

УДК 631.427

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И ДЫХАТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ МИКРООРГАНИЗМОВ В НАТИВНЫХ ПОЧВАХ И ИСКУССТВЕННЫХ СУБСТРАТАХ (НА ПРИМЕРЕ ЗАПОВЕДНОГО УЧАСТКА “ЯМСКАЯ СТЕПЬ”)

**© 2016 г. Н. О. Бакунович¹, О. С. Хохлова¹,
Т. Н. Мякшина¹, А. В. Русаков², А. С. Шаповалов³**

¹*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
РАН, Россия, 142290 Московская обл., Пущино, ул. Институтская, 2
e-mail: akhokhlov@mail.ru*

²*Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного уни-
верситета, Россия, 199178 Санкт-Петербург, В.О., 16 линия, 29*

³*Государственный заповедник “Белогорье”, Россия, 309340 Белгородская
обл., пос. Борисовка, Монастырский пер., 1*

Участок “Ямская степь” заповедника “Белогорье” расположен в Белгородской области вблизи сосредоточения предприятий горнодобывающей промышленности: Лебединского и Стойленского ГОК, комбинатов “КМАруда” и Оскольский металлургический, ТЭЦ и др. Учитывая, что “Ямская степь” является особо охраняемой природной территорией и при этом испытывает значительную техногенную нагрузку, необходимость изучения свойств доминирующих почв и проведения оценки загрязнения их тяжелыми металлами (ТМ) приобретает актуальное значение. Целью работы являлась оценка токсичности загрязнения почв “Ямской степи” ТМ в зависимости от изучения дыхательной активности микроорганизмов нативных почв мониторинговых площадок (МП) и искусственно созданных смесей почвы с пылью из цехов комбината, содержащей повышенные количества ТМ. Исследования нативных почв на МП не выявили зависимости базального дыхания от типа почвы, лишь слабо и единично от типа землепользования. В почвах только двух из 21-й изученной МП обнаружены признаки нарушения функционирования микробного сообщества. Измерения валовых форм ТМ показали относительное превышение концентрации на этих МП Cu, Zn, Zr, Sn, Pb, As. Опыты с искусственными субстратами позволили заключить, что добавление пыли с ТМ, взятой из цехов Лебединского ГОКа, сказывается на микробиологической активности, вызывая интенсификацию выделения CO₂, как в случае измерения скорости базального, так и субстрат-индуцированного дыхания. Но только в вариантах при равном соотношении почва/пыль, что маловероятно в природных условиях, это влияние

было значительным. Необходим поиск более чувствительных индикаторов загрязнения ТМ изучаемых почв.

Ключевые слова: тяжелые металлы, загрязнение, черноземы, дыхательная активность микробоценоза, мониторинговые площадки, натурные и имитационные эксперименты, Ямская степь.

DOI: 10.19047/0136-1694-2016-85-131-149

ВВЕДЕНИЕ

Во многих работах продемонстрировано, что минерализационная или дыхательная активность почвенных микроорганизмов может являться чувствительным индикатором загрязнения почв тяжелыми металлами (ТМ) на естественных территориях вокруг промышленных предприятий (Berg et al., 1991; Aceves et al., 1999; Филимонова и др., 2000; Евдокимова, Зенкова, 2003). Однако отклик микробного сообщества на загрязнение бывает неоднозначным и выражен в разной степени. Во многих случаях обнаружено не угнетение, а стимуляция учитываемых тест-реакций (Кабилов и др., 1997; Яковлев, 2000; Девятова, 2005; Шунелько, Федорова, 2006; Терехова, 2007), что приводит к необходимости поиска причин этого явления. Поэтому продолжение исследований в данном направлении с привлечением разных подходов весьма актуально.

Участок “Ямская степь” государственного природного заповедника “Белогорье” расположен на северо-востоке Белгородской области, где на относительно небольшой площади сосредоточены предприятия горно-добывающей промышленности: Лебединский ГОК, Стойленский ГОК, комбинат “КМАруда”, Оскольский металлургический комбинат, ТЭЦ и др. Ямская степь граничит непосредственно с Лебединским ГОК, и при сильном ветре, стоя на ее территории, можно наблюдать клубы пыли, поднимающиеся с отвалов предприятия. Роза ветров ближайшего к заповедному участку пункта метеонаблюдений (г. Губкин) представлена на рис. 1, из которого видно, что, хотя преимущественные ветра дуют мимо Ямской степи, вероятность ветров Ю, ЮЗ и ЮВ направления, захватывающих территорию заповедника, составляет около 40%, что тоже немало. Значительные объемы перерабатываемого сырья для выплавки металла, технологические “хвосты” и отходы, недостаточно утилизируемые пылегазовыбросы создают избыточную техногенную

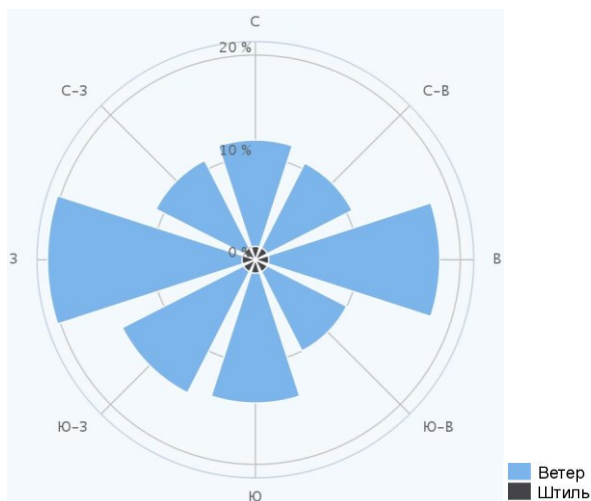


Рис. 1. Роза ветров, г. Губкин (по данным ресурса World Weather).

нагрузку на экосистемы окружающих территорий, прежде всего, на почву, загрязняя ее ТМ, поступающими по воздуху вместе с пылью из цехов и отвалов.

