

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.45.459:631.61

СОДЕРЖАНИЕ И ТОКСИЧНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
В ПОЧВАХ ЗОНЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ
КОМБИНАТА “ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ”*

© 2014 г. Г. А. Евдокимова, Н. П. Мозгова, М. В. Корнейкова

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН,
184209, Апатиты, Академгородок, 14
e-mail: galina@inep.ksc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2013 г.

В 2012 г. выполнено зонирование наземных экосистем в сфере воздействия воздушных выбросов комбината “Печенганикель” (Мурманская обл.) на основании состояния почвенного покрова: содержания в почве тяжелых металлов, обменных катионов кальция и магния, значений pH, соотношения органической и минеральной частей почвы и состояния почвенной микробиоты. Выделено 3 зоны, различающиеся по интенсивности загрязнения почв: сильного загрязнения – до 3 км от источника выбросов, среднего загрязнения – до 16 км, слабого загрязнения – до 25–30 км в юго-западном направлении. Загрязнение почвы в зоне воздействия газозвдушных выбросов комбината “Печенганикель” за последнее десятилетие не изменилось. Прослеживается прямая зависимость содержания бактерий и грибов в воздухе от их содержания в почве. Данные свидетельствуют о бактериальном загрязнении атмосферы около промышленного центра. В воздухе вблизи комбината доминируют Gr^- бактерии (*Gracilicutes*), в воздухе удаленных участков – Gr^+ бактерии (*Fermicutes*). Вблизи промышленного центра в воздухе выявлены потенциально-патогенные грибы *Gongronella butleri* и *Alternaria alternata*.

Ключевые слова: загрязнение почвы, тяжелые металлы, зонирование, микроорганизмы.

DOI: 10.7868/S0032180X14050049

ВВЕДЕНИЕ

На территории Мурманской обл. расположены два крупных медно-никелевых комбината: “Североникель” (г. Мончегорск, 1935 г.) в подзоне северной тайги и “Печенганикель” (г. Заполярный и п. Никель, 1940 г.) в лесотундре. В юго-западном направлении в 15 км от п. Никель в долине р. Паз по обе стороны государственной границы России и Норвегии расположена охраняемая территория – Государственный природный заповедник “Пасвик”.

Состояние наземных экосистем данного района исследовалось в 90-х годах прошлого столетия [4, 6–8]. В условиях аэротехногенного воздействия отмечено значительное накопление тяжелых металлов в почвах и растениях, изменение биогеохимических циклов и питательного статуса почв.

Целью настоящей работы явилось исследование современного состояния почв, почвенной и

воздушной биоты в зоне воздействия газозвдушных выбросов комбината “Печенганикель” по градиенту загрязнения, включая территорию заповедника “Пасвик”.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика участков. Экспедиционный выезд состоялся 18–21 июня 2012 г. после таяния снежного покрова, когда еще не произошло интенсивного промывания поллютантов из почв, характеризующихся промывным водным режимом. Выполнен отбор почвенных проб по градиенту загрязнения (трансекте) воздушными выбросами комбината “Печенганикель” в юго-западном направлении к заповеднику “Пасвик” с шагом 1–5 км. Общая протяженность градиента составила 50 км (рис. 1). Координаты участков и их описание приведены в табл. 1.

Почвы обследованной территории принадлежат к Al-Fe-гумусовым подзолам с содержанием в органогенном горизонте С орг 39.0–55.7%, N – 1.1–1.7%. Почва одного участка (35 км) была оха-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Живая природа: современное состояние и проблемы развития”.



Рис. 1. Точки отбора проб. Штриховкой показана территория государственного заповедника «Пасвик», точками – точки отбора проб (цифры – расстояние от комбината «Печенганикель», км). Основа карты: <http://pasvik.org.ru/publicat/flora/map1.gif>

рактирована как торфяно-подзол с содержанием С орг 59.7, N – 2.2%.

Почвенные пробы для химических анализов отбирали в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84. Брали 3 индивидуальные пробы из органогенного горизонта. Для микробиологических анализов в дальнейшем из этих проб готовили смешанный образец. Значения рН водной и солевой суспензий определяли потенциометрически, обменные катионы кальция и магния вытесняли ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 7.0 и определяли атомно-абсорбционным методом на Perkin-Elmer (PE-600). Потерю веса при прокаливании (ППП) определяли путем озонения пробы при температуре 450°C. Валовое содержание тяжелых металлов определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAS-30 после предварительного озонения и последующего разложения пробы концентрированной HNO_3 .

