УДК 579.253.44

ОЦЕНКА ВСТРЕЧАЕМОСТИ АУКСОТРОФНЫХ ВАРИАНТОВ НЕКОТОРЫХ САНИТАРНО-ПОКАЗАТЕЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПОЧВАХ ТЕРРИТОРИЙ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

С. В. МАЛЬЦЕВА[1)], ***А. Г. СЫСА***[1)], ***И. Э. БУЧЕНКОВ***[1)], ***Е. Р. ГРИЦКЕВИЧ***[1)], ***В. С. БИРГ***[2)], ***А. Х. Д. АХМЕД***[1)]

[1)]*Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь*
[2)]*Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка, ул. Советская, 18, 220030, г. Минск, Беларусь*

Длительное нахождение условно-патогенных микроорганизмов в условиях ионизирующего излучения может привести к увеличению частоты встречаемости ауксотрофных вариантов, трансформации некоторых физиолого-биохимических свойств, а также к изменению питательных потребностей в результате нарушения синтеза и функционирования специфических ферментов. Объектами для исследований служили чистые культуры бактерий группы кишечной палочки (БГКП), а также некоторые представители рода *Bacillus*, выделенные из проб почв, находящихся под длительным воздействием ионизирующего излучения. Предметом исследования является оценка встречаемости ауксотрофных вариантов условно-патогенных микроорганизмов. Установлено, что ауксотрофные варианты микроорганизмов встречаются во всех обследованных почвах. Отмечена зависимость встречаемости ауксотрофов от уровня радиационного загрязнения почв. В почвах, испытывающих интенсивную радионуклидную нагрузку, большинство изолятов обладали множественной ауксотрофностью. При культивировании выделенных изолятов бактерий обнаружены ауксотрофные варианты практически по всем проанализированным аминокислотам. Показано, что выделенные варианты БГКП и рода *Bacillus* в целом различаются по потребностям в отдельных аминокислотах в зависимости от территории, с которой были отобраны образцы почв для анализа. Данное различие в большей мере обусловлено дифференцированными показателями ауксотрофности бактерии *B. mycoides*. Цель исследования – провести оценку встречаемости ауксотрофных вариантов условно-патогенных микроорганизмов, находившихся в условиях длительного воздействия ионизирующего излучения.

Образец цитирования:
Мальцева СВ, Сыса АГ, Бученков ИЭ, Грицкевич ЕР, Бирг ВС, Ахмед АХД. Оценка встречаемости ауксотрофных вариантов некоторых санитарно-показательных микроорганизмов в почвах территорий радиоактивного загрязнения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;1:12–18.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-1-12-18

For citation:
Maltseva SV, Sysa AG, Butchenkov IE, Gritskevitch ER, Birg VS, Ahmed AHD. Assessment of auxotrophic sanitary-indicative microorganisms occurrence in radiation-contaminated soils. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;1:12–18. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-1-12-18

Автор:
Светлана Васильевна Мальцева – магистрант, факультет экологической медицины.
Алексей Григорьевич Сыса – кандидат химических наук, доцент; декан факультета экологической медицины.
Игорь Эдуардович Бученков – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры общей биологии и генетики.
Евгений Ростиславович Грицкевич – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры иммунологии.
Владимир Семенович Бирг – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры биологии и методики преподавания биологии.
Ахмед Хайдер Дийя Ахмед – аспирант, факультет экологической медицины.

Author:
Svetlana V. Maltseva, master's degree student, faculty of environmental medicine.
sveta.malceva28@mail.ru
Aliaksei G. Sysa, PhD (chemistry), docent; dean of environmental medicine.
aliaksei.sysa@iseu.by
Igor E. Butchenkov, PhD (agriculture), docent; associate professor at the department of general biology and genetics.
butchenkow@mail.ru
Evgeniy R. Gritskevitch, PhD (biology), docent; associate professor at the department of immunology.
gritskevitchev@mail.ru
Vladimir S. Birg, PhD (biology), docent; associate professor at the department of biology and methods of teaching biology.
vlad_b39@mail.ru
***Ahmed H. D. Ahmed*,** postgraduate student, faculty of environmental medicine.
haidar.alamer@gmail.com

Ключевые слова: ауксотрофность; почвенная микрофлора; аминокислоты; ионизирующее излучение; микробиологическая оценка почв.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках проекта «Изучение экологических особенностей функциональной активности почвенных микроорганизмов в условиях длительного воздействия ионизирующего излучения (на примере модельных территорий)» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг., регистрационный № 20211336.