Цель работы – оценка токсичности загрязнения почв и ландшафтов участка “Ямская степь” заповедника “Белогорье” ТМ на основе изучения сети мониторинговых площадок (МП). При этом комплексные почвенные исследования проводили с использованием традиционных методов исследования общих свойств почв, с одной стороны, и чувствительных к загрязнению микробиологических тестов, с другой.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Вокруг Ямской степи в Белгородской области в 2013–2015 гг. заложили сеть пунктов комплексных наблюдений (мониторинговых площадок) за воздействием Лебединского ГОК на экосистемы этого заповедного участка. В 2013–2014 гг. исследовали 21-ую мониторинговую площадку (табл. 1). Провели морфогенетический анализ полнопрофильных почвенных разрезов, названия почв даны согласно [Классификации и диагностики почв России](#) (2004).

Со всех МП отобрали пробы с глубины 0–5 см. В пробах определяли содержание органического углерода ($C_{орг}$) по Тюрину, рН водной вытяжки, гранулометрический состав методом пипетки

с диспергацией пиррофосфатом натрия и содержание валовых форм ТМ. Определение содержания ТМ проводили масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой, или атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой. Содержание Mn, Cd, Fe определяли атомно-абсорбционным методом в ацетатно-аммонийной вытяжке (рН 4.8).

В пробах, отобранных с глубины 0–5 см, в лабораторных условиях измеряли микробиологическую активность почв (V_{basal}) по интенсивности выделения CO_2 при увлажнении, соответствующем 65–70% от ППВ, и температуре 24°C в трехкратной повторности. Скорость субстрат-индуцированного дыхания (V_{sir}) измеряли при внесении в почву избытка доступного для микробов субстрата – глюкозы (Anderson, Domsch, 1978). На основе измеренных V_{basal} и V_{sir} рассчитывали содержание микробного углерода (C_{mic}) и метаболический коэффициент ($q\text{CO}_2$) (Благодатская и др., 1995).

Дополнительно провели опыты с пылью, загрязненной ТМ (полученной из цехов Лебединского ГОКа), получали искусственные смеси этой пыли с почвой, методику вырабатывали в ходе эксперимента, поэтому ее описание поместили в следующий раздел.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общие свойства почв МП и дыхательная активность нативных почв. Содержание $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое (0–5 см) гумусово-аккумулятивного горизонта на изученных пунктах наблюдений варьирует от 3.69 (6.3% в пересчете на гумус) (МП Галичи, разр. Н4) до 2.06 (3.6% в пересчете на гумус) (МП Ямская степь, Суры, разр. Н11) (рис. 2А).

Поверхностные горизонты почв отличаются слабокислой, близкой к нейтральной, и нейтральной реакцией среды, т.е. условиями, необходимыми для проведения исследования по интенсивности выделения CO_2 микроорганизмами. Показатели кислотности всех точек наблюдения лежат в пределах 5.0–6.4 ед. рН (МП Романово, разр. Н1 и МП Барское, разр. Н7 соответственно) (рис. 2Б).

По гранулометрическому составу почвы МП незначительно различаются, это и средне- и тяжелосуглинистые отложения с содержанием физической глины от 42 до 54%.

Дыхательная активность микроорганизмов изменяется в широком диапазоне: от 0.6 (МП Ямская степь, Суры, разр. Н11, МП Садки, разр. Н33) до 2.2 мкг С/(г ч) (МП Барское, разр. Н7) (рис. 3).

Таблица 1. Сеть пунктов комплексных наблюдений за воздействием Лебединского ГОК на экосистемы Ямской степи

№ раз-реза	Пункт, координаты, положение в рельефе	Почва	Ближайший пункт, административный район	Бассейн реки	Расстояние от центра/границы промзоны ЛебГОК, км	Азимут к центру ЛебГОК
Н11	Ямская степь, Суры, 51°11'59.085"N 37°38'32.407"E, наветренное	Стратозем темногумусовый сверхмощный тяжелосуглинистый профильно оглеенный на овражно-балочных наносах	Загорный, Губкинский	Чуфичка	$\frac{6.9}{1.0}$	9°
Н13	Ямская степь, плакор, 51°11'23.8"N 37°38'46.403"E, некосимый участок, наветренное	Чернозем миграционно-мицелярный среднеспособный тяжелосуглинистый среднекарбонатный на карбонатных лёссовидных суглинках	Загорный, Губкинский	Чуфичка-Дубенка	$\frac{7.9}{2.0}$	6°
Н12	Ямская степь, плакор, 51°11'23.8"N 37°38'46.403"E, косимый участок, наветренное	Чернозем миграционно-мицелярный мощный среднесуглинистый глубококарбонатный на карбонатных лёссовидных суглинках	Загорный, Губкинский	Чуфичка-Дубенка	$\frac{7.9}{2.0}$	6°
Н21	Ямская степь, Еремкин Лог, 51°10'38.4"N 37°39'02.9"E, подветренное	Чернозем глинисто-иллювиальный среднеспособный тяжелосуглинистый на бурых глинах	Загорный, Губкинский	Дубенка	$\frac{9.1}{3.0}$	4°
Н6	Должик, 51°9'8.594"N 37°33'15.987"E, наветренное	Темно-серая тяжелосуглинистая среднеспособная на бескарбонатных лёссовидных суглинках	Дубровка, Губкинский	Дубенка	$\frac{14.0}{6.0}$	31°
Н9	Хмелеватое, 51°6'42.64"N 37°26'37.207"E, наветренное	Чернозем глинисто-иллювиальный среднеспособный на бескарбонатных лёссовидных суглинках	Мелавое, Губкинский	Орлик	$\frac{22.4}{12.7}$	43°

