

УДК 631.46

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТУНДРОВЫХ ПОЧВ ЧУКОТСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2022 г. Н. В. Фокина^а, *, М. В. Корнейкова^а, В. В. Редькина^а, В. А. Мязин^а, Т. А. Сухарева^а

^аИнститут проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение
ФГБУН Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук”,
мкр. Академгородок, 14А, Анапиты, Мурманская обл., 184209 Россия

*e-mail: nadezdavf@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.2021 г.

После доработки 30.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

Выполнено эколого-микробиологическое исследование почвы на территории поселка Беринговский Чукотского автономного округа. Установлено, что функционирование на близлежащей территории угольного склада, а также хозяйственно-бытовая деятельность привели к сильному изменению природной тундрово-глеевой почвы. В нарушенной почве произошло изменение рН в сторону нейтральной или слабощелочной реакции, уменьшение содержания обменного водорода, азота, углерода органических соединений, доступных соединений калия и натрия, отмечено превышение фоновых значений содержания подвижных форм тяжелых металлов для Ni, Cu, Mn, Fe, Zn и установленных ПДК для Cu, Zn. В почве поселка в органогенном горизонте наблюдается снижение ферментативной активности, определенной колориметрическим методом. Численность культивируемых сапротрофных и олиготрофных бактерий в верхнем горизонте измененной почвы больше, чем в фоновой в 2–10 раз, тогда как численность микроскопических грибов психрофилов и мезофилов меньше в 38 и 9 раз соответственно. В нарушенной почве выявлены грибы – термофилы, относящиеся к условно-патогенным видам, а также бактерии группы кишечной палочки. Отмечено увеличение разнообразия микромицетов в почве поселка и изменение структуры грибного сообщества. В почве исследуемой территории обнаружено 45 видов водорослей и цианобактерий. На загрязненной территории разнообразие микрофототрофов значительно больше, чем на фоновой, за счет желто-зеленых и диатомовых водорослей, а также цианобактерий.

Ключевые слова: микроорганизмы, ферменты, Histic Cryosols, угольная промышленность, Арктика

DOI: 10.31857/S0032180X2201004X

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что почва является одним из основных компонентов биосферы и тесно связана как с атмосферой, так и с гидросферой. Изменение химических и физических свойств почв неизбежно отражается на численности и составе почвенной микробиоты, основная функция которой – деградация органических веществ и обеспечение нормального существования биоценозов и экосистемы в целом. Кроме того, эффективно функционирующая почвенная микробиота обуславливает самоочищающую способность почв, благодаря которой возможно восстановление нарушенных территорий без участия человека [10].

Микробиота арктических регионов отличается от микробиоты более южных районов рядом специфических черт, обусловленных особенностями среды их обитания: мезо- и психротолерантностью, олиготрофностью, низким видовым разнообразием, высокой продуктивностью микробиоты в течение полярного лета, уменьшением диаметра грибного мицелия, редукцией жизненного цикла и доминированием форм стерильного мицелия среди культивируемых грибов [19, 33, 34].

Непосредственное влияние на формирование сообществ микроорганизмов тундрово-глеевых почв оказывают такие их свойства, как: 1 – небольшая интенсивность минерализации и гумификации растительных остатков, с чем связано преобладание грубого гумуса в верхних горизонтах почв; 2 – неблагоприятные для биоты химические свойства – высокая кислотность верхних горизонтов, бедность обменными основаниями и низкая емкость катионного обмена; 3 – относительно невысокая адсорбирующая поверхность почв, содержащих в своем составе в основном песчаные частицы; 4 – высокая степень увлажнения.

Непосредственное влияние на формирование сообществ микроорганизмов тундрово-глеевых почв оказывают такие их свойства, как: 1 – небольшая интенсивность минерализации и гумификации растительных остатков, с чем связано преобладание грубого гумуса в верхних горизонтах почв; 2 – неблагоприятные для биоты химические свойства – высокая кислотность верхних горизонтов, бедность обменными основаниями и низкая емкость катионного обмена; 3 – относительно невысокая адсорбирующая поверхность почв, содержащих в своем составе в основном песчаные частицы; 4 – высокая степень увлажнения.

ния; 5 – небольшой объем фитомассы, бедной минеральными элементами и азотом и отягощенной труднорастворимыми соединениями [5, 9].

Хозяйственно-бытовая и производственная деятельность человека приводят к изменению химических и физических свойств почв, что в свою очередь оказывает влияние на численность и структуру сообществ микроорганизмов и может снижать способность загрязненной территории к восстановлению [3]. Особенно остро это проявляется в урбанизированных районах Арктики и Субарктики, где наложение антропогенных процессов на естественные процессы почвообразования приводит к резкому снижению биологической активности почв [40]. Восстановление почвенного покрова после сокращения или даже прекращения антропогенного воздействия на участках поселений в условиях Севера происходит крайне медленно и зачастую требует проведения рекультивации.

Цель работы – оценка биологической активности и химических свойств антропогенно-измененной почвы южных гипоарктических тундр на территории расселенного поселка Беринговский в Чукотском автономном округе.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика района исследований. Район исследований – территория расселенного поселка Беринговский и одноименного морского порта, расположенного в бухте Угольная Анадырского залива Берингова моря. Постоянного населения в поселке нет более 20 лет. На территории порта осуществлялось складирование и погрузка угля, добываемого на шахте Нагорная. В процессе эксплуатации (1941–2015 гг.) на месторождении добыто более 16 млн т рядового угля марки Г (среднезольного, среднесернистого, среднешлакуемого с высокой загрязняющей способностью; по склонности к окислению отнесен к неустойчивым с повышенной активностью к окислению) [4]. Уголь в течение зимнего периода складировался в накопительные склады, а в летнюю навигацию поставлялся потребителям. С 2015 г., после закрытия шахты Нагорная, прекращены работы по перевалке угля в порту. В результате длительного антропогенного воздействия в районе исследования отмечается сильное изменение почвенно-растительного покрова.

По ботанико-географическому районированию исследованная территория относится к подзоне южных гипоарктических тундр (кустарничковые олиготрофные тундры с ерником, на горных склонах нередки заросли ольховника) на границе с подзоной средних гипоарктических тундр (с содоминированием гипоарктических и арктоальпийских кустарничков) [32].

В районе исследования преобладают тундровые торфянисто-глеевые почвы (Histic Reductaquic Cryosols). Названия почв даны по Мировой реферативной базе почвенных ресурсов (World reference base – WRB) [27]. Эти почвы развиваются на моренных, морских и древнеаллювиальных отложениях тяжелого или среднего гранулометрического состава: глинах и суглинках. Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на образование тундровых почв, является наличие многолетней мерзлоты на небольшой глубине, что ведет к замедлению химических и биологических процессов превращения почвенных минералов и органических остатков [14, 22, 28].

Почвы исследованных участков относятся к описанному выше типу и имеют простое строение: A_0 – оторфованная подстилка мощностью несколько сантиметров, состоит из полуразложившихся остатков мхов, лишайников и листьев; Al_g – грубогумусово-аккумулятивный горизонт, оглеенный, серый или темно-серый, неясно оструктуренный, со слабыми признаками комковатости, рыхлый, мощностью 5–7 см; G – глеевый минеральный горизонт, серовато-сизый, бесструктурный, плотный. Переход в почвообразующую породу на глубине 40–60 см.

