа (рис. 6). В агрочернозёме низкое количество микромитозов, что характерно для луговых ценозов.

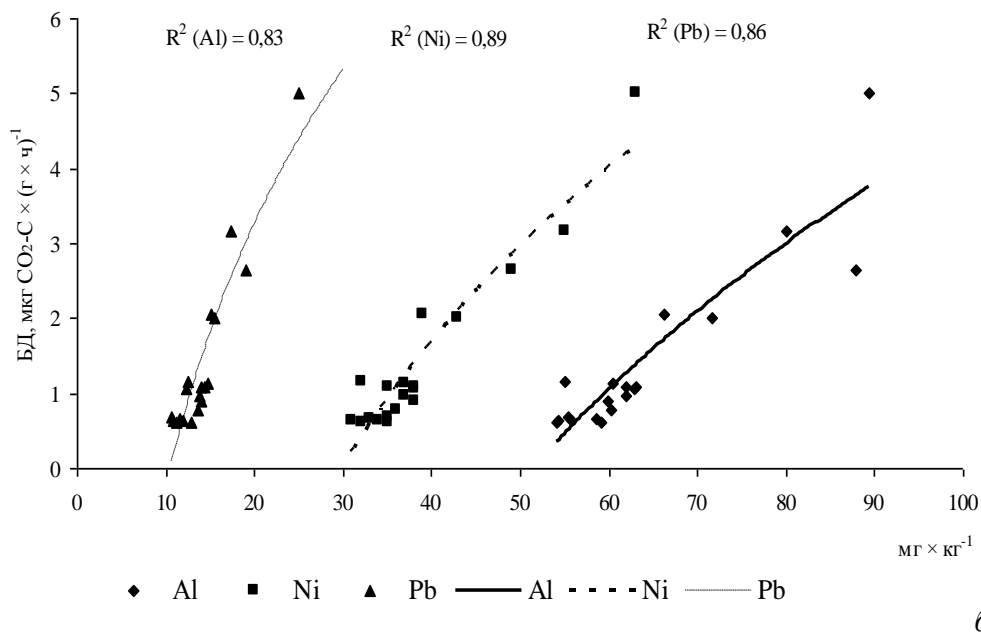
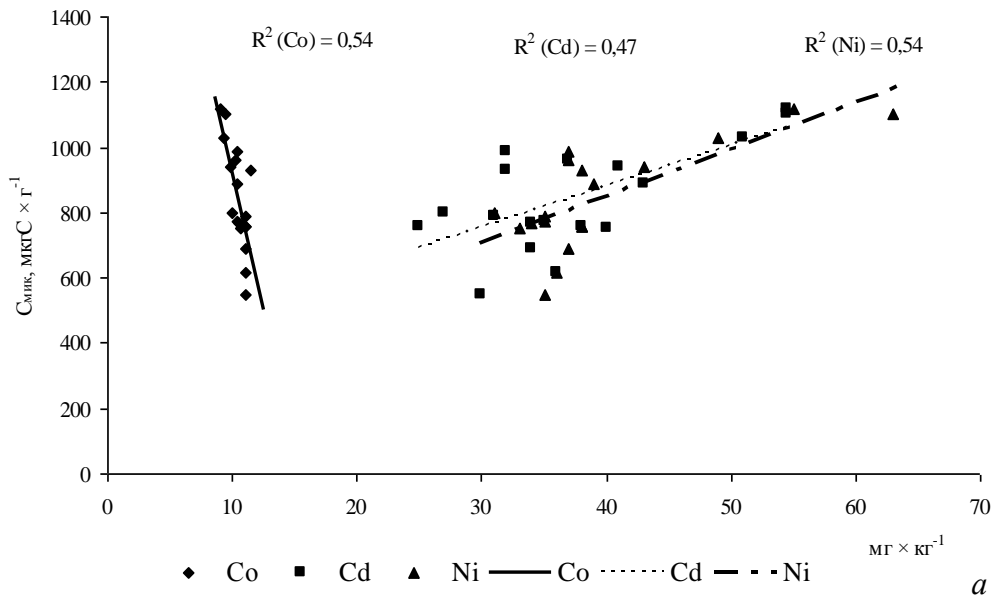


Рис. 5. Зависимость содержания углерода микробной биомассы (а) и интенсивности базального дыхания (б) от валового содержания ТМ в урбанозёме R^2 – величина достоверности аппроксимации. Для алюминия концентрации приведены в $\text{г} \times \text{кг}^{-1}$.