№ раз-реза	Пункт, координаты, положение в рельефе	Почва	Ближайший пункт, административный район	Бас-сейн реки	Расстояние от центра/ границы промзоны ЛебГОК, км	Азимут к центру ЛебГОК
Н8	Водяное, 51°4'57.059"N 37°31'17.585"E, наветренное	Темногумусовая мощная тяжелосуглинистая на карбонатных лёссовидных суглинках, подстилаемых элювием меловых отложений	Дальняя Ливенка, Губкинский	Орлик	$\frac{21.9}{13.8}$	26°
Н19	Вислое, 51°2'11.772"N 37°24'34.846"E, наветренное	Чернозем глинисто-иллювиальный тяжелосуглинистый мощный на бескарбонатных лёссовидных суглинках	Коньшино, Губкинский	Ольшанка	$\frac{30.3}{21.2}$	36°
Н3	Сенное, 51°12'28.663"N 37°30'30.343"E, наветренное	Стратозем темногумусовый сверхмощный тяжелосуглинистый на овражно-балочных наносах	Сергиевка, Губкинский	Осколец	$\frac{11.9}{2.5}$	61°
Н18	Воробьево, 51°02'0.057"N 37°28'30.003"E, наветренное	Чернозем глинисто-иллювиальный мощный тяжелосуглинистый на бескарбонатных лёссовидных суглинках	Коньшино, Губкинский	Ольшанка	$\frac{28.3}{19.9}$	28°
Н1	Романово, 51°13'48.398"N 37°28'55.447"E, наветренное	Чернозем глинисто-иллювиальный оподзоленный среднемощный тяжелосуглинистый глубокоооглеенный на пролювиально-делювиальных переотложенных бурых глинах	Сергиевка, Губкинский	Осколец	$\frac{12.6}{4.6}$	75°
Н5	Кленовенькое, 51°11'2.679"N 37°28'20.497"E, подветренное	Стратозем темногумусовый сверхмощный тяжелосуглинистый	Пугачи, Губкинский	Орлик	$\frac{15.4}{5.7}$	57°
Н4	Галичи, 51°10'28.892"N 37°28'1.038"E,	Темногумусовая мощная тяжелосуглинистая на	Пугачи, Губкинский	Орлик	$\frac{16.3}{6.6}$	55°

№ раз-реза	Пункт, координаты, положение в рельефе	Почва	Ближайший пункт, административный район	Бас-сейн реки	Расстояние от центра/границы промзоны ЛебГОК, км	Азимут к центру ЛебГОК
N7	наветренное Барское, 51°6'38.209"N 37°35'55.922"E, подветренное	бескарбонатных лёссовидных суглинках, подстилаемых меловыми отложениями Темногумусовая маломощная тяжелосуглинистая на красно-бурых глинах	Копцево, Губкинский	Орлик	<u>17.2</u> 10.4	14°
N14	Осинник, 51°3'1.629"N 37°39'14.739"E, наветренное	Темногумусовая глинисто-иллювирированная среднемощная тяжело суглинистая на бурых глинах, подстилаемых меловыми отложениями	Старохмелевое, Чернянский	Орлик	<u>23.9</u> 17.1	1°
N16	Косино, 51°1'21.529"N 37°35'52.563"E, подветренное	Темногумусовая слитизированная мощная тяжело-суглинистая на бурых глинах	Кочегуры, Чернянский	Ольшанка	<u>26.8</u> 20.2	10°
N15	Резников Яр, 51°1'0.736"N 37°39'41.024"E, подветренное	Темно-серая стратифицированная маломощная тяжелосуглинистая на бурых глинах	Ольшанка, Чернянский	Ольшанка	<u>27.1</u> 20.9	0°
N32	Обручное, 50.95613°N 37.67445°E, подветренное	Темногумусовая глинисто-иллювирированная остаточной карбонатная среднемощная тяжелосуглинистая на бурых глинах, подстилаемых перетолженными меловыми отложениями	Ковылино, Чернянский	Халань	<u>33.9</u> —	359°
N33	Садки, 50.90226°N 37.59580°E, наветренное	Темногумусовая метаморфизованная глинисто-иллювирированная среднемощная тяжелосуглинистая на бурых глинах	Верхнее Кузькино, Чернянский	Халань	<u>40.1</u> —	7°

№ раз-реза	Пункт, координаты, положение в рельефе	Почва	Ближай-ший пункт, административный район	Бас-сейн реки	Расстоя-ние от центра/ границы промзоны ЛебГОК, км	Азимут к центру ЛебГОК
Н35	Репное, 50.98851°N 37.41460°E, наветренное	Чернозем глинисто-иллювиальный среднemosный легкоглинистый на бурых глинах	Жилин Колодезь, Губкинский	Оль-шанка	<u>34.7</u> –	30°
Н36	Перелесок 2, координаты не определили	Чернозем глинисто-иллювиальный мощный тяжело-суглинистый на бурых глинах	Кочегуры, Чернянский	Оль-шанка	<u>30.1</u> 23.5	10°

Самые низкие значения зафиксированы в стратоземе темногумусовом, расположенном в днище балки (МП Ямская степь, Суры, разр. Н11); черноземе глинисто-иллювиальном (МП Воробьево, разр. Н18) и темногумусовой метаморфизированной почве (МП Садки, разр. Н33). Наибольшие показатели базального дыхания обнаружены в темногумусовой маломощной почве (МП Барское, разр. Н7), темно-серой (МП Должик, разрез Н6), черноземе миграционно-мицелярном (МП Ямская степь, плакор, разр. Н12) и черноземе глинисто-иллювиальном (МП Ямская степь, Еремкин лог, разр. Н21). Таким образом, зависимость базального дыхания от типа почвы не прослеживается. Однако отмечена некоторая связь с режимом землепользования: на плакоре косимого участка Ямской степи (чернозем миграционно-мицелярный, разр. Н12) уровень V_{basal} выше, чем на некосимом участке (та же почва, участки расположены в нескольких метрах друг от друга, разр. Н13).

Наибольшие значения содержания C_{mic} обнаружены в тех же МП, что и в случае с V_{basal} (МП 6, 7, 12, 21). Максимальные величины C_{mic} достигают 168 мг С/100 г почвы (МП Барское, разр. Н7) в темногумусовой маломощной почве. Минимальные же значения зафиксированы в темно-серой стратифицированной почве (МП Резников Яр, разр. Н15) и черноземе глинисто-иллювиальном (МП Воробьево, разр. Н18), 30.1 и 20.6 мг С/100 г почвы соответственно. При этом уровень V_{basal} на этих МП не был самым низким.