Микробиологические анализы выполнены в свежих почвенных пробах. Численность микроорганизмов различных эколого-трофических групп определяли методом посева на плотные селективные питательные среды: МПА – мясо-пептонный агар, КАА – крахмало-аммиачный агар, слабоминерализованную среду Аристовской, су-

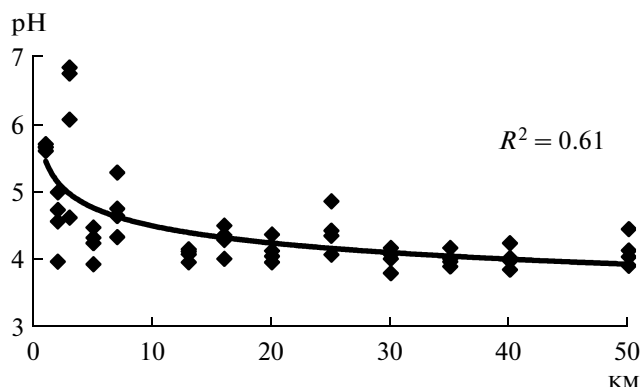


Рис. 2. Значения рН водной суспензии по градиенту загрязнения.

ло-агар с молочной кислотой. Расчеты численности бактерий и грибов проводили на сухую почву, прокаленную при температуре 105°C до постоянного веса.

Отбор проб воздуха над площадками осуществляли автоматическим пробоотборником ПУ-1Б, с принудительным осаждением микробов из воздуха на поверхность питательной среды МПА. Пропускали по 250 л воздуха на каждой площадке в трех разных точках.

Всего проанализировано 66 почвенных проб и 52 пробы воздуха. При отборе проб определяли температуру воздуха и почвы и ее влажность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения температуры и влажности почвы. Температура воздуха в период отбора проб (19–21 июня) изменялась в пределах двух градусов от 6.3 до 8.3°C; она практически сравнялась с температурой воздуха. Влажность подстилок лесных почв была на всех участках высокой, изменяясь в диапазоне 138–432% (мас.)

Изменение кислотности почвы по градиенту загрязнения. Значимым и относительно стабильным показателем состояния почвы является значение рН почвенной суспензии. Этот показатель на всех апробированных участках леса находится в кислотном диапазоне рН 4.02–4.30 (рис. 2). Однако вблизи комбината (до 3 км) почва менее кислая (значения рН близки к 6.0) в связи с оседанием здесь из промышленной пыли ряда элементов, в частности Са и Mg, оказывающих нейтрализующее действие.

Потеря веса при прокаливании. При прокаливании при температуре 450°C почва теряет воду, гумус, адсорбированные газы. Величина потери веса при прокаливании дает представление о соотношении органической и минеральной составляющих почвы. Вблизи комбината ППП низкая, то есть зольность верхнего слоя

Таблица 1. Характеристика участков по градиенту загрязнения от комбината “Печенганикель”

Расстояние от источника загрязнения, км	Координаты	Мощность гор. О, см	Характеристика участка
1	69°24'25" N 30°13'04" E	Почва эродирована	Ивняк с куртинами хвоща на эродированной почве (в черте города)
2	69°24'27" N 30°11'25" E	»	Березняк с редкими куртинами хвоща на эродированной почве
3	69°23'44" N 30°10'42" E	»	Сосняк брусничный с примесью березы
5	69°23'33" N 30°06'05" E	0–11	Сосняк кустарничковый с примесью березы. Напочвенный покров: вороника > брусника
7	69°24'35" N 30°03'24" E	0–5 (3)	Сосняк кустарничковый. Напочвенный покров: голубика > брусника > вороника
13	69°23'09" N 29°56'12" E	0–5 (7)	Сосняк кустарничковый с примесью березы. Напочвенный покров: вороника > голубика
16	69°21'45" N 29°52'28" E	0–10	Сосняк кустарничковый с примесью березы. Напочвенный покров: брусника > вороника > багульник
20	69°21'46" N 29°45'11" E	0–3 (7)	Сосняк кустарничково-моховый. В напочвенном покрове доминируют зеленые мхи и брусника
25	69°19'11" N 29°40'20" E	0–3	Сосняк брусничный с примесью березы. Напочвенный покров: брусника > багульник, лишайники
30	69°17'47" N 29°34'08" E	0–5 (7)	Сосняк брусничный с примесью березы. Напочвенный покров: брусника > багульник, лишайники
35	69°17'18" N 29°27'44" E	до 30	Сосняк вороничный с примесью березы. Напочвенный покров: вороника > брусника > багульник, лишайники
40	69°13'36" N 29°21'31" E	0–10 (15)	Сосняк кустарничково-зеленомошный. Напочвенный покров: черника > багульник > брусника, зеленые мхи
50	69°07'56" N 29°16'32" E	0–5	Сосняк лишайниково-кустарничковый. Напочвенный покров: голубика > черника > вороника, лишайники