Абразём ближней к источнику выбросов ПП 5 характеризовался самой низкой суммарной численностью гетеротрофных микроорганизмов в верхнем 0–5 см слое и заметным ее возрастанием в нижележащем (рис. 6). Данное утверждение наиболее наглядно отражает численность аммонификаторов, олиготрофов и олигонитрофилов, зависящих от присутствия доступного органического вещества. Низкая численность олигонитрофилов в

верхнем 0–5 см слое абразёма, не превышающая количество аммонификаторов по всему исследуемому профилю, свидетельствует о повышенной чувствительности этой группы микроорганизмов к ТМ. Отмечено, что наиболее чувствительными к загрязнению почвы ТМ являются аммонифицирующие, олигонитрофильные, некоторые споровые бактерии и актиномицеты (Никитина, Голодяев, 2003; Благодатская и др., 2008; Евдокимова и др., 2013). В большей степени устойчивы к загрязнению целлюлозолитические бактерии (Евдокимова, Зенкова, 2003), и использующие минеральный азот (Никитина, Голодяев, 2003; Благодатская и др., 2008; Евдокимова и др., 2013).

Численность бактерий, использующих минеральный азот, оставалась примерно одинаковой в верхней части профиля абразёма, превышая количество аммонификаторов в 2–6 раз, что свидетельствует о высокой напряженности процесса микробиологической минерализации органических соединений. Численность олиготрофов заметно повышалась с глубиной почвы и превышала количество аммонификаторов, что свидетельствует о снижении трофности почвы. В верхнем 0–5 см слое абразёма высокая численность микромицетов, достигающая 0,6 млн г⁻¹, также снижалась с глубиной. Это может быть следствием как подкисления на 1–1.5 ед. верхних горизонтов абразёма (рис. 1б), так и повышенной устойчивостью микромицетов к воздействию ТМ, что объясняется как их физиологическими особенностями, так и выделением в процессе жизнедеятельности органических кислот, которые нейтрализуют токсическое действие ТМ, образуя с ними комплексы, менее токсичные, чем свободные ионы (Евдокимова и др., 2013). В верхних слоях абразёма соотношение грибы/бактерии увеличивалось по сравнению с агрочернозёмом ПП 7 в 5 раз, что может являться индикатором загрязнения почв ТМ (Евдокимова, Зенкова, 2003).