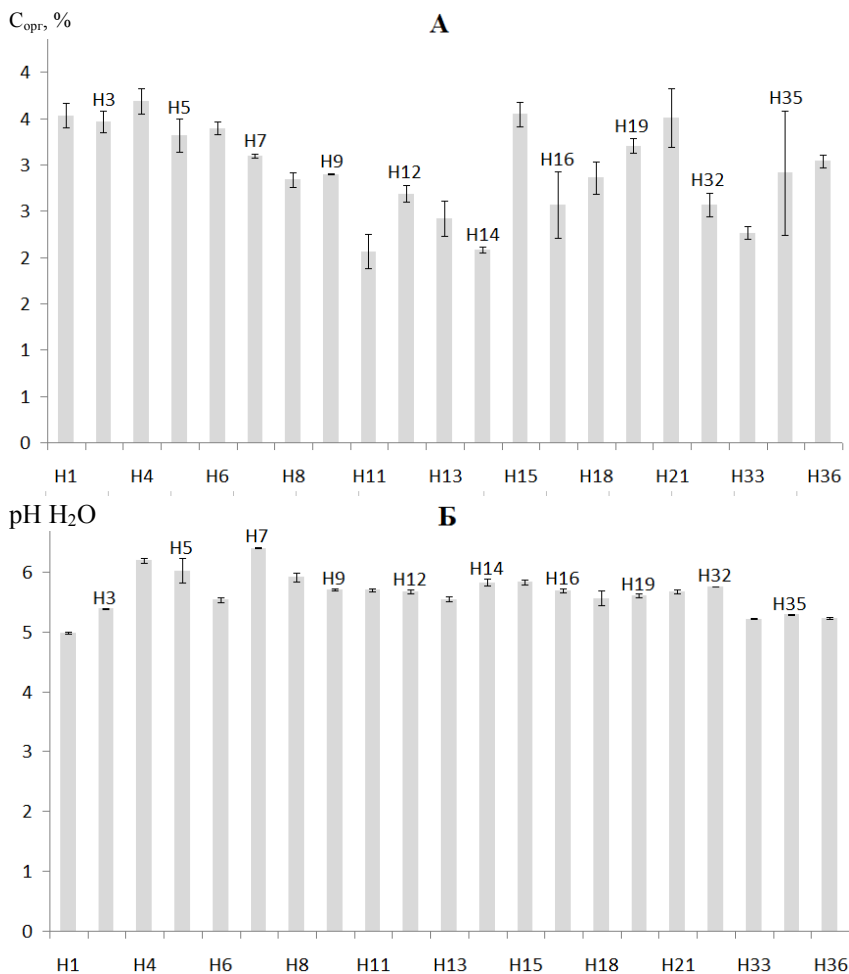


Рис. 2. Содержание органического углерода (А) и рН (Б) в почвенных пробах с глубины 0–5 см на МП.

Следует отметить, что в почвах разр. Н15 (МП Резников Яр) и Н18 (МП Воробьево) наблюдаются самые высокие показатели метаболического коэффициента $q\text{CO}_2$: 0.369 и 0.375 соответственно (рис. 4). Все остальные МП укладываются в диапазон значений от 0.052 до 0.143. На участках косимой (разр. Н12) и некосимой (разр. Н13) Ямской степи с черноземом миграционно-мицелярным

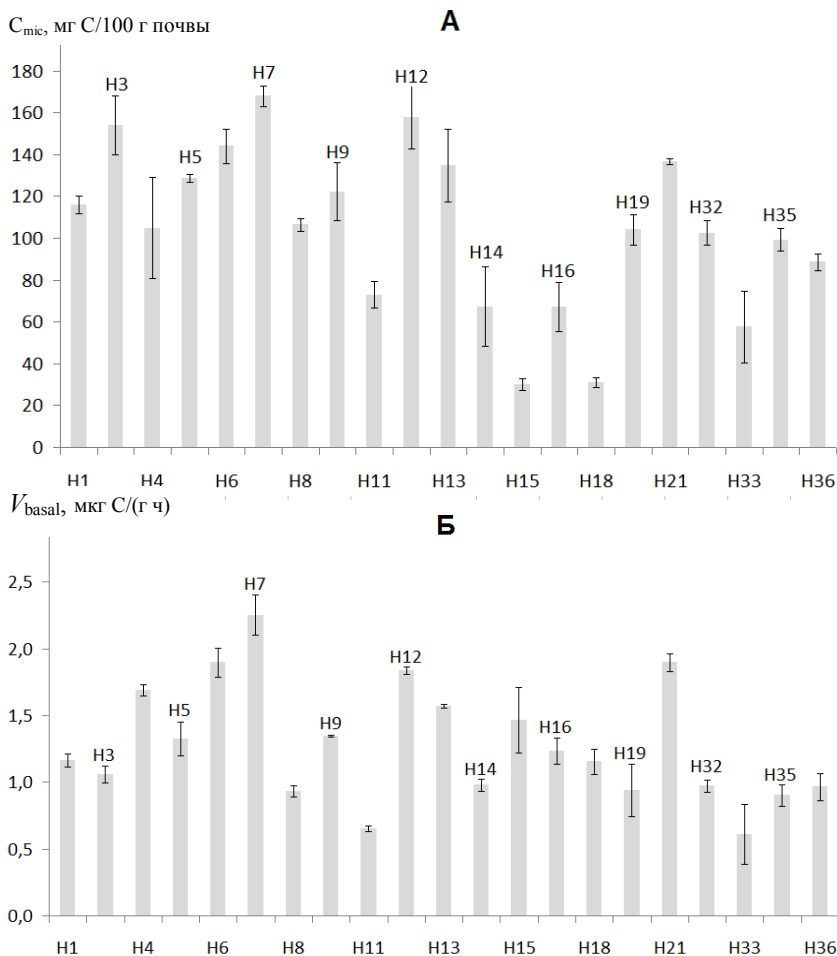


Рис. 3. Содержание углерода микробной биомассы (А) и уровень базального дыхания (Б) в почвенных пробах с глубины 0–5 см на МП.