почвы высокая (до 70%), в нем содержится много минеральных примесей, что обусловлено твердыми выпадениями и эрозией почвы. По мере удаления от комбината содержание органического вещества возрастает.

Содержание тяжелых металлов в почве. Кривые, характеризующие распределение валового содержания никеля и меди в органических горизонтах (рис. 3), отражают степенную зависимость количества этих элементов от расстояния при высокой значимости ($R^2 = 0.95–0.96$). На расстоянии 1 км от источника среднее содержание Ni в слое 0–5 см было более 3000 мг/кг, Cu – более 2000 мг/кг, что на два порядка превышало их содержание в фоновой почве – Cu – 26, Ni – 22 мг/кг. Наиболее резкое уменьшение содержания этих элементов наблюдается на протяжении первых 3–4 км от источника загрязнения. Среднее количество Cu в почве меньше, чем Ni в 1.2 раза (расчет выполнен по содержанию тяжелых металлов в почве на расстоянии до 25 км включительно).

Вблизи комбината выявлено повышенное содержание в почвах Co, Cr, Zn, Cd, Fe.

Четкая зависимость содержания приоритетных загрязнителей Cu и Ni в почве от расстояния от источника выбросов позволяет провести зонирование территории по градиенту загрязнения. Используя приведенные кривые в качестве номограмм, можно выделить 3 зоны, различающиеся по интенсивности загрязнения почв данными элементами (рис. 4).

Сильное или очень высокое (по системе, предложенной Обуховым с соавт. [11]) загрязнение, в 61–87 раз превышающее содержание Cu на фоновом участке и в 97–137 раз – Ni, распространяется на сравнительно небольшое расстояние (до 3 км) от источника загрязнения и в пределах этой достаточно узкой зоны резко уменьшается по мере удаления от комбината. Так, на отметке 5 км количество Ni в подстилке в 4.3 раза меньше, чем на отметке 1.0 км, Cu – меньше в 5.1 раза. По мере удаления от завода контрастность содержания Cu и Ni в зависимости от расстояния уменьшается.