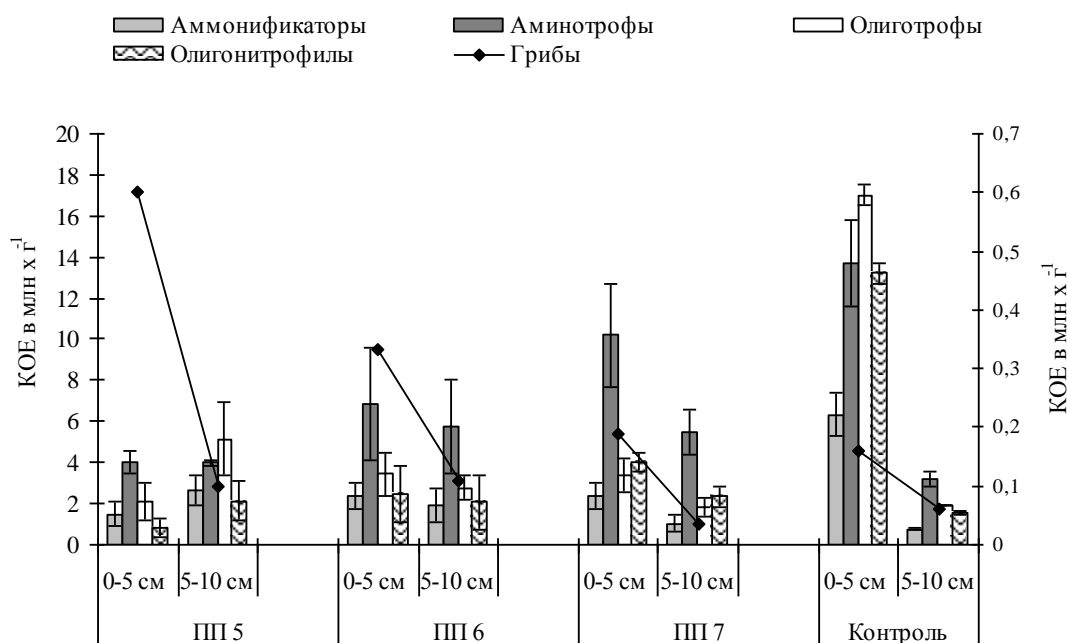


Рис. 6. Численность разных функциональных групп микроорганизмов в техногенных почвах импактной зоны КРАЗа

Численность всех функциональных групп микроорганизмов в верхнем 0–5 см слое урбаноёма (ПП 6) выше, чем в абразёме и сравнима с таковой в агрочернозёме (ПП 7), но ниже контроля в 2–5 раз (рис. 6). При этом с глубиной не отмечено значительного снижения численности микроорганизмов, что связано с отсутствием дифференциации почвенного профиля. Количество КОЕ микроскопических грибов снижается по сравнению с абразёмом, но выше, чем в агрочернозёме и контроле.

Таким образом, численность и соотношение функциональных групп микроорганизмов в техногенных почвах демонстрируют отклик микробоценоза на загрязнение высокими дозами ТМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвенный покров исследованной импактной зоны КраЗа (до 3 км) преимущественно представлен антропогенно-преобразованными почвами и техногенными почвенными образованиями (абразёмами, урбанозёмами, агрочернозёмами), тогда как почвы с ненарушенным строением профиля занимают очень незначительную часть территории. Все почвы импактной зоны КраЗа содержат повышенное количество алюминия, меди, никеля и др. элементов в верхних горизонтах, распределение элементов в почвенном профиле носит техногенно-аккумулятивный характер. Элементы по валовой концентрации образуют убывающий ряд: $Al > Zn > Ni > Cu > Pb > Cd$, тогда как по кларку концентрации – $Cu > Cd > Ni > Al > Pb > Zn$.

Наибольшей сбалансированностью функциональной активности микробоценоза и высокой численностью микроорганизмов разных функциональных групп характеризуется агрочернозём злакового луга удаленной на 3 км от КраЗа пробы. В верхнем 5 см слое абразёма на расстоянии 0,3 км от источника выбросов значительно снижена численность аммонификаторов, олигонитрофилов и олиготрофов, содержание $S_{мик}$ минимально и не превышает 150–240 $мкг\ C \times г^{-1}$. Высокая численность микроскопических грибов и преобладание минерализационных процессов над иммобилизационными свидетельствует о стрессовых условиях для микробоценоза при загрязнении почвы ТМ. Высокие значения валового содержания ТМ и алюминия ближайших к КраЗу пробных площадей (0,3–1,5 км) оказывают достоверное влияние на содержание $S_{мик}$ и увеличивают интенсивность БД в профиле абразёма и урбанозёма, что свидетельствует о стрессе микробного сообщества.

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам Института минералогии УрО РАН Г. Ф. Лонщаковой, Л. Г. Удачиной за пробоподготовку почв и с.н.с., к.г.–м.н. К. А. Филипповой за выполнение анализа почв методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 0287–2021–0010, номер НИОКТР 121030900181–4.