зафиксированы практически одинаковые значения qCO_2 . С точки зрения антропогенного загрязнения величины qCO_2 , превышающие 0.1–0.2, отражают угнетение и нарушение микробного сообщества (Благодатская и др., 1995). Анализ удельной скорости базального дыхания ($V_{\text{basal}}/C_{\text{орг}}$, мкг С/(г ч)) – величины, которая может служить косвенной характеристикой устойчивости

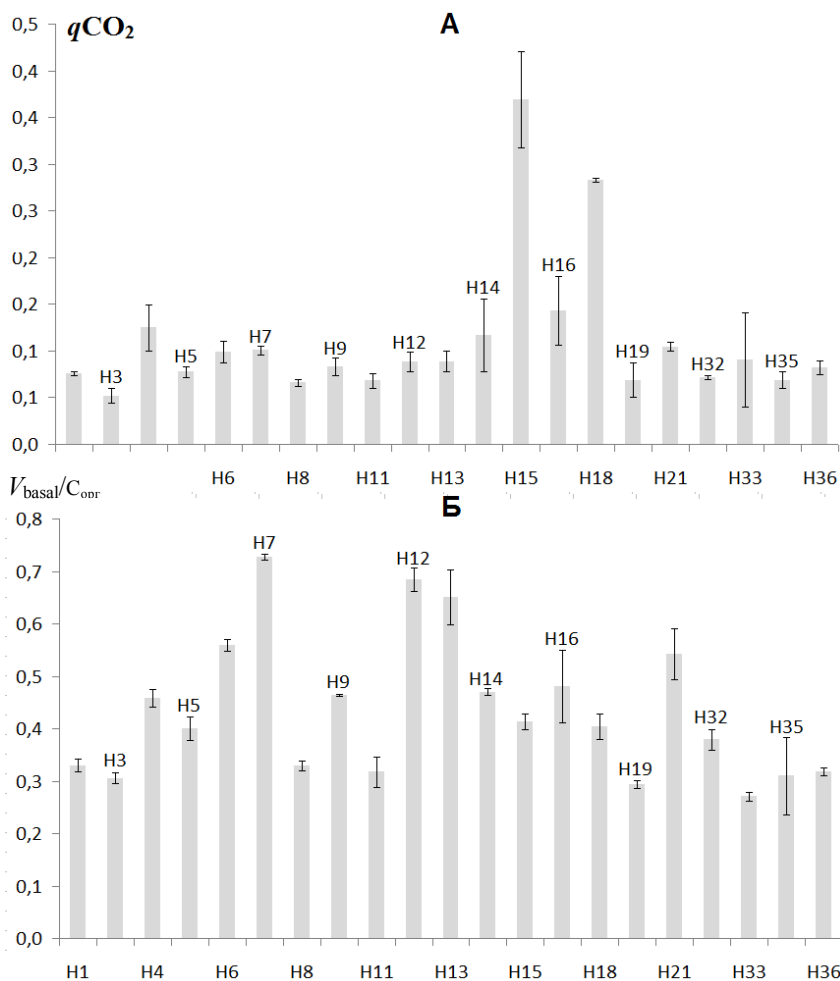


Рис. 4. Метаболический коэффициент qCO_2 (А), отношение базального дыхания к содержанию органического углерода (Б) в почвенных пробах с глубины 0–5 см на МП.

органического вещества к разложению, показал, что наименьшие значения зафиксированы в МП Воробьево (разр. Н18) – 0.266 мкг С/(г ч) и Садки (разр. Н33) – 0.270 мкг С/(г ч). Чем ниже значения V_{basal}/C_{org} , тем менее подвержено органическое вещество почв минерализации и соответственно более стабильно ([Мостовая](#)

[и др., 2015](#)). Наибольшие значения отмечены в Барском (разр. Н7) – 0.727 мкг С/(г ч) и на участках косимой и некосимой степи в заповеднике (разр. Н12 и Н13), 0.684 и 0.651 мкг С/(г ч) соответственно.

Для целей нашего исследования важно, что низкие значения удельной скорости базального дыхания означают уменьшение содержания легкодоступного субстрата в органическом веществе, которое может быстро разлагаться микроорганизмами, такие значения косвенно свидетельствуют об угнетенном состоянии микробного сообщества (в данном случае считали, что качество органического вещества одинаковое, так как почвы одного биоклиматического ряда).

В работе изучали содержание валовых форм ТМ (табл. 2). Повышенными концентрациями С_и выделяется МП Еремкин лог (разр. Н21); Zn – Резников Яр (разр. Н15); Zr – Барское (разр. Н7), Резников Яр (разр. Н15) и Косино (разр. Н15); Sn и Pb – Должик (разр. Н6) и Резников Яр (разр. Н15); As – Воробьево (разр. Н18). Лишь для одной из опробованных МП получена связь превышения ПДК с ингибированием микробного сообщества – это Резников Яр (разр. Н15), который характеризуется наибольшим содержанием Sr, Zn, Zr, Sn и Pb, коэффициент $q\text{CO}_2$ здесь составляет 0.369. В МП Воробьево (разр. 18), для которого получен высокий $q\text{CO}_2$ и наименьшая удельная скорость $V_{\text{basal}} = 0.375$, отмечается повышенное относительно других опробованных МП содержание As, но не превышающее ПДК. Коэффициенты корреляции содержания валовых форм ТМ для изученных МП с $q\text{CO}_2$ представлены в табл. 2. Выявлена средняя корреляция (более 0.5) между Sr и $q\text{CO}_2$, близкая к средней (0.44) для Со и слабые корреляции для остальных ТМ. Для других показателей корреляционный анализ показал слабые и очень слабые связи с содержанием ТМ, поэтому эти данные не приводятся.