Отбор образцов. Отбор почвенных образцов проводили в октябре 2018 г. на трех участках, расположенных на территории бывшего поселка, и на условно фоновом участке в трехкратной повторности из органогенного слоя почвы 0–5 см (табл. 1, рис. 1). Участки находились на разном удалении от источников загрязнения (угольный склад и бывшая котельная поселка) и имели различную степень нарушенности.

Определение химических свойств почвы. Для оценки загрязнения почвы тяжелыми металлами (Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn) использовали значения гигиенических нормативов СанПиН 1.2.3685-21 и условно фоновых концентраций. Для оценки качества почвы и ее обеспеченности макроэлементами анализировали содержание C, N, Ca, Mg, K, Na, Al. Почвенные образцы высушивали при комнатной температуре, удаляли все включения и новообразования (в том числе корни растений), а затем просеивали. Аналитической обработке подвергали мелкозем (фракция <1.0 мм). Химический анализ почвы выполняли согласно общепринятым методам [2].

Актуальную кислотность (pH) в органогенном горизонте почвы измеряли потенциометрически в водной суспензии согласно ГОСТ 26423-85, используя соотношение почвы и вытеснителя как 1 : 25. Обменную кислотность определяли в вытяжке 1 М KCl по методу А.В. Соколова, гидролитическую кислотность – в вытяжке 1 М CH_3COONH_4 (pH 7.0) [38]. Использовали те же соотношения почвы и вытеснителя, что и при

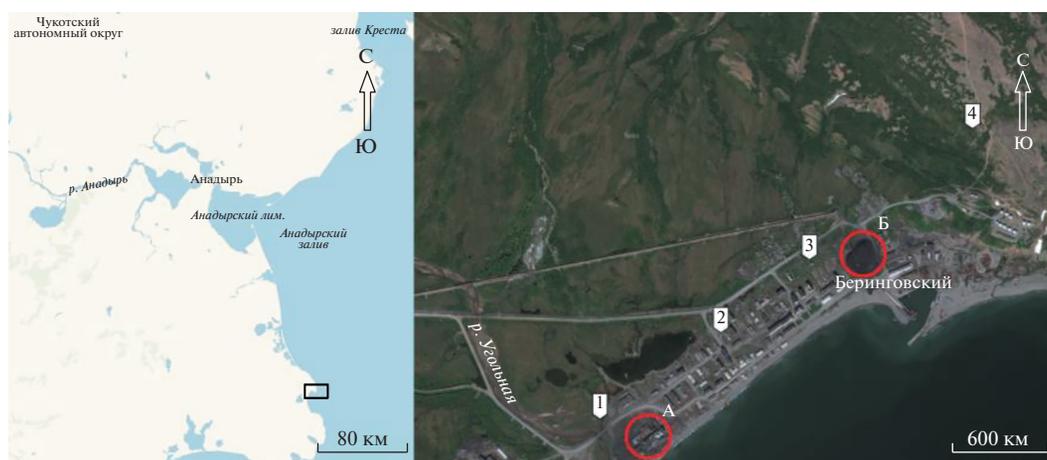


Рис. 1. Участки отбора почвенных образцов здесь и далее: 1–3 – территория поселка Беринговский; 4 – условно фоновая территория.

определении рН. Полученные суспензии оставляли на ночь, затем встряхивали в течение 2 ч на ротаторе и фильтровали. Для определения содержания доступных соединений элементов питания образцы почвы обрабатывали 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$

(рН 4.65) [42]. Для почвенных образцов использовали те же соотношения почвы и вытеснителя, что и при определении рН. Концентрации подвижных форм элементов (Al, Fe, Ca, Mg, K, Mn, Zn, Cu, Ni, Na) определяли методом атомно-аб-

Таблица 1. Характеристика участков отбора проб

№ участка	Координаты	Характеристика участка
1	63°03'34.9" N, 179°20'31.1" E	Участок у дороги вблизи бывшей котельной поселка Беринговский; почвы торфянисто-глеевые, органогенный горизонт сильно деградирован; растительность представлена разреженными группировками открытого типа с преобладанием куртин вейника пурпурного (<i>Calamagrostis purpurea</i>), овсяницы овечьей (<i>Festuca ovina</i>) и ситников (<i>Juncus</i> spp.); моховой покров не формирует сомкнутую дернину – представлен разреженно расположенными отдельными побегами мхов-пионеров – <i>Polytrichum piliferum</i> , <i>Pohlia nutans</i> и др.
2	63°03'45.6"N, 179°21'07.7" E	Участок вблизи бывшего жилого дома; почвы торфянисто-глеевые; органогенный горизонт нарушен, появляются отдельные пятна сомкнутого мохового покрова, где доминируют <i>Sanionia uncinata</i> , <i>Ceratodon purpureus</i> и <i>Niphotrichum canescens</i> ; появляются сорно-рудеральные виды (<i>Trifolium repens</i> , <i>Viccia cracca</i> , <i>Barbarea vulgaris</i> и т. д.); отмечены единичные экземпляры лишайников <i>Cetraria islandica</i> , <i>Stereocaulon alpinum</i> , <i>S. glareosum</i> , <i>S. tomentosum</i> и <i>Thamnolia subuliformis</i>
3	63°03'56.2" N, 179°21'33.9" E	Участок вблизи угольного склада; почвы торфянисто-глеевые, органогенный горизонт нарушен; в растительном покрове наряду с сорно-рудеральными видами, характерными для участка 2, появляются “аборигенные” виды – вороника (<i>Empetrum subholarcticum</i>), багульник (<i>Ledum palustre</i>), иван-чай (<i>Chaetaenerion angustifolium</i>) и полынь (<i>Artemisia</i> spp.)
4	63°04'14.1" N, 179°22'24.5" E	Условно фоновый участок на расстоянии 700 м от поселка Беринговский; почвы торфянисто-глеевые, органогенный горизонт мощностью 10 см; растительность представлена сообществами с участием ольхового стланика (<i>Duschetkia kamtschatica</i>), рододендрона золотистого (<i>Rhododendron aureum</i>), вороники, арктоуса (<i>Arctous alpina</i>), разнотравьем (<i>Artemisia arctica</i> , <i>Solidago compacta</i>), зелеными мхами (<i>Sanionia uncinata</i> , <i>Polytrichum alpinum</i>) и лишайниками рода <i>Cladonia</i>

сорбционной спектрофотометрии, содержание N – по методу Кьельдаля, содержание углерода органических соединений – по методу Тюрина.

Аналитические исследования почвенных проб проведены в Центре коллективного пользования физико-химических методов анализа Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр”.

Оценка степени химического загрязнения почвы выполнена в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21, которые устанавливают требования к качеству почв населенных мест и соблюдение гигиенических нормативов при эксплуатации объектов различного назначения, в том числе тех, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на состояние почв.

Определение микробиологических параметров. Микробиологические анализы выполняли стандартными методами: посевом на плотные селективные питательные среды и прямым микроскопированием [13]. Численность культивируемых сапротрофных бактерий изучали на мясо-пептонном агаре, численность олиготрофных бактерий – на слабоминерализованной среде Аристовской; численность энтеробактерий – на специализированной лактозо-пептонной среде и среде Кода. Оценка санитарного состояния почвы и грунта проводилась в соответствии с СанПиН 2.1.3684-21. Численность грибов-сахаролитиков выявляли методом посева на сусло-агар с добавлением молочной кислоты для подавления роста бактерий. Расчеты численности культивируемых бактерий и грибов проводили на абсолютно сухую почву, высушенную при 105°C до постоянного веса.