Список литературы

- Алексеев В. А., Алексеев А. В. Химические элементы в городских почвах. – М.: Логос, 2014. – 312 с.
- Ананьева Н. Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. – М.: Наука, 2003. – 222 с.
- Благодатская Е. В., Пампура Т. В., Богомолова И. Н., Копчик Г. Н., Лукина Н. В. Влияние выбросов медно-никелевого комбината на микробные сообщества почв лесных биогеоценозов Кольского полуострова // Известия РАН. Серия биологическая. – 2008. – № 2. – С. 232–242.
- Богородская А. В., Пономарева Т. В., Шапченкова О. А., Шишкин А. С. Оценка состояния микробных комплексов почв лесотундровой зоны в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. – 2012. – № 5. – С. 582–593.
- Васильева Л. И., Кадацкий В. Б. Формы тяжелых металлов в почвах урбанизированных и заповедных территорий // Геохимия. – 1998. – № 4. – С. 426–429.
- Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
- Водяницкий Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. – 2013. – № 7. – С. 872–881.
- Водяницкий Ю. Н. Концепция гибкого подхода к оценке ориентировочно допустимой концентрации тяжелых металлов и металлоидов в почве // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2011. – Вып. 67. – С. 49–66.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. – Екатеринбург: УИФ «Наука», – 1994. – 281 с.

Давыдова Н. Д. Динамика поступления поллютантов от алюминиевого завода и их распределение в почвах южной тайги // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 8 (часть 2). – С. 203–207.

Демиденко Г. А., Васильева Т. В. Экотоксикологическая оценка почв в окрестностях алюминиевого завода города Красноярск методами биотестирования // *Вестник КрасГАУ*. – 2016. – № 9. – С. 44–52.

Демиденко Г. А., Миронов А. Г., Жбанчиков Д. О. Загрязнение фтором сельскохозяйственных земель и растений в зоне влияния производственной деятельности алюминиевого завода // *В мире научных открытий*. – 2016. – № 2 (74). – С. 148–158.

Евдокимова Г. А., Зенкова И. В. Влияние выбросов алюминиевого завода на биоту почв Кольского полуострова // *Почвоведение*. – 2003. – № 8. – С. 973–979.

Евдокимова Г. А., Корнейкова М. В., Мозгова Н. П. Изменения свойств почв и почвенной биоты в зоне воздействия аэротехногенных выбросов Кандалакшского алюминиевого завода // *Почвоведение*. – 2013. – № 10. – С. 1274–1280.

Ившина И. Б., Костина Л. В., Каменских Т. Н., Жуйкова В. А., Жуйкова Т. В., Безель В. С. Почвенный микробиоценоз как показатель стабильности луговых сообществ при химическом загрязнении среды тяжелыми металлами // *Экология*. – 2014. – № 2. – С. 83–90.

Ильин В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 220 с.

Качинский Н. А. Физика почв. Т. 1. – М.: «Высшая школа», 1965. – С. 155–161.

Колесников С. И., Казеев К. Ш., Вальков В. Ф. Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростиздат? 2006. – 385 с.

Кремленкова Н. П., Гапонюк Э. И., Кабалина Л. Н. Особенности распределения техногенного фтора в почвах Красноярской лесостепи // *Труды Института экспериментальной метеорологии*. – 1991. – Вып. 20 (153). – С. 110–122.

Крупкин П. И., Косицина А. А. К вопросу о загрязнении фтором почв пригородной зоны г. Красноярск // *Вестник КрасГАУ*. – 2006. – № 10. – С. 162–169.

Методы почвенной микробиологии и биохимии / [Ред. Д. Г. Звягинцев]. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 304 с.

Министерство экологии и рационального природопользования Красноярского края. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mpr.krskstate.ru/presscentr/0/news/88037> (просмотрено 22.04.2022).

Никитина З. И., Голодяев Г. П. Экология микроорганизмов и санация почв техногенных территорий. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 179 с.

Самофалова И. А. Химический состав почв и почвообразующих пород. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2009. – 132 с.

Скрипальщикова Л. Н., Грешилова Н. В., Стасова В. В., Пляшечник М. А. Аккумулирующая способность и стабильность развития березняков разнотравных в зоне промышленных выбросов // *Вестник Крас ГАУ*. – 2016. – № 7. – С. 41–47.