Эксперименты с искусственными субстратами. Полученные результаты измерения дыхательной активности почв в нативных образцах не смогли в полной мере ответить на поставленные задачи. Несмотря на локальные превышения концентраций ТМ и некоторое угнетение микробного сообщества почв, о котором судили по интегральным показателям дыхательной активности, было не ясно, является ли перенос с воздушными массами пыли из

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов валовых форм

Название н.п.	№ МП	Li	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Zr	Mo	Cd	Sn	Sb	Cs	Ba	Pb
Романово	H1	26.0	110.0	57.0	9.5	32.0	25.0	67.0	6.7	100.0	180.0	1.10	0.36	3.60	2.30	4.0	390.0	24.0
Сенное	H3	27.0	110.0	54.0	9.5	29.0	18.0	57.0	7.1	91.0	160.0	1.00	0.27	2.50	0.63	4.1	340.0	21.0
Галичи	H4	29.0	120.0	55.0	11.0	31.0	18.0	63.0	5.7	110.0	160.0	0.85	0.25	2.50	0.54	4.4	360.0	23.0
Кленовенькое	H5	21.0	120.0	56.0	12.0	32.0	19.0	75.0	7.1	150.0	160.0	1.40	0.33	2.30	0.55	4.2	360.0	24.0
Должик	H6	26.0	110.0	50.0	11.0	30.0	20.0	74.0	6.4	100.0	180.0	0.93	0.71	12.00	1.90	3.8	400.0	30.0
Барское	H7	22.0	110.0	51.0	12.0	31.0	31.0	80.0	4.6	110.0	210.0	1.10	0.58	5.50	0.85	3.6	440.0	27.0
Водяное	H8	35.0	130.0	59.0	11.0	37.0	21.0	97.0	7.6	93.0	170.0	0.93	0.29	3.50	0.73	4.6	380.0	24.0
Хмелеватое	H9	27.0	110.0	53.0	9.2	28.0	17.0	54.0	5.7	91.0	180.0	0.78	0.25	2.50	0.57	3.7	350.0	22.0
Днище Суры	H11	18.0	63.0	71.0	8.3	26.0	26.0	78.0	4.9	110.0	140.0	1.70	0.41	1.90	0.67	3.3	320.0	18.0
Ямская плакор	H12	26.0	90.0	42.0	8.8	25.0	18.0	47.0	5.1	68.0	110.0	0.81	0.40	2.60	0.54	3.7	310.0	22.0
косиная	H13	22.0	90.0	46.0	8.7	25.0	17.0	45.0	5.8	68.0	110.0	0.81	0.32	2.30	0.54	3.5	300.0	21.0
некосиная	H14	27.0	120.0	54.0	13.0	34.0	20.0	57.0	6.1	110.0	170.0	1.20	0.36	2.70	0.59	4.3	410.0	26.0
Осинник	H15	24.0	110.0	55.0	13.0	35.0	25.0	85.0	6.2	170.0	200.0	0.95	0.54	6.40	1.90	4.1	420.0	28.0
Резников Яр	H16	22.0	110.0	53.0	13.0	32.0	22.0	61.0	6.0	110.0	210.0	0.97	0.34	2.30	0.57	3.7	420.0	24.0
Косино	H18	29.0	120.0	55.0	11.0	36.0	21.0	63.0	8.4	92.0	140.0	0.93	0.29	2.60	0.66	4.4	330.0	22.0
Воробьево	H19	29.0	120.0	57.0	12.0	34.0	19.0	58.0	7.6	100.0	180.0	0.86	0.29	2.50	0.61	4.3	400.0	24.0
Вислое	H21	21.0	89.0	94.0	11.0	38.0	34.0	73.0	7.8	110.0	230.0	3.00	0.29	2.50	0.68	3.9	390.0	20.0
Еремкин лог	H21	0.010	0.166	0.057	0.448	0.391	0.151	0.197	0.156	0.510	0.152	-0.113	0.227	0.212	0.302	0.219	0.208	0.316
Коэффициент корреляции с qCO_2																		
Пыль РУ		17	52	110	11	59	20	35	5.2	110	110	0.87	0.11	0.97	1.1	5.3	360	12
Пыль ГО ФОК		3.4	28	47	2.3	15	6.9	12	16	11	16	0.98	0.21	1.9	1.4	0.16	13	5.1

цехов и отвалов ГОК причиной ингибирования микробов в почвах МП. Поэтому, помимо исследований дыхательной активности нативных почв МП, провели два эксперимента с искусственными субстратами, которые основывались на определении скорости выделения CO_2 в специально полученной смеси почвы и пыли с высоким содержанием ТМ. Пыль брали из цехов Лебединского ГОКа; почву – с участка косимой степи (разр. Н12). В пыли, взятой для опытов, зафиксированы следующие концентрации ТМ (мкг/г): 28–52 V, 47–110 Cr, 15–59 Ni, 7–20 Cu, 12–35 Zn, 5.2–16 As, 11–110 Sr, 16–110 Zr, 5.1–12 Pb. Вариабельность содержания связана с тем, что в разных цехах пыль включала неодинаковые количества ТМ. В первом этапе эксперимента использовали пыль с условным названием РУ, во втором – ГО ФОК, содержание ТМ в них приведено в табл. 2.

Первый эксперимент включал в себя определение V_{basal} и V_{sir} в трех вариантах смесей: 90% почвы и 10% пыли, 50% почвы и 50% пыли, 10% почвы и 90% пыли при одинаковой навеске. Контролем к каждому варианту служили смеси прокаленной почвообразующей породы и той же почвы в тех же соотношениях: 90% почвы и 10% породы, 50% почвы и 50% породы, 10% почвы и 90% породы.

Второй эксперимент включал определение V_{basal} и V_{sir} в смесях, где к фиксированной навеске 5 г почвы добавляли по 1, 2, 3, 4, 5 г пыли. Контролем также служили смеси почвы и породы в тех же соотношениях. Дополнительным контролем для второго опыта являлись нативная почва, прокаленная порода и пыль. Во всех опытах повторность трехкратная.