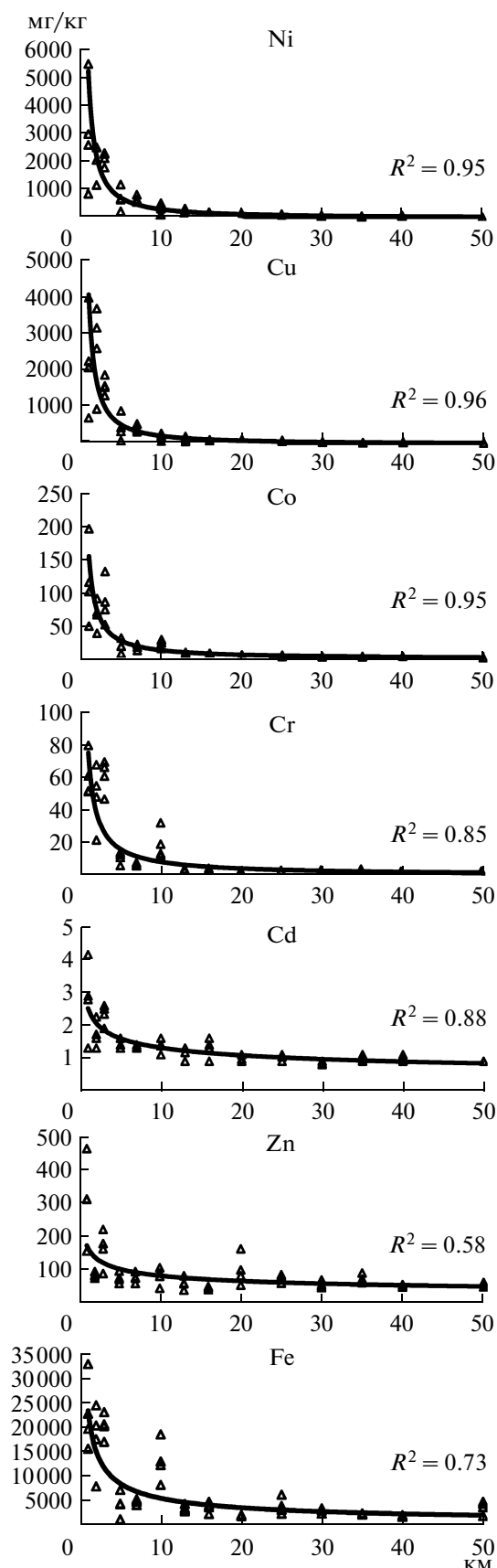


Рис. 3. Содержание тяжелых металлов в почве по градиенту загрязнения, мг/кг.

Зона среднего загрязнения распространяется до 16 км, причем и на ее протяжении продолжается довольно значительное уменьшение содержания в почве Cu (от 17 до 4 раз) и Ni (от 32 до 8 раз) по сравнению с фоном. В пределах зоны слабого загрязнения (16–25–(30) км) содержание Cu не превышает четырехкратной величины по сравнению с фоном, содержание Ni – семикратной. Однако если рассчитать эти соотношения относительно существующих ПДК – Cu – 100, Ni – 50 мг/кг [12], то превышения содержания Cu в этой зоне мы не выявим, а Ni – достигнет трехкратной величины.

Таким образом, северная часть заповедника “Пасвик” подвержена воздействию газовоздушных выбросов комбината “Печенганикель”, особенно это касается соединений Ni.

Оценка степени токсичности почв. Для оценки фитотоксичности почвы мы применили обоснованный ранее “физико-химический” критерий – отношение суммы содержания обменных катионов Ca и Mg (мг/кг) к валовому содержанию тяжелых металлов в почве (мг/кг) [1]. Материалы полевых опытов свидетельствуют о сильном влиянии ионов Ca на биогенную миграцию Cu и Ni в растения, когда на почвах, идентичных по степени загрязнения, но отличающихся содержанием обменных катионов, различается биомасса растений и их качество.

В нетоксичной для растений подзолистой почве отношение (Ca + Mg)/Cu находится в диапазоне 30–180, а отношение (Ca + Mg)/Ni – 20–90. Загрязнения металлами растений выше допустимых норм на таких почвах не происходит. Почва, в которой отношение (Ca + Mg)/Cu меньше 10, а (Ca + Mg)/Ni меньше 5, не пригодна для выращивания растений.

Почвы на расстоянии 1–5 км от источника выбросов отнесены по этой шкале к сильнотоксичным (табл. 2). Почвы зоны 7–25 (до 30) км отнесены к разряду слаботоксичных для растений. Почвы, удаленные от источника выбросов на 30 км и более входят в разряд нетоксичных почв.

Копчик с соавт. [6] отмечали, что содержание Ni и Cu в непосредственной близости к комбинату “Печенганикель” составляло 2000–2600 мг/кг, а почва была токсичной для растений на расстоянии до 25–35 км. Следовательно, мы можем констатировать, что загрязнение почвы в зоне воздействия газовоздушных выбросов названного предприятия не уменьшилось за последнее десятилетие, но и не возросло.

Главным источником загрязнения атмосферного воздуха микроорганизмами является почва. Известно, что воздушная среда обитания не благоприятна для развития микроорганизмов из-за недостаточного количества питательных ве-