ASSESSMENT OF AUXOTROPHIC SANITARY-INDICATIVE MICROORGANISMS OCCURRENCE IN RADIATION-CONTAMINATED SOILS

S. V. MALTSEVA[a], ***A. G. SYSA***[a], ***I. E. BUTCHENKOV***[a], ***E. R. GRITSKEVITCH***[a], ***V. S. BIRG***[a], ***A. H. D. AHMED***[a]

[a]*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,*
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
[a]*Belarusian State Pedagogical University after M. Tank,*
18 Saveckaja Street, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. G. Sysa (aliaksei.sysa@iseu.by)

Long-term exposure of opportunistic microorganisms to ionizing radiation can lead to an increase in the frequency of occurrence of auxotrophic variants, changes in some physiological and biochemical properties, as well as changes in nutritional needs as a result of disruption of the synthesis and functioning of specific enzymes. The purpose of the study is to assess the occurrence of auxotrophic variants of opportunistic microorganisms exposed to long-term exposure to ionizing radiation. The objects for research were pure cultures of coliform bacteria (CB), as well as the genus *Bacillus*, isolated from soil samples under long-term exposure to ionizing radiation. The subject of the study is to assess the occurrence of auxotrophic variants of opportunistic microorganisms. It was established that auxotrophic variants of microorganisms are found in all examined soils. There was a dependence of occurrenceundefined auxotrophs on the level of radiation contamination of soils. In soils experiencing intense radionuclide load, most isolates had multiple auxotrophy. When cultivating isolated bacterial isolates, auxotrophic variants were found for almost all analyzed amino acids. It was shown that the isolated variants of coliforms and the genus *Bacillus* generally differ in their requirements for individual amino acids depending on the territory from which soil samples were taken for analysis. Moreover, this difference is largely due to differentiated indicators of auxotrophy of *B. mycoides*.

Key words: auxotrophy; soil microflora; amino acids; microbiological assessment of soils.

Acknowledgments. This work was supported by Ministry of Education of the Republic of Belarus (project 10.3.03.04 SPSR «Natural resources and environment» subprogram 3 «Radiation and biological systems» for 2021–2025 (No. SR 20211336).

Введение

Изучение функционирования микробных комплексов необходимо для экологического мониторинга районов, подвергшихся комплексному антропогенному загрязнению. Принципиально важно, что уже на самых ранних стадиях и при минимальных уровнях техногенных стрессоров микробиоценозы являются наиболее чувствительной и информативной диагностической компонентой биоты, быстро реагирующей на смену экологических условий изменением функциональной активности [1]. Структура комплексов почвенных микроорганизмов и закономерности их функционирования различаются в зависимости от характера антропогенного воздействия и экологических условий.

При использовании ядерных технологий в военных, медицинских целях, а также для энергетики выбросы радионуклидов в окружающую среду и их дальнейшая подвижность является предметом повышенного общественного внимания и широко изучается научной общественностью [2].

Радиационное загрязнение может приводить к значительным изменениям окружающей среды. Так, оно существенно изменяет физические, химические и биологические характеристики почв, нарушает экологические условия, влияющие на состав и распределение почвенных микробиологических сообществ.

До настоящего времени проведен ряд исследований состояния микробных комплексов (в основном микосообществ) в значительно загрязненных радиоактивными элементами регионах. Так, Степанов и др. [3] отмечают уменьшение количества штаммов бактерий родов *Aeromonas*, *Pseudomonas* и *Rhodococcus*, а также увеличение удельного веса микобактерий и грибов в почвах, загрязненных радионуклидом ^{137}Cs в дозе 5395,5 кБк. Авторы Durrell и Lora [4] обнаружили радиорезистентные штаммы микроорганизмов на ядерном полигоне Невада в США. Kieft, et al. [5] указывают, что вода является критическим

рост-лимитирующим фактором для микроорганизмов в Юкке Гора, штат Невада, США. Авторы Dighton, et al. [6] показали высокое разнообразие микросообществ вокруг радиоактивно загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС территорий. Авторы Dighton, et al. [4] и Wehrden, et al. [7] также отметили наличие физиологических и морфологических изменений грибов, большинство из которых представляют собой адаптационные изменения к радиационному воздействию.

Итак, не вызывает сомнения существование и большое биоразнообразие почвенных микроорганизмов, обитающих на радиоактивно загрязненных территориях. Однако популяционно-видовые, биохимические, молекулярно-генетические модификации биоразнообразия почвенных микроорганизмов в естественных условиях воздействия ионизирующего излучения требуют глубокого изучения.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что дифференциальная радиочувствительность почвенных микроорганизмов в условиях значительного техногенного повышения содержания радионуклидов в почве может приводить к трансформации видового разнообразия и, как следствие, к возможному нарушению нормального функционирования почвенной биоты в целом.