В первом опыте стремились получить качественную реакцию, которая бы показала, каким образом загрязненная пыль влияет на дыхательную активность микробных сообществ. Выяснилось, что смесь прокаленной породы и почвы продемонстрировала ожидаемый результат: с повышением содержания породы, уменьшалась дыхательная активность вплоть до нулевых значений, когда в смеси 10% почвы и 90% породы V_{basal} составило 0.01, а V_{sir} – 0.08 мкг С/(г ч) (рис. 5). Это ожидаемый результат, поскольку при внесении в почву пустой или чистой (не загрязненной ТМ) породы происходит разбавление субстрата (в данном случае – нативной почвы), а, следовательно, нарушение среды обитания микрооргани-

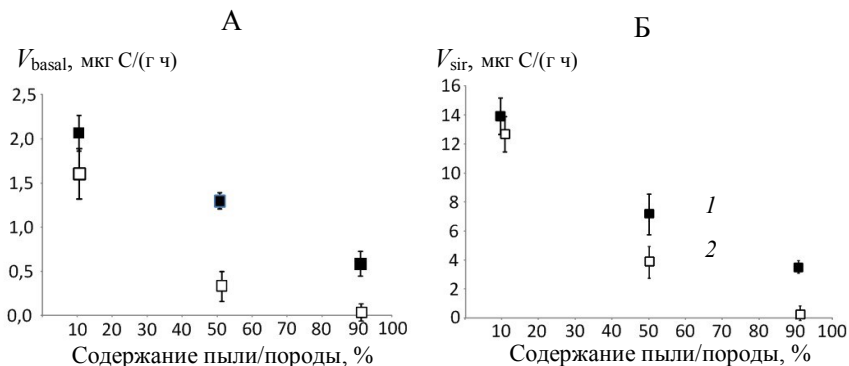


Рис. 5. Уровень базального (А) и субстрат-индуцированного (Б) дыхания в первом опыте с пылью, загрязненной ТМ, и чистой прокаленной породой: 1 – варианты с пылью, 2 – варианты с породой.

змов, интенсивность дыхания должна снижаться, что и наблюдали. В случае со смесью пыли, содержащей ТМ, и почвы наблюдалась такая же картина: чем больше становились пропорции пыли в почве, тем меньше выделение CO_2 как в нативной, так и в субстрат-индуцированной почве. Но здесь во всех трех вариантах выделение CO_2 происходило гораздо интенсивнее, чем в аналогичных в количественном отношении смесях почвы и породы. То есть в смесях с пылью, обогащенной ТМ, микроорганизмы не угнетались, а наоборот, показывали большую интенсивность дыхания, как базального, так и субстрат-индуцированного по сравнению с вариантами смесей с прокаленной породой, лишенной ТМ.

Второй этап эксперимента имитировал процесс постепенного накопления пыли в почве. Пошаговое повышение концентрации пыли в почве не проявлялось заметно в скорости базального дыхания и было практически одинаковым с чистой почвой (рис. 6А, сравниваем с вариантом 7) до тех пор, пока соотношение почва–пыль не достигло 1/1 (5 г почвы + 5 г пыли). Лишь в этом случае скорость выделения CO_2 заметно снизилась по сравнению с чистой почвой. При измерении скорости V_{sir} видно постепенное уменьшение этого показателя от 1 к 5 г добавленной в почву пыли (рис. 6Б), скорость V_{sir} начинает достоверно отличаться от дыхания чистой почвы уже начиная с варианта 3 г пыли на 5 г почвы. При этом варианты с чистой (без ТМ) породой показали постепен-

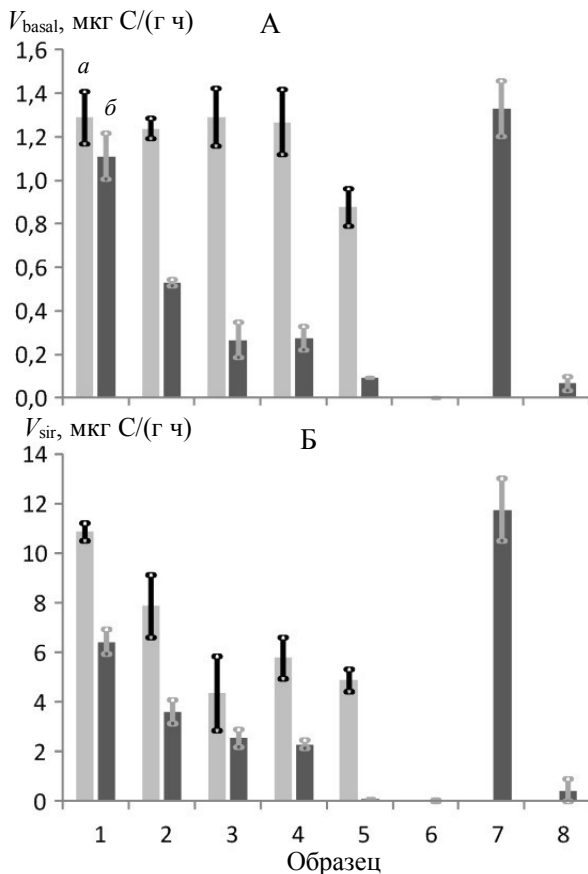


Рис. 6. Уровень базального (А) и субстрат-индуцированного (Б) дыхания во втором опыте с пылью, загрязненной ТМ, и чистой породой; образцы: 1, 2, 3, 4 и 5 – количество грамм пыли/породы, добавленное к 5 г почвы, 6 – контроль с прокаленной породой, 7 – контроль с почвой, 8 – контроль с пылью; *a* – варианты с пылью, *b* – варианты с прокаленной породой.

ное уменьшение скорости как базального, так и субстрат-индуцированного дыхания, и во всех вариантах уровень дыхания в смесях с породой был ниже, чем с пылью.

По сути, получили ту же картину, как и в опыте 1: в вариантах смесей с пылью, загрязненной ТМ, скорость дыхания была выше по сравнению с вариантами смесей с породой при том, что

“чистая” пыль и “чистая” порода в контролях (образцы 6 и 8 на рис. 6 соответственно) давали одинаковые и близкие к нулевым значения измеренияемых показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение нативных почв, отобранных на МП, не выявили зависимости базального дыхания от типа почвы, лишь слабо и единично – от типа землепользования. Вместе с тем, в некоторых случаях складываются стрессовые условия для микробного сообщества. Для них характерен максимум активности микробного сообщества и увеличении скорости минерализации органического углерода. Измерения валовых форм ТМ показали относительное (но не достигающее ПДК) превышение концентраций Cu, Zn, Zr, Sn, Pb, As.