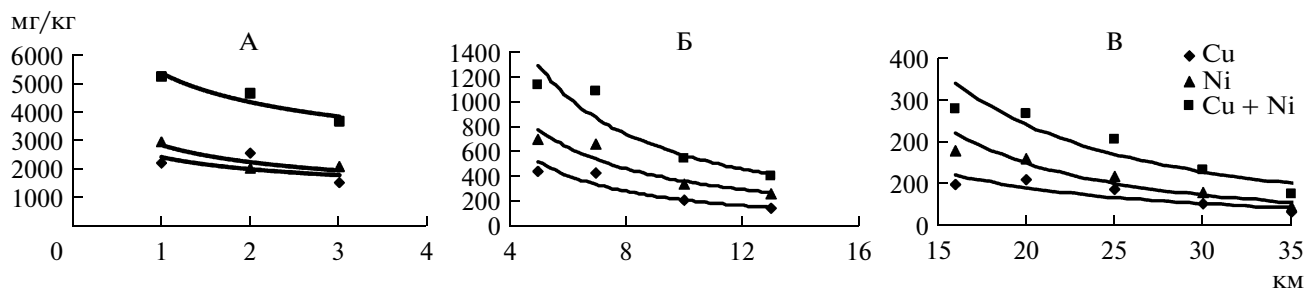


Рис. 4. Распределение содержания меди и никеля по зонам загрязнения (средние величины). А, Б, В – зоны сильного, среднего и слабого загрязнения соответственно.

ществ, ультрафиолетового облучения и нехватки влаги. Однако как бактерии, так и грибы способны длительный период сохранять свою жизнеспособность в воздухе.

Численность бактерий в воздухе в пределах 3 км от комбината составляла 100–600 колониеобразующих единиц в 1 м³, что свидетельствует о бактериальном загрязнении воздуха вблизи промышленного центра (рис. 5). Этому способствует почва урбанизированных территорий, эродированная и без наземной растительности. По мере удаления от города число бактериальных клеток в воздухе уменьшалось до 8–40 КОЕ/м³, что свидетельствует о бактериологической чистоте воздуха в лесных экосистемах. В воздухе вблизи комбината доминируют Gr⁻ бактерии (отдел *Gracilicutes*), в воздухе удаленных участков – Gr⁺ бактерии (отдел *Fermicutes*).

Количество грибов в воздухе вблизи города было меньшим, чем на удаленных площадках в

лесных экосистемах. Возможно, на чашки при заборе воздуха в лесу попадали эпифитные грибы, вовлекаемые потоком воздуха с поверхности растений. Вблизи промышленного центра в воздухе встречались потенциально-патогенные грибы *Gongronella butleri* (Lendn.) Peyronel et Dal Vesco и *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl.

По градиенту от источника выбросов была прослежена динамика численности, трофического разнообразия бактерий и таксономического разнообразия микроскопических грибов в почве. Распределение численности сапротрофных бактерий в почве хорошо согласуется с подобным показателем для воздушной среды. Относительно низкая продуктивность фитоценозов в высоких широтах и, вследствие этого, обедненность почв питательными элементами определяет олиготрофность микроорганизмов (рис. 6). Эта группа бактерий, довольствующихся малым количеством питательных элементов, наиболее представительна в исследованных почвах. Чис-

Таблица 2. Оценка степени токсичности почв, 2012 г.

Степень токсичности почвы	Расстояние от источника, км	Обменные Ca + Mg	Cu	Ni	Ca + Mg/Cu	Ca + Mg/Ni
		мг/кг				
Сильнотоксичная	1	4171	2268	3009	2	1
	2	4735	2615	2083	2	2
	3	5632	1587	2143	4	3
	5	3504	447	696	8	5
Слаботоксичная	7	6510	426	664	15	10
	10	6509	205	336	32	19
	13	3688	139	265	26	14
	16	3660	99	182	37	20
	20	2770	110	160	25	17
	25	2685	87	121	31	22
Нетоксичная	30	2494	53	82	47	30
	35	5280	33	45	162	116
	40	3749	46	74	81	50
	50	1476	26	22	56	67

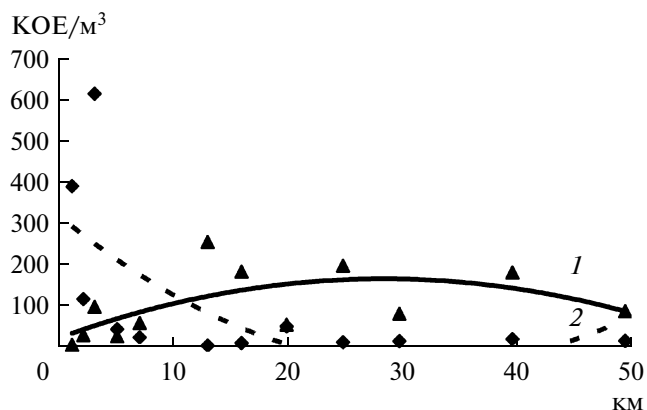


Рис. 5. Численность бактерий (1) и грибов (2, КОЕ/м³) в воздухе по градиенту загрязнения от комбината «Печенганикель».