Учитывая климатические условия изучаемой территории, учитывали численность разных групп микромицетов по отношению к температурному фактору. Психрофилы инкубировали при температуре 5°C, мезофилы – при 27°C, термофилы – при 37°C. Термофильные грибы изучали с целью выявления условно-патогенных (оппортунистических) видов, которые могут представлять опасность для здоровья населения, вызывая различные заболевания.

Анализ таксономического разнообразия грибов выполняли на основе культурально-морфологических признаков с использованием определителей [35]. Видовые названия уточняли по базе данных Index Fungorum (2021 г.).

Общую численность и биомассу бактерий, а также биомассу и длину мицелия микроскопических грибов изучали методом флуоресцентной микроскопии (Olympus CX41) с использованием темноокрашенных поликарбонатных фильтров Nucleopor Black с диаметром пор 0.2 мкм и краси-

теля акридиновый оранжевый – для бактерий и фильтров с диаметром пор 0.8 мкм и красителя FITC – для грибов по методике Olsen, Novland [42].

Для исследования таксономического состава цианобактериально-водорослевых ценозов использовали метод посева почвенного мелкозема и почвенной суспензии на агаризованную среду, а также культивирование в жидких питательных средах 3N-BBM и Z8 [6]. Определение видов проводили в накопительных или чистых, полученных методом выделения с помощью стеклянных капилляров, культурах. Идентификацию осуществляли по культурально-морфологическим признакам с использованием микроскопа Olympus CX41 с камерой Jenoptik ProgRes при увеличении $\times 1000$ с масляной иммерсией по классическим определителям [1, 36]. Для уточнения названий видов водорослей и их систематической принадлежности использовали электронную базу данных Algae-base [37].

Графы сходства видового состава комплексов микроскопических грибов и цианобактериально-водорослевых ценозов почвы изучаемых участков строили на основе коэффициентов Серенсена–Чекановского (средние расстояния) с помощью программного модуля “GRAPHS” [23].

Определение ферментативной активности почв. Оценивали три гидролитических (инвертаза, уреазы, фосфатазы) и один окислительно-восстановительный (дегидрогеназа) ферменты.

Активность инвертазы в почве определяли колориметрически по методу Хоффмана и Паллауфа, основанном на способности глюкозы и фруктозы, образующихся в результате гидролиза сахарозы, восстанавливать CuO до Cu₂O [25]. Дегидрогеназную активность устанавливали колориметрическим методом, основанном на восстановлении бесцветной соли 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида до красного трифенилформаза [7, 25]. Активность фосфатазы оценивали колориметрически по методу Дубовенко, используя в качестве субстрата фенолфталеин фосфат натрия [11, 25]; активность уреазы – колориметрически с реактивом Несслера по методу Щербаковой [25].

Статистическая обработка данных. Математическую обработку проводили с помощью общепринятых статистических методов с использованием пакетов программ Microsoft Excel и Statistica. Для сравнения химических свойств почв на различных участках применяли непараметрический дисперсионный анализ Краскела–Уоллиса (H-критерий).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кислотность и химический состав почвы. Кислотность почвы на территории поселка достигала значений 6.2–7.4 единиц pH, в то время как зна-

Таблица 2. Показатели кислотности почвы исследуемых участков

№ участка	рН _{водный}	Н _г	ОК	Al _{обм}	Н _{обм}
		смоль(+)/кг			
1	6.19 ± 0.01	9.39 ± 0.06	0.13 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.07 ± 0.01
2	7.49 ± 0.01	6.73 ± 0.05	0.07 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.05 ± 0.01
3	7.40 ± 0.01	68.10 ± 0.51	0.42 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.12 ± 0.01
4	5.18 ± 0.01	126.12 ± 1.50	13.73 ± 0.02	12.58 ± 0.07	1.15 ± 0.06

Примечание. рН_{водный} – актуальная кислотность, ОК – обменная кислотность, Al_{обм} – обменный алюминий, Н_{обм} – обменный водород, Н_г – гидролитическая кислотность. Здесь, в табл. 3 и 4 приведены средние значения (± стандартная ошибка среднего).

Таблица 3. Содержание химических элементов в почве

№ участка	C _{орг} , %	N, г/кг	Подвижные формы									
			Ca, г/кг	K	Na	Al	Fe	Mn	Zn	Pb	Cu	Ni
				мг/кг								
1	8.8 ± 0.1	3.0 ± 0.2	2.2 ± 0.1	149 ± 2	144 ± 1	240 ± 3	1578 ± 3	97 ± 1	12.9 ± 0.2	1.97 ± 0.13	3.70 ± 0.13	2.30 ± 0.02
2	5.8 ± 0.2	2.1 ± 0.1	4.7 ± 0.1	275 ± 2	121 ± 2	192 ± 2	551 ± 10	104 ± 7	19.9 ± 0.1	2.29 ± 0.15	2.55 ± 0.01	0.53 ± 0.02
3	23.0 ± 0.3	7.4 ± 0.4	10.5 ± 0.1	734 ± 9	168 ± 1	210 ± 5	304 ± 40	874 ± 8	27.6 ± 0.9	2.44 ± 0.17	1.70 ± 0.01	1.29 ± 0.13
4	31.2 ± 0.1	14.2 ± 0.4	1.6 ± 0.1	641 ± 24	314 ± 4	2792 ± 27	639 ± 5	14 ± 1	3.4 ± 0.4	5.34 ± 0.10	0.11 ± 0.01	0.09 ± 0.02

чение рН условно фонового участка 5.2 (табл. 2) (Н_{3,12} = 9.63, *p* < 0.05), что соответствует показателям для тундровых торфянисто-глеевых почв данного региона [26].

Гидролитическая кислотность (Н_г) почвы на территории поселка варьировала от 6.63 (на участке 2) до 68.10 (на участке 3), что в 2 и более раза меньше по сравнению с условно фоновыми значениями (Н_{3,12} = 10.38, *p* < 0.05). Снижение гидролитической кислотности обусловлено, вероятно, уменьшением содержания органического вещества вследствие нарушения растительного покрова, прекращения поступления свежего растительного опада, а также развития эрозионных процессов и деградации органогенного горизонта почвы на участках 1, 2 и 3. Аналогичная закономерность была выявлена в почвах Мурманской области в условиях атмосферного загрязнения выбросами медно-никелевого предприятия [16].

Обменная кислотность (ОК) (Н_{3,12} = 10.38, *p* < 0.05), содержание обменного водорода (Н_{обм}) (Н_{3,12} = 10.42, *p* < 0.05) и обменного алюминия (Al_{обм}) (Н_{3,12} = 10.42, *p* < 0.05) антропогенно-нарушенной почвы характеризуются чрезвычайно низкими значениями, что может свидетельствовать о замедлении процессов биогенного кислотообразования в почве обследованной территории и поступлении в почву оснований.

Почва на территории поселка характеризуется низким содержанием биогенных элементов, на-

трия (Н_{3,12} = 10.76, *p* < 0.01) и алюминия (Н_{3,12} = 10.38, *p* < 0.05), но высоким содержанием кальция (Н_{3,12} = 10.42, *p* < 0.05) (табл. 3), что непосредственно связано с уменьшением кислотности на этих участках.