Опыты с искусственными смесями подтвердили предположение о том, что добавление пыли, обогащенной ТМ, заметно сказывается на микробиологической активности, вызывая интенсификацию выделения CO₂, как в случае измерения скорости базального, так и субстрат-индуцированного дыхания.

В результате опытов с искусственными субстратами установлено, что однозначный и статистически достоверный вывод о превышении скорости дыхания микроорганизмов по сравнению с обычной незагрязненной почвой для изучаемого региона может быть получен при значительной концентрации пыли в почве, достигающей до уровня 3 г пыли на 5 г почвы, а лучше 5 г пыли к 5 г почвы (1 к 1), что трудно представить в природных условиях. Поэтому необходимо продолжить поиск более чувствительных индикаторов загрязнения изучаемых почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д., Мякишина Т.Н.* Характеристика состояния микробного сообщества по величине метаболического коэффициента // Почвоведение. 1995. № 2. С. 205–210.
2. *Девятова Т.А.* [Биоэкологические принципы мониторинга и диагностики загрязнения почв](#) // Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2005. № 1. С. 105–106.
3. *Евдокимова Г.А., Зенкова И.В.* [Влияние выбросов алюминиевого завода на биоту почв Кольского полуострова](#) // Почвоведение. 2003. № 8. С. 973–979.

4. Кабиров Р.Р., Сагитова А.Р., Суханова Н.В. Разработка и использование многокомпонентной тест-системы для оценки токсичности почвенного покрова городской территории // Экология. 1997. № 6. С. 408–411.
5. [Классификация и диагностика почв России](#). Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
6. Мостовая А.С., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хохлова О.С., Русаков А.В., Шаповалов А.С. [Изменение микробиологической активности серых лесных почв в процессе естественного лесовосстановления](#) // Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2015. № 2. С. 64–72.
7. Терехова В.А. Биоиндикация и биотестирование в экологическом контроле // Использование и охрана природных ресурсов в России. Информационно-аналитический бюл. 2007. № 1 (91). С. 88–90.
8. Филимонова Ж.В., Покаржевский А.Д., Зайцев А.С., Криволицкий Д.А., Фергуф С.К. [Экологические механизмы устойчивости почвенной биоты к загрязнению металлами](#) // Докл. РАН. 2000. Т. 370. С. 571–573.
9. Шунелько Е.В., Федорова А.И. Экологическая оценка городских почв и выявление уровня токсичности тяжелых металлов методом биотестирования // Вестн. Воронеж. гос ун-та. География и экология. 2000. №. 4. С. 77–83.
10. Яковлев А.С. Биологическая диагностика и мониторинг состояния почв // Почвоведение. 2000. № 1. С. 70–79.
11. Aceves M.B., Ansorena C.G.J., Dendooven L., Brookes P.C. [Soil microbial biomass and organic e in a gradient of zinc concentrations in soils around a mine spoil tip](#) // Soil Biol. Biochem. 1999. V. 31. P. 867–876.
12. Anderson T.H., Domsch K.H. [The metabolic quotient for CO₂ \(qCO₂\) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils](#) // Soils Biol. Biochem. 1993. V. 25. P. 393–395.
13. Berg C., Ekbohm G., Soederstroem B.E., Staaf H. [Reduction of decomposition rates of Scots pine needle litter due to heavy-metal pollution](#) // Water, Air Soil Pollution. 1991. V. 59. P. 165–178.

**DETECTION OF TOXICITY OF HEAVY METAL
POLLUTION IN SOILS BASED ON THEIR
RESPIRATORY ACTIVITY IN NATIVE SOILS
AND SIMULATED SUBSTRATES (A CASE-STUDY
OF THE PROTECTED AREA “YAMSKAYA STEPPE”)**

**N. O. Bakunovich¹, O. S. Khokhlova¹, T. N. Myakshina¹, A.
V. Rusakov², A. S. Shapovalov³**

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, 142290 Pushchino, Moscow region, ul. Institutskaya, 2*

²*Institute of Earth Sciences of Saint-Petersburg State University, Russia, 199178 Saint-Petersburg, Vasilevsky island, 16 line, 29*

³*State Natural Reserve "Belogorye", Russia, 309340 Belgorod region, urban settlement Borisovka, Monastyrsky pereulok, 3*

The area "Yamskaya Steppe" of "Belogorye" preserve is located in Belgorod Oblast near the concentration of mining factories: Lebedinskiy and Stoylenskiy mining and concentration complex (MCC), complexes of "KMA-ore" and Oskol metallurgical, TPP etc. Taking into account that the "Yamskaya Steppe" is a SPNR and along with that bears a significant technogenic burden, it is necessary to investigate the properties of dominating soils and to provide the assessment of its contamination by heavy metals (HM). The main purpose of the work was to assess the toxicity of contamination of the soils of "Yamskaya Steppe" by HM in correlation to the investigated respiration activity of microorganisms of native soils of monitoring areas (MA) and artificially created mixes of soils with the dust from shops of factories, containing high concentrations of HM. The investigation of the native soils did not show the correlation of the basal respiration and the type of the soil. However weak and single case showed the correlation of basal breath and the type land use. Only in two soils of the whole 21 soils from the investigated MA the signs of disturbance of functioning of microbial community were revealed. The measurement of the bulk forms of HM showed relative increase in concentrations of Cu, Zn, Zr, Sn, Pb, As on these MA. The experiments with artificial mixtures allowed us to conclude that the implementation of the dust with HM, taken from the shops of Lebedinskiy MCC, affect the microbial activity. That causes the intensification of CO₂ emission as incase of measuring of basal respiration rate and in case of substrata-induced respiration. However, that impact might be possible only in conditions of equal amount of the soil and dust in artificial mixtures, but this is impossible in natural conditions. It is necessary to find more sensitive indicators of HM contamination for the investigated soils.

Key words: heavy metals, contamination, chernozems, respiration activity of microbiocenosis, monitoring areas, nature and imitation experiments, Yamskaya Steppe.