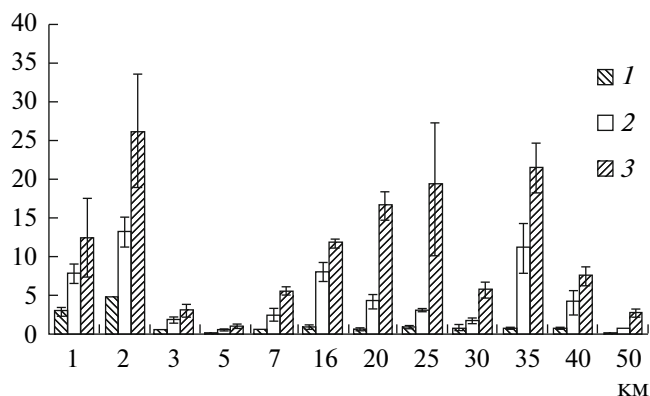


Рис. 6. Численность бактерий (млн/г, $M \pm m$, среднее и ошибка среднего) в почве по градиенту загрязнения: 1 – сапротрофных, 2 – использующих минеральный азот, 3 – олиготрофных.

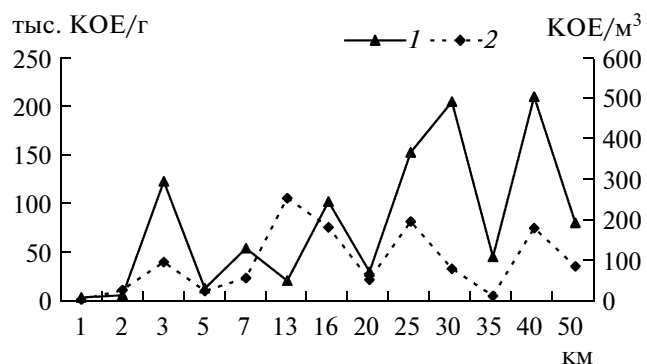


Рис. 7. Численность грибов в почве (1, тыс. КОЕ/г) и в воздухе (2, КОЕ/м³).

ленность сапротрофных бактерий, использующих органические формы азота, в несколько раз ниже.

Грибы играют важную роль в процессах трансформации органического вещества в почвах, аккумуляции тяжелых металлов и уменьшении ме-

таллотоксикиза почв, выполняют средорегулирующие функции в почве. Четко прослеживается прямая зависимость численности грибов в воздухе от их содержания в почве (рис. 7).

Наши исследования дополняют выводы ряда микологов [3, 5, 9, 10] о возрастании доли потенциально-патогенных грибов в техногенно-трансформированных почвах. Их доля от общего количества видов, выделенных из почв, загрязненных тяжелыми металлами, соединениями фтора или нефтепродуктами возрастает на 15–20% относительно фоновых значений. К грибам, способным вызывать заболевания дыхательных путей, микозы и аллергические реакции, относятся следующие виды, выделенные из изучаемых почв: *Acremonium rutilum* W. Gams, *Aspergillus fumigatus* Fresen., *A. niger* var. *niger* Tiegh., *A. terreus* var. *terreus* Thom, *A. ustus* (Bainier) Thom et Church, *Aureobasidium pullulans* (de Bary) G. Arnaud, *Cladosporium cladosporioides* (Fresen.) G. A. de Vries, *Oidiodendron flavum* Svlv., *O. griseum* Robak, *Penicillium aurantio-griseum* Dierckx, *P. canescens* Sopp, *P. chrysogenum* Thom, *P. glabrum* (Wehmer) Westling, *Talaromyces purpurogenus* (Stoll) Samson, Yilmaz, Frisvad, *P. simplicissimum* (Oudem.) Thom, *Phialophora melinii* (Nannf.) Conant, *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.) Vuill., *Trichoderma koningii* Oudem., *Tr. viride* Pers.