Проведено сравнение содержания подвижных форм меди, никеля и свинца в органогенном горизонте почвы со значениями ПДК. Содержание меди превышает значения ПДК (3.0 мг/кг) на участке 1. На участках 2 и 3 превышения ПДК не зафиксировано, но отмечено многократное увеличение концентрации меди по сравнению с условно фоновой территорией (Н_{3,12} = 10.76, *p* < 0.01). Превышение ПДК подвижных форм цинка (23 мг/кг) выявлено только в почве на участке 3. Концентрации подвижных форм никеля в антропогенно-нарушенной почве превышают условно фоновые значения (0.03–0.20 мг/кг) (Н_{3,12} = 10.38, *p* < 0.05), но существенно меньше максимально допустимых значений ПДК (4.0 мг/кг). Концентрации подвижных форм свинца в почвах обследованной территории не превышают условно фоновых значений (2.09–5.62 мг/кг) и максимально допустимых значений ПДК (6 мг/кг). Содержание марганца в почве на всех антропогенно-трансформированных участках превышает фоновые значения в 6–64 раза (Н_{3,12} = 9.73, *p* < 0.05). Максимальная концентрация железа отмечена на участке 1 и превышает фоновые значения в 2.5 раза (Н_{3,12} = 10.38, *p* < 0.05).

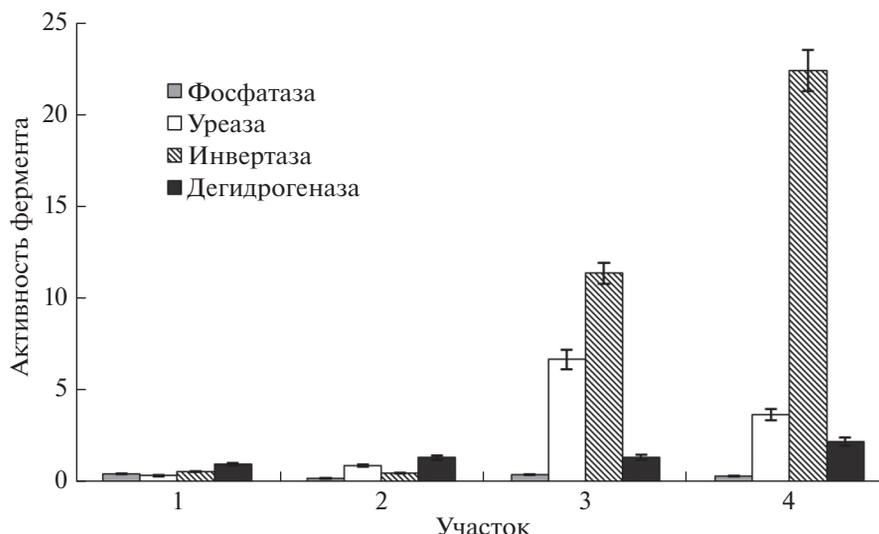


Рис. 2. Активность фосфатазы (мг ФФ/г за 18 ч), уреазы (мг NH₄/г за 18 ч), инвертазы (мг глюкозы/г за 18 ч) и дегидрогеназы (мг ТФФ/10 г за 24 ч) в образцах почвы. Планками погрешностей обозначена ошибка среднего.

Максимальное содержание железа, меди и никеля отмечены в почве на участке 1, который находится вблизи бывшей котельной поселка. Высокое содержание меди отмечено также в почве на участке 2, расположенном вблизи бывшего жилого дома. Можно предположить, что основной причиной загрязнения почвы в поселке стала эксплуатация угольной котельной, а именно загрязнение почвы продуктами сгорания угля и вымывание солей тяжелых металлов из золошлакоотвала [18, 24, 29], а также длительное захламенение территории поселка металлическим ломом в большом количестве.

В почве на участке 3, расположенном вблизи угольного склада порта Беринговский, отмечено наибольшее из обследованных участков содержание цинка и марганца, что может быть следствием вымывания этих металлов из массы угля при его длительном хранении на открытом складе. Кларковое содержание марганца в углях составляет 100 ± 6 и 75 ± 5 г/т для бурых и каменных углей соответственно. При этом были выявлены обогащенные рассматриваемым элементом угли России (1.0–1.69 кг/т), Испании (1.48 кг/т), Украины (1.64 кг/т) и некоторых других стран [31]. Товарные угли России также характеризуются широким диапазоном концентраций цинка. Его содержание в отдельных шахтах Сахалинского бассейна составляет 800 г/т [12]. Высокое содержание данных металлов в почве также тесно связано с количеством в ней органического вещества, которое способно связывать их в устойчивые формы [15]. Их повышенное содержание на участке 3 может быть обусловлено более высоким содержанием органического вещества в почве этого участка.

Характер распределения тяжелых металлов в почве на территории поселка позволяет предположить, что основной вклад в загрязнение почвы внесла длительная эксплуатация котельной на угле со средней и высокой зольностью, и размещение на территории порта угольного склада. Это привело к накоплению в почве меди, никеля, марганца и цинка. Неравномерное распределение загрязняющих веществ на территории населенных пунктов, расположенных вблизи объектов угольной промышленности, было отмечено в работе других исследователей [24].

Биологическая активность почвы. Повышенные концентрации элементов-загрязнителей и изменение почвенной кислотности могут обуславливать снижение биологической активности антропогенно-трансформированной почвы [3].

Активность почвенных ферментов. Почва территории поселка Беринговский обладала меньшей ферментативной активностью по сравнению с фоновой почвой. В почве участков 1 и 2 отмечена очень низкая активность гидролитических ферментов инвертазы и уреазы, участвующих в углеводном и азотном обмене (рис. 2). Активность инвертазы не превышала 0.59 ± 0.07 мг глюкозы/г, активность уреазы – 0.91 ± 0.11 мг NH₄/г. Активность фосфатазы, которая осуществляет биологическую мобилизацию органического фосфора, была минимальной в почве участка 2 (0.21 ± 0.03 мг ФФ/г).

Активность дегидрогеназы, которая является показателем интенсивности микробиологического разложения веществ, на этих участках была в 2.4 раза меньше, чем в почве условно фонового участка.

Почва на участке 3, который находился вблизи угольного склада, характеризовалась более высоки-

Таблица 4. Количественные показатели микробных сообществ почвы

№ участка	Бактерии					Микроскопические грибы				
	сапротрофные	олиготрофные	энтеробактерии, тыс. кл/г	общая численность, 10^{10} кл/г	биомасса, мг/г	психрофилы	мезофилы	термофилы	длина мицелия	биомасса
	млн кл/г					КОЕ/г			м/г	
1	0.33 ± 0.13	0.53 ± 0.06	13 ± 1	1.31 ± 0.10	0.53 ± 0.04	7.0 ± 1.0	240 ± 50	5.0 ± 0.1	129 ± 23	0.14 ± 0.03
2	0.91 ± 0.41	2.01 ± 0.71	74 ± 10	1.32 ± 0.09	0.51 ± 0.03	93.0 ± 33.0	160 ± 30	10.1 ± 0.1	651 ± 34	0.72 ± 0.04
3	4.37 ± 0.96	5.44 ± 1.05	530 ± 24	1.54 ± 0.09	0.60 ± 0.04	6.0 ± 1.0	1180 ± 470	6.1 ± 1.0	822 ± 15	0.93 ± 0.02
4	0.44 ± 0.26	1.31 ± 0.65	34 ± 1	1.41 ± 0.08	0.56 ± 0.03	1353 ± 69	4880 ± 1470	—	730 ± 25	0.81 ± 0.03

ми значениями активности инвертазы и уреазы — 11.39 ± 1.50 мг глюкозы/г и 6.69 ± 0.82 мг NH_4 /г соответственно. Активность фосфатазы сопоставима с условно фоновым значением и составляла 0.44 ± 0.05 мг ФФ/г. Дегидрогеназная активность составляла 1.36 мг ТФФ/10 г, что в 1.7 раза ниже, чем в почве фонового участка.