Соколова О. Я., Стряпков А. В., Антимонов С. В., Соловых С. Ю. Влияние техногенного воздействия на содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах // *Вестник ОГУ. Т. 2. Естественные науки*. – 2006. – № 2. – С. 35–42.

Соколова Т. А., Толпешта И. И., Трофимов С. Я. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе: учебное пособие по некоторым главам курса химии почв. – Тула: Гриф и К, – 2007. – 96 с.

Строганова М. Н., Мягкова А. Д., Прокофьева Т. В. Городские почвы: генезис, классификация, функции // *Почва. Город. Экология* / [Под ред. Добровольского Г. В.]. – М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. – С. 15–85.

Ташлыкова Е. Е. Оценка содержания тяжелых металлов в почвах пригородной зоны г. Красноярск // *Вестник КрасГАУ*. – 2008. – № 3. – С. 184–189.

Терехова В. В., Прудникова Е. В., Кулачкова С. А., Горленко М. В., Учанов П. В., Сушко С. В., Ананьева Н. Д. Микробиологические показатели агродерново-подзолистых почв разной гумусированности при внесении тяжелых металлов и углеродсодержащих препаратов // *Почвоведение*. – 2021. – № 3. – С. 372–384.

ФР.1.29.2006.02149: «Методика выполнения измерений содержания элементов в твердых объектах методами спектрометрии с индуктивно связанной плазмой». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293777/4293777593.htm> (просмотрено 15.09.2018)

Шишов Л. С., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.

Anderson T.-H., Domsh K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1978. – Vol. 10. – P. 215–221.

Brooks P. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals // *Biology and Fertility of Soils*. – 1995. – Vol. 19, N 4. – P. 269–279.

Gupta S. K. Mobilizable metal in anthropogenic contaminated soils and its ecological significance // *In Impact of heavy metals on the environment*. – (Ed.): J. P. Vernet. – 1992. – P. 299–310.

Insam H., Hutchinson T. C., Reber H. H. Effect of heavy metal stress on the metabolic quotient of soil microflora // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1996. – Vol. 28, N 4–5. – P. 691–694.

Ponomareva T. V., Bogorodskaya A. V. Content of heavy metals and microbiological characteristics of soils in the impact zone of Krasnoyarsk aluminum plant // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 90–105.

Anthropogenically transformed soils (agrochernozeems (*Anthrosols*), abrazems and urbanozeems (*Technosols*) on the territory adjacent to the Krasnoyarsk Aluminum Plant within the sanitary protection zone were studied. Based on the results of a detailed analysis of the total content of elements with a step of 1 cm in depth, the nature of the distribution of the content of aluminum and heavy metals (HM) in the upper 20 cm soil layer was revealed, which was compared with clarkes of elements and their content in control soils. It was determined that the maximum excess of the concentration of HM in the soil with respect to the clarkes in the near zone of impact of the enterprise at a distance of 0,3 km was 16 times for copper, 8 times for cadmium, 2,5 times for nickel, and 1,6 times for aluminum. The studied soils contained more than 3 times the amount of aluminium, copper, nickel and other elements in the upper horizons, therefore, these soils can be classified as chemically transformed soils. In the abrazem profile at a distance of 0.3 km from the enterprise, in the upper 5 cm layer, the minimum content of carbon of microbial biomass (150–240 $\mu\text{g C g}^{-1}$), high intensity of basal respiration (1,25–2,92 $\mu\text{g C-CO}_2 \times (\text{g} \times \text{h})^{-1}$), as well as significant structural and functional changes in the heterotrophic complex of microbiocenosis were recorded. The high values of the total content of HM and aluminum in the nearest impact zone up to 1.5 km had a significant effect on the content of carbon of microbial biomass and increased of the intensity of basal respiration in the profile of abrazem and urbanozem, which indicates the stress of the microbial community.

Key words: anthropogenically transformed soils, *Anthrosols*, *Technosols*, aluminum, heavy metals, soil microbial complexes.

Поступила в редакцию 10.10.22
Принята к печати 30.12.22