В целом численность бактерий и грибов в лесных почвах исследованных площадок соответствует показателям численности в приграничных лесных почвах Северной Фенноскандии [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование почв, почвенной и воздушной биоты по градиенту загрязнения газозагрязненными выбросами комбината «Печенганикель» общей протяженностью 50 км в юго-западном направлении, включая территорию государственного природного заповедника «Пасвик».

Прослеживается четкое распределение содержания тяжелых металлов (Cu, Ni, Co, Cd, Cr, Zn) в почве по градиенту загрязнения. Кривые, характеризующие распределение валового содержания приоритетных загрязнителей Ni и Cu в органических горизонтах, отражают степенную зависимость количества этих элементов от расстояния при высокой степени значимости. Вблизи комбината (до 3 км включительно) содержание приоритетных элементов (Cu и Ni) в почве превосходит фоновый уровень на два порядка. Выделено 3 зоны, различающиеся по интенсивности загрязнения почв: сильного загрязнения – до 3 км от источника выбросов, среднего загрязнения – до 16 км, зона слабого загрязнения до 25–30 км в юго-западном направлении. При сравнении результатов с ранее полученными данными других исследователей (13 лет назад) можно констатиро-

вать, что загрязнение почвы в зоне воздействия газоздушных выбросов комбината “Печенганикель” не сократилось за последнее десятилетие, но и не возросло. Северная часть заповедника “Пасвик” подвержена воздействию выбросов комбината, особенно соединений никеля.

Численность бактерий и грибов в лесных почвах исследованных площадок соответствует показателям численности в приграничных лесных почвах Северной Фенноскандии. Относительно невысокая продуктивность северных фитоценозов и обедненность почв питательными элементами привела к доминированию олиготрофных бактерий в микробном сообществе. Прослеживается прямая зависимость содержания бактерий и грибов в воздухе от их содержания в почве. Данные свидетельствуют о бактериальном загрязнении атмосферы вблизи промышленного центра с доминированием здесь бактерии отдела *Gracilicutes*. Вблизи промышленного центра в воздухе выявлены потенциально-патогенные грибы *Gongronella butleri* и *Alternaria alternata*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евдокимова Г.А.* Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. 272 с.
2. *Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П.* Микроорганизмы тундровых и лесных подзолов Кольского Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. 184 с.
3. *Зачиняева А.В., Лебедева Е.В.* Микромицеты загрязненных почв Северо-Западного региона России и их роль в патогенезе аллергических форм микозов // Микология и фитопатология. 2003. Т. 37 (5). С. 69–74.
4. *Кашулина Г.М.* Аэротехногенная трансформация почв Европейского Субарктического региона. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. Ч. 1. 158 с.
5. *Киреева Н.А., Мифтахова А.М., Бакаева М.Д., Водопьянов В.В.* Комплексы почвенных микромицетов в условиях техногенеза. Уфа: Гилем, 2005. 360 с.
6. *Копцик Г.Н., Недбаев Н.П., Копцик С.В., Павлюк И.Н.* Загрязнение почв лесных экосистем тяжелыми металлами под влиянием атмосферных выбросов комбината “Печенганикель” // Почвоведение. 1998. № 8. С. 988–995.
7. *Лукина Н.В., Никонов В.В.* Биогеохимические циклы в лесах севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. Ч. 2. 192 с.
8. *Макарова Т.Д., Смирнов Д.Ю., Фролова В.* Состояние природно-территориальных комплексов в районах предприятий цветной металлургии. Атлас карт. М.—Мурманск, 1999. С. 42–43.
9. *Марфенина О.Е.* Антропогенная экология почвенных грибов. М.: Медицина для всех, 2005. 196 с.
10. *Марфенина О.Е., Фомичева Г.М.* Потенциально патогенные мицелиальные грибы в среде обитания человека. Современные тенденции // Микология сегодня / Под ред. Ю.Т. Дьякова, Ю.В. Сергеева. М.: Национальная академия микологии, 2007. Т. 1. С. 235–268.
11. *Обухов А.И., Ефремова Л.Л.* Охрана и рекультивация почв, загрязненных тяжелыми металлами // Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы. М., 1988. Ч. 1. С. 23–35.
12. *Kloke A.* Tolerable amounts of heavy metals in soil and their accumulation in plants // Environmental effects of organic and inorganic contaminants in sewage sludge. Dordrecht, Netherlands, 1983. P. 171–175.