Таким образом, по шкале сравнительной оценки биологической активности почв на основе активности ферментов [8] почвы участков 1 и 2 относятся к категории с очень слабой биологической активностью, а почвы с участка 3 и с фонового участка — к категории со средней биологической активностью.

Бактерии. Численность культивируемых сапротрофных бактерий в тундровых торфянисто-глеевых почвах побережья Чукотки невысокая, колеблется в пределах от 330 тыс. кл/г до 4.4 млн кл/г. Численность бактерий олиготрофной группы изменяется от 528 тыс. кл/г до 5.4 млн кл/г. Во всех образцах олиготрофы преобладают над сапротрофами (табл. 4). Как известно, олиготрофы составляют значительную часть микробиоты в почве, в которую поступает свежее, бедное азотом органическое вещество. Численность олигонитрофилов в микробных ценозах доходит до максимума в подзолистых и тундрово-глеевых почвах, что свидетельствует о большой роли этой группы бактерий в генезисе почв данного ряда. Также высокая численность мелкоколониальных олиготрофных форм является адаптивным признаком урбаноземов, имеющих повышенные щелочность среды и концентрации подвижных форм тяжелых металлов [3, 20]. Наибольшего значения численность бактерий достигает в почве участка 3 на территории поселка. Этот участок отличается наличием мохового покрова и самым высоким значением рН (табл. 2) — условиями, более благоприятными для развития бактерий. Численность всех трофических групп бактерий в антропогенных грунтах на территории поселка достоверно больше, чем в образце тундрово-глеевой почвы условно фонового участка, за исключением участка 1, отличающегося

ся наиболее сильным изменением органогенного горизонта и растительных сообществ.

Бактерии, способные к росту на питательных средах, являются наиболее реакционным компонентом бактериоценоза и способны быстро отзываться на изменения окружающей среды. Их реакция может выражаться как в изменениях структуры сообщества, включая изменения соотношения количества эколого-трофических групп, так и в величине размаха кратковременных колебаний численности. Как правило, с повышением уровня загрязненности среды, возрастает доля культивируемых форм бактерий. Метод флуоресцентной микроскопии позволяет учитывать как живые, так и мертвые клетки всех групп бактерий, по разным данным составляющие от 30 до 40% от общего числа клеток, в том числе и некультивируемых на питательных средах, за исключением ультрамелких форм бактерий [20]. Значения общей численности и биомассы бактерий, полученные методом прямого счета, демонстрируют лишь незначительное их превышение в почве участка 3, в то время как численность культивируемых форм бактерий на данном участке на порядок превышает таковую в почве фоковой территории.

Так как почва является одной из главных составляющих природной среды обитания человека, контроль микробиологического загрязнения урбаноземов очень важен с точки зрения инфекционной опасности для здоровья человека.

Энтеробактерии выделены во всех исследуемых образцах, в том числе в почве условно фоковой территории. Однако бактерии группы кишечной палочки, культивируемые на специализированной лактозо-пептонной среде, обнаружены только в почве на территории поселка.

Титр бактерий группы кишечной палочки позволяет отнести почвы на территории поселка к умеренно опасным. Это согласуется с данными, полученными по урбостратифицированным и загрязненным естественным почвам других регионов [3].

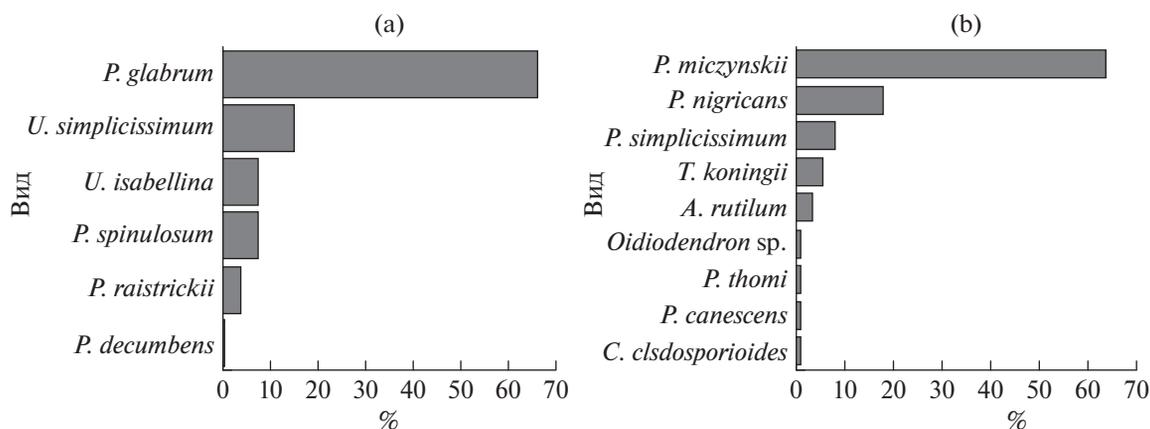


Рис. 3. Структура сообществ почвенных микроскопических грибов (на основании индекса обилия, %) в почве: а – почва условно фоновой территории; б – нарушенная почва на территории поселка Беринговский (средние данные по трем участкам). Роды грибов: *A.* – *Acremonium*, *C.* – *Cladosporium*, *P.* – *Penicillium*, *T.* – *Trichoderma*, *U.* – *Umbelopsis*.

Микроскопические грибы. Численность микроскопических грибов – психрофилов и мезофилов в нарушенной почве поселка составляла в среднем 35 и 527 КОЕ/г соответственно – меньше, чем в почве условно фоновой территории в 38 и 9 раз. Столь значительное угнетение сообществ микромицетов на антропогенном участке свидетельствует о сильном отрицательном воздействии на экосистему. Причиной уменьшения численности микромицетов может быть изменение pH почвы до нейтральных и слабощелочных значений, когда возникают благоприятные условия для развития бактерий.

Грибы – термофилы, большинство из которых относятся к группе условно патогенных для человека, не выявлены на фоновом участке, тогда как на территории поселка их численность составила 5–10 КОЕ/г. Условно патогенные грибы, присутствующие в почве, могут вызывать микозы эндогенного и экзогенного характера, заболевания дыхательной системы и другие у людей с ослабленным иммунитетом.

Длина и биомасса грибного мицелия достоверно не различались на исследованных участках. Их уменьшение отмечено только для участка 1 – в 5.7 раза по сравнению с условно фоновой почвой. Сравнение результатов посева с данными, полученными методом прямого счета, свидетельствует о наибольшем угнетении микромицетов в почве участка 1, в то время как в почве участков 2 и 3 грибы развиваются преимущественно в виде некультивируемого мицелия (табл. 4).

Несмотря на низкую численность микромицетов, их видовое разнообразие в нарушенной почве богаче по сравнению с фоновой, в основном за счет появления случайных видов (рис. 3). В условно фоновой почве разнообразие микромицетов

представлено 6 видами, относящимися к родам *Penicillium*, *Umbelopsis*, тогда как в загрязненной – 9 видами, принадлежащими рр. *Penicillium*, *Oidiodendron*, *Trichoderma*, *Acremonium*, *Cladosporium*.

Выявлены различия в структуре доминирования грибных сообществ сравниваемых участков. Так, в почве поселка абсолютным доминантом является вид *Penicillium miczynskii*, тогда как на условно фоновой территории – *P. glabrum*. Виды с наибольшим индексом обилия в условно фоновой почве относились к группе психрофилов, что вполне логично ввиду природно-климатических особенностей района исследований. Однако на нарушенной территории в группу доминирующих видов входили грибы, относящиеся к мезофилам. Причиной этого может быть наличие “острова тепла” в городах, особенно ярко выраженного в арктическом регионе, что стимулирует развитие группы грибов, характерных для более южных районов. Такая тенденция была ранее отмечена нами и рядом других исследователей [17, 21, 43].

Наибольшее сходство видового состава комплексов микроскопических грибов характерно для двух антропогенно-измененных участков (1 и 3), о чем свидетельствует дендрограмма сходства. Условно фоновый участок и участок 2 выделяются в отдельные кластеры, что свидетельствует о специфичности видового состава сообществ микромицетов на этих участках (рис. 4).

Среди выделенных видов четыре относились к группе условно-патогенных. Некоторые из них (*Penicillium miczynskii*, *P. simplicissimum*) имели высокую встречаемость, что позволяет предположить их возможное отрицательное воздействие на здоровье человека.

Водоросли и цианобактерии. В исследуемой почве всего было обнаружено 45 видов водорослей и

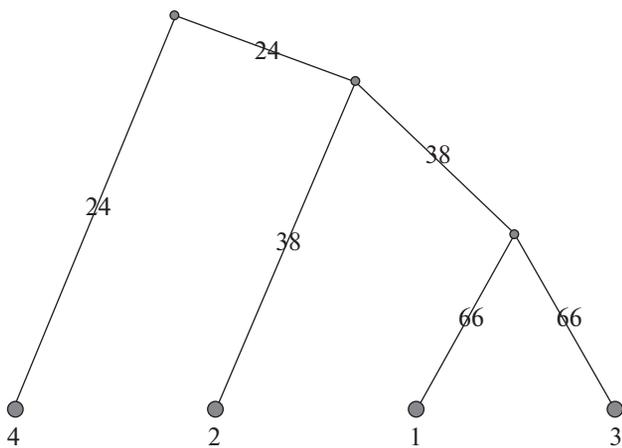


Рис. 4. Дендрограмма сходства видового состава комплексов микроскопических грибов различных участков.

цианобактерий, принадлежащих к четырем отделам (табл. 5): Chlorophyta (классы Chlorophyceae, Trebouxiophyceae) – 23 вида, Ochrophyta (классы Bacillariophyceae, Xanthophyceae) – 13 видов, Cyanobacteria – 7 видов, Charophyta (классы Klebsormidiophyceae, Conjugatophyceae) – 2 вида.

Низкие значения коэффициента Серенсена-Чекановского свидетельствуют о малом сходстве цианобактериально-водорослевых ценозов раз-

личных участков. Наибольшее сходство (32%) отмечено для участков 2 и 3.

Наименьшее количество видов (9) обнаружено в условно фоновой почве. Микрофототрофы здесь представлены преимущественно одноклеточными зелеными водорослями из классов Chlorophyceae и Trebouxiophyceae (рис. 5). Преобладание водорослей из отдела Chlorophyta, невысокое их разнообразие часто характерно для северных подзолистых почв под тундровой и лесной растительностью [39].

В остальных образцах разнообразие микрофототрофов значительно выше и достигает количества 14–16 видов. Видовое разнообразие растет за счет заметного участия желто-зеленых и диатомовых водорослей, а также цианобактерий.

Известно, что в почвах урбанизированных территорий, в том числе загрязненных тяжелыми металлами, формируются своеобразные сообщества водорослей и цианобактерий, которые отличаются по таксономическому составу, комплексу доминирующих видов, экологической структуре, а также по численности и биомассе [3, 40]. При этом часто отмечается рост разнообразия микрофототрофов, что объясняется эффектом “промежуточного нарушения”, при котором максимальное разнообразие сохраняется при средней интенсивности воздействия нарушающих факторов. В некоторых случаях при загрязнении почвы может наблюдаться рост значений рН. При этом известно, что синезеленые

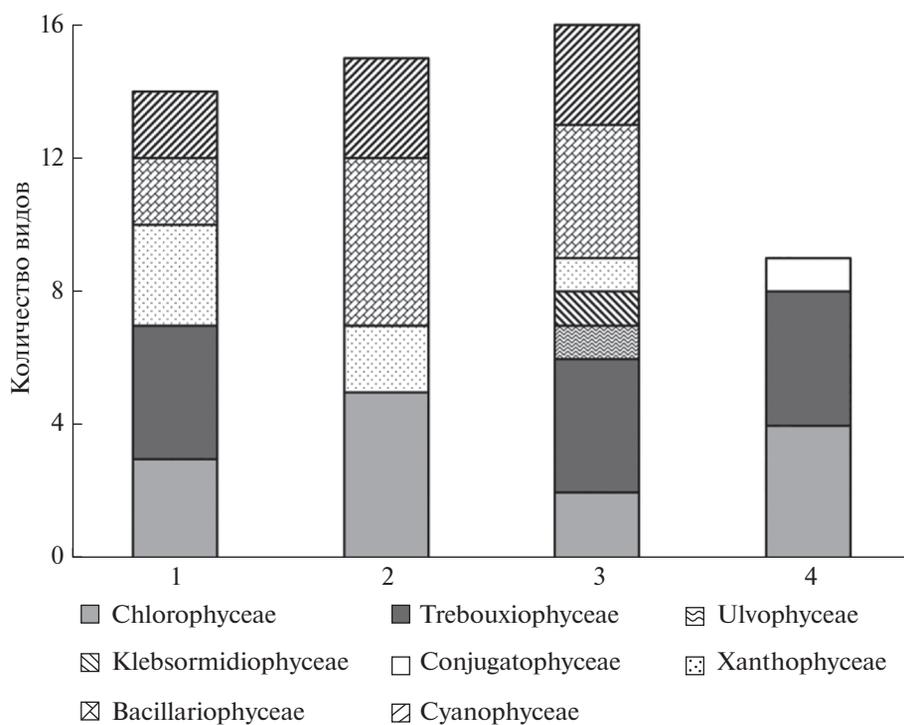


Рис. 5. Таксономическая структура цианобактериально-водорослевых сообществ.

Таблица 5. Водоросли и цианобактерии, обнаруженные в почве

Вид	№ участка			
	1	2	3	4
Отдел Charophyta, класс Klebsormidiophyceae				
<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kützing) P.C. Silva, K.R. Mattox & W.H. Blackwell			+	
<i>Koliellopsis inundata</i> Lokhorst	+			
Отдел Charophyta, класс Conjugatophyceae				
<i>Mesotaenium pyrenoidosum</i> (P.A. Broady) Petlovany				+
Отдел Chlorophyta, класс Chlorophyceae				
<i>Bracteacoccus</i> cf. <i>minor</i> (Chodat) Petrov		+		
<i>Chlamydocapsa lobata</i> Broady	+			
<i>Chlamydomonas</i> spp.	+	+		+
<i>Myschonastes</i> sp.		+		+
<i>Neocystis</i> sp.		+	+	
<i>Palmellopsis gelatinosa</i> Korshikov				+
<i>Spongiochloris</i> sp.			+	
<i>Sporotetras polydermatica</i> (Kützing) Kostikov, Darienko, Lukesová & L. Hoffmann				+
<i>Tetracystis</i> sp.		+		
Отдел Chlorophyta, класс Trebouxiophyceae				
<i>Chloroidium saccharophilum</i> (W. Krüger) Darienko, Gustavs, Mudimu, Menendez, Schumann, Karsten, Friedl & Proschold	+			
<i>Elliptochloris bilobata</i> Tschermak-Woess				+
<i>Leptosira</i> sp.			+	
<i>Myrmecia bisecta</i> Reisingl			+	
<i>Parachlorella</i> sp.	+			
<i>Pseudococcomyxa simplex</i> (Mainx) Fott			+	
<i>Pseudococcomyxa</i> sp.				+
<i>Stichococcus bacillaris</i> Nägeli	+	+	+	+
<i>Stichococcus minutus</i> Grintzesco & Peterfi				+
Отдел Chlorophyta, класс Ulvophyceae				
<i>Fernandinella alpina</i> Chodat			+	
Отдел Ochrophyta, класс Bacillariophyceae				
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenberg) Grunow in Cleve & Grunow		+	+	
<i>Luticola</i> cf. <i>muticopsis</i> (Van Heurck) D.G. Mann		+		
<i>Luticola mutica</i> (Kützing) D.G. Mann		+		
<i>Navicula</i> spp.		+	+	
<i>Nitzschia brevissima</i> Grunow	+			
<i>Nitzschia</i> cf. <i>nana</i> Grunow in Van Heurck			+	
<i>Nitzschia inconspicua</i> Grunow	+			
<i>Pinnularia borealis</i> Ehrenberg			+	
Отдел Ochrophyta, класс Xanthophyceae				
<i>Botrydiopsis constricta</i> Broady	+	+		
<i>Botrydiopsis eriensis</i> J.W. Snow	+			
<i>Heterococcus</i> sp.	+			
<i>Xanthonema exile</i> (Klebs) P.C. Silva		+	+	
Отдел Cyanobacteria, класс Cyanophyceae				
<i>Aphanocapsa</i> sp.		+		
<i>Leptolyngbya</i> sp.			+	
<i>Microcoleus autumnalis</i> (Gomont) Strunecky, Komárek & J.R. Johansen			+	
<i>Nostoc</i> spp.	+	+	+	
<i>Tolypothrix</i> sp.		+		
<i>Trichormus</i> sp.	+			

Примечание. Знак “+” обозначает наличие вида.

и диатомовые водоросли предпочитают нейтральную или слабощелочную реакцию среды. Выделяемая цианобактериями слизь служит препятствием для проникновения в клетки токсичных веществ, а также является благоприятной средой для развития других групп водорослей [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно говорить о высокой степени антропогенной нарушенности территории, являющейся следствием как промышленного, так и хозяйственно-бытового воздействия на почвенный покров. Отмечено превышение фоновых концентраций в десятки раз для ряда тяжелых металлов (Ni, Cu, Mn, Fe, Zn). Содержание углерода, азота и калия в почве антропогенно нарушенных территорий снижено по сравнению с условно фоновыми значениями. О комплексном отрицательном влиянии на экосистему хозяйственной деятельности говорят тенденция к увеличению численности культивируемых бактерий различных трофических групп и разнообразия микрофототрофов, угнетение сообществ микромицетов, а также низкая ферментативная активность в нарушенной почве на территории поселка Беринговский по сравнению с тундровой торфянисто-глеевой почвой условно фонового участка.

Характер распределения тяжелых металлов в почве на территории поселка позволяет предположить, что основной вклад в загрязнение почвенного покрова внесла длительная эксплуатация угольной котельной и размещение на территории порта угольного склада, что стало причиной увеличения концентрации меди, никеля, марганца и цинка в почве на прилегающей территории. Почва на участке вблизи угольного склада отличается наличием растительного покрова и имеет более высокую биологическую активность, сопоставимую с фоновыми значениями.

Оценка санитарного состояния свидетельствует о наличии в почве на территории поселка бактерий группы кишечной палочки, их титр позволяет отнести эти почвы к умеренно опасным. Также в загрязненной почве появились микроскопические грибы, относящиеся к группе условно-патогенных, что свидетельствует о необходимости проведения регулярного мониторинга с целью выявления и количественного учета микроорганизмов данных групп в почве и сопредельных средах.

Несмотря на прекращение активной хозяйственной деятельности на территории поселка Беринговский степень нарушения почвенного покрова остается достаточно высокой, что еще раз подтверждает сведения о низкой скорости восстановления нарушенных экосистем в Арктике. Для эффективной очистки и восстановления почвы на территории поселка необходимо проведение до-

полнительных работ по рекультивации нарушенных земель, что позволит ликвидировать возникший объект накопленного экологического ущерба.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят сотрудников Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН к. б. н. Е.А. Боровичева и к. г. н. Г.П. Урбанавичюса за описание растительности на участках.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках темы НИР № FMEZ-2022-0011-1021051803684-1 и финансовой поддержки по договору с ООО “Берингпромуголь”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева В.М.* Почвенные и аэрофильные зеленые водоросли. М.: Наука, 1998. 348 с.
2. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
3. *Артамонова В.С.* Микробиологические особенности антропогенно-преобразованных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 225 с.
4. Беринговское угольное месторождение Бухты Угольная // Отраслевой журнал “Neftegaz.RU. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/142218-beringovskoe-ugolnoe-mestorozhdenie-bukhty-ugolnaya/> (дата обращения: 05.03.2021).
5. *Василевич Р.С., Безносиков В.А.* Аминокислотный состав гумусовых веществ тундровых почв // Почвоведение. 2015. № 6. С. 685–692.
6. *Вязова Н.Г., Шаулина Л.П., Шмидт А.Ф., Димова Л.М.* Микроэлементы в углях Восточной Сибири // Химия твердого топлива. 2016. № 5. С. 45–55.
7. *Гайсина Л.А., Фазлутдинова А.И., Кабиров Р.Р.* Современные методы выделения и культивирования водорослей. Уфа: Изд-во БГПУ, 2008. 152 с.
8. *Галстян А.Ш.* Ферментативная активность почв Армении. Ереван: Айастан, 1974. 274 с.
9. *Гапонюк Э.И., Малахов С.В.* Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Тр. Всесоюз. совещ. Обнинск, июнь 1983. Л.: Гидрометеоиздат. 1985. С. 3–10.
10. *Губин С.В., Лупачев А.В.* Надмерзлотные горизонты аккумуляции грубого органического вещества в криоземах тундр Северной Якутии // Почвоведение. 2018. № 7. С. 815–825.
11. *Добровольская Т.Г.* Структура бактериальных сообществ почв. М.: Академкнига, 2002. 281 с.

12. Дубовенко Е.К. Особенности фосфатазной активности в различных типах почв // Живлення та удобр. сільського спод. культур. Київ, 1964. С. 29–32.
13. Жаров Ю.Н. Изучение и оценка токсичных микро-элементов в товарных энергетических углях России // ГИАБ, 1995. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-i-otsenka-toksichnyh-mikro-elementov-v-tovarnyh-energeticheskikh-uglyah-rossii> (дата обращения: 05.03.2021).
14. Зенова Г.М., Степанов А.Л., Лихачева А.А., Манучарова Н.А. Практикум по биологии почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 120 с.
15. Караваева Н.А. Почвенная зональность Чукотского нагорья // Почвоведение. 2013. № 5. С. 517–532.
16. Кашулина Г.М., Кубрак А.Н., Коробейникова Н.М. Кислотность почв в окрестностях медно-никелевого комбината “Североникель”, Кольский полуостров // Почвоведение. 2015. № 4. С. 486–500.
17. Корнейкова М.В., Евдокимова Г.А., Лебедева Е.В. Комплексы потенциально патогенных микроскопических грибов в антропогенно-загрязненных почвах Кольского Севера // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46. Вып. 5. С. 323–328.
18. Крылов Д.А. Негативное влияние элементов-примесей от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей // ГИАБ, 2017. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/negativnoe-vliyanie-elementov-primesej-ot-ugolnyh-tes-na-okruzhayushchuyu-sredu-i-zdorovie-lyudey> (дата обращения: 05.03.2021).
19. Кухаренко О.С., Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Степанов А.Л., Матышаков Г.В. Структура гетеротрофного блока бактерий в тундровых почвах полуострова Ямал // Почвоведение. 2009. № 4. С. 463–468.
20. Лысак Л.В. Бактериальные сообщества городских почв. Автореф. дис. ... докт. б. н. М., 2010. С. 1–47.
21. Марфенина О.Е. Антропогенная экология почвенных грибов. М.: Медицина для всех, 2005. 196 с.
22. Михайлов И.С. Почвенная карта российской Арктики масштаба 1 : 1000000: содержание и опыт составления // Почвоведение. 2016. № 4. С. 411–419.
23. Новаковский А.Б. Возможности и принципы работы программного модуля “GRAPHS”. Сыктывкар, 2004. 28 с.
24. Осипова Н.А., Язиков Е.Г., Тарасова Н.П., Осипов К.Ю. Тяжелые металлы в почвах в районах воздействия угольных предприятий и их влияние на здоровье населения // Безопасность в техносфере. 2015. № 2. С. 16–26.
25. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.
26. Пугачев А.А. Почвы арктического побережья Чукотки // Вестник Северо-Восточного государственного университета. 2016. № 25. С. 46–50.
27. Рабочая группа IUSS WRB. 2015. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014, исправленная и дополненная версия 2015. Международная система почвенной классификации для диагно-стики почв и создания легенд почвенных карт. Доклады о мировых почвенных ресурсах № 106. ФАО, Рим. 216 с.
28. Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. Количественная оценка почв Арктики и Субарктики России (по картографическим данным) // Почвоведение. 2019. № 1. С. 20–31.
29. Черенцова А.А. Оценка воздействия золоотвалов на окружающую среду (на примере Хабаровской ТЭЦ-3). Дис. ... канд. биол. н. Хабаровск, 2013. 296 с.
30. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 143 с.
31. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: Наука, 2005. 667 с.
32. Юрцев Б.А., Королева Т.М., Петровский В.В., Полозова Т.Г., Жукова П.Г., Катенин А.Е. Конспект флоры Чукотской тундры. СПб.: ВВМ, 2010. 628 с.
33. Abakumov E., Zverev A., Morgun E., Alekseev I. Microbiome of abandoned agricultural and mature tundra soils in southern Yamal region, Russian Arctic // Open Agriculture. 2020. № 5. P. 335–344. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0034>
34. Buckeridge K.M., Banerjee S., Siciliano S.D., Grogan P. The seasonal pattern of soil microbial community structure in mesic low arctic tundra // Soil Biology and Biochemistry. 2013. V. 65. P. 338–347.
35. Domsh K.H., Gams W., Anderson T.H. Compendium of Soil Fungi. Eching: IHW-Verlag, 2007. 672 p.
36. Ettl H., Gartner G. Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen. 2., ergänzte Auflage. Springer Berlin Heidelberg. 2014. 773 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39462-1>
37. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication National University of Ireland, Galway. 2019. <http://www.algaebase.org>
38. Hallonen O., Tulkki H., Derome J. Nutrient analysis methods. Helsinki, 1983. 28 p.
39. Korneykova M., Redkina V., Shalygina R. Algae, cyanobacteria, and microscopic fungi complexes in the Rybachy Peninsula soils, Russia. Czech Polar Reports. 2017. V. 7(2). P. 181–194. <https://doi.org/10.5817/CPR2017-2-18>
40. Maltsev Y.I., Maltseva I.A., Solonenko A.N., Bren A.G. Use of soil biota in the assessment of the ecological potential of urban soils // Biosystems Diversity, 2017. V. 25. № 4. P. 257–262. <https://doi.org/10.15421/011739>
41. Methods for Integrated Monitoring in the Nordic Countries. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1989. 280 p.
42. Olsen R.A., Hovland J. Fungal Flora and Activity in Norway Spruce Needle Litter: Report. Ås: Agricultural University of Norway, 1985.
43. Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // Atmos. Chem. Phys. 2018. P. 17573–17587. <https://doi.org/10.5194/acp-18-17573-2018>

Biological Activity and Chemical Properties of Tundra Soils of the Chukotka Autonomous Okrug in Conditions of Anthropogenic Pollution

N. V. Fokina¹*, M. V. Korneykova¹, V. V. Redkina¹, V. A. Myazin¹, and T. A. Sukhareva¹

*¹Institute of North Industrial Ecology Problems – Subdivision of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of Russian Academy of Science”, Apatity, Murmansk region, 184209 Russia*

**e-mail: nadezdavf@yandex.ru*

An ecological and microbiological study of the soil of the Beringovsky village of the Chukotka Autonomous Okrug was carried out. It has been established that the operation of the nearby coal storage area and household activities led to severe disturbance of natural tundra-gley soils. In the disturbed soil, there was a change in pH towards a neutral or slightly alkaline reaction, a decrease in the content of exchangeable hydrogen, nitrogen, carbon of organic compounds, available potassium and sodium compounds, an excess of the background values of the heavy metals content for Ni, Cu, Mn, Fe, Zn and the established MPCs was noted for Cu, Zn. In the soil of the village in the organogenic horizon, a decrease in enzymatic activity is observed. The number of cultivated saprotrophic and oligotrophic bacteria in the upper horizon of disturbed soil is 2–10 times higher than in the background one, while the number of microscopic fungi, psychrophiles and mesophiles, is 38 and 9 times lower, respectively. In the disturbed soil, fungi – thermophiles, belonging to conditionally pathogenic species, as well as bacteria of the *Escherichia coli* group were revealed. An increase in the diversity of micromycetes in the soil of the village was noted and changes in the structure of the fungal community. In the soil of the study area, 45 species of algae and cyanobacteria were found. In disturbed soil, the diversity of microchotrophs is significantly higher than in background ones, due to yellow-green and diatoms, as well as cyanobacteria.

Keywords: microorganisms, enzymatic activity, Histic Cryosols, coal industry, Arctic