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили чистые культуры БГКП и бактерии рода *Bacillus*, выделенные из почв, находившихся под длительным воздействием ионизирующего излучения, и почв, не подвергавшихся данному воздействию. Во всех случаях почвы относятся к дерново-подзолистому типу на моренных и лёссовидных суглинках. Отбор проб почв осуществлялся на модельных участках (25 м^2 каждый) на опушках смешанных лесов на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) и территории Березинского биосферного заповедника (ББЗ) – естественный фоновый уровень ионизирующего излучения. Отбор проб проводился с использованием метода выделения микроорганизмов по «конверту» (четыре точки по углам и одна в центре) в летний период (август).

Радиометрический анализ проб почвы для выявления наличия в пробах радионуклидов ^{137}Cs проводился согласно методике МВИ.МН 1181-2011 с использованием сцинтилляционного гамма-бета спектрометра МКС-АТ1315, время измерения составило 3 ч[3].

Для обнаружения и количественного учета представителей семейства *Enterobacteriacaea*, а также *рода Bacillus* использовали культуральные, тинкториальные и физиолого-биохимические методы анализа [8; 9].

Ауксотрофные варианты тестовых культур идентифицировали по неспособности к росту на минимальной агаризованной среде. Минимальный агар [10] готовили из 300 мл 2%-го водяного агара, 100 мл солевого концентрата (NH_4Cl – 20 г, NH_4NO_3 – 4 г, Na_2SO_4 – 8 г, K_2HPO_4 – 12 г, KH_2PO_4 – 4 г, $MgSO_4 \times 7\ H_2O$ – 0,4 г, дистиллированная вода – 1000 мл) и 4 мл 20%-го раствора глюкозы.

Пищевые потребности объекта исследования определяли с использованием минимальной среды аналогичного состава с различными комбинациями аминокислот. В работе использовали 10 аминокислот с концентрацией 2 мг/мл (метионин, тирозин, лизин, глицин, пролин, гистидин, серин, аргинин, лейцин, цистеин). Все культуры инкубировались 24 ч при температуре 32 °С для бактерий рода *Bacillus* и 37 °С для БГКП. Принадлежность к полиауксотрофной форме подтверждали по необходимости присутствия пяти и более факторов роста в питательной среде.

Численность микроорганизмов определяли методом подсчета общего микробного числа (ОМЧ) в пересчете на 1 г почвы [11].

Сравнение качественных признаков (выраженных в частотах) проводили с помощью точного критерия Фишера. Отличия считались статистически значимыми при $p < 0,05$ [12].

Для факторного анализа смешанных (содержит как количественные, так и качественные переменные) данных в настоящей работе использована факторная модель *FAMD* [13] библиотеки *FactoMineR* в среде статистических вычислений *R* (GraphPad Software, Inc.) [14].

Результаты исследования и их обсуждение

В работе выделены и идентифицированы чистые культуры санитарно-показательных микроорганизмов из проб почв, находящихся под длительным воздействием ионизирующего излучения, а также с естественным уровнем ионизирующего излучения и низким уровнем техногенного загрязнения.

Радиометрический анализ проб почвы из ББЗ не выявил активность по радионуклиду ^{137}Cs, в то же время для почв из ПГРЭЗ показатель удельной активности составил 1330,0 ± 353,00 Бк/кг. Следует отметить,

[3]МВИ.МН 1181-2011. Методика выполнения измерений объемной и удельной активности стронция-90, цезия-137 и калия-40 на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов цезия-137 и калия-40 на гамма-спектрометре типа EL 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства и других объектах окружающей среды.

что удельная активность радионуклидов в пробах почв ББЗ соответствует фоновым уровням для данных территорий. Удельная активность ^{137}Cs в исследуемых пробах почв ПГРЭЗ согласуются с данными о поверхностной плотности загрязнения модельных территорий ^{137}Cs (Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия – Беларусь, 2009).

Численность микроорганизмов в пересчете на 1 г почвы указаны в табл. 1.

Таблица 1

Показатели общего микробного числа микроорганизмов, выделенных из проб почв

Table 1

Indicators of the total microbial number of microorganisms isolated from soil samples

Проба почвы	Среднее значение ОМЧ на 1 г почвы
Пробы почв ПГРЭЗ	$31,8*10^6 \pm 2$
Пробы почв ББЗ	$23,4*10^6 \pm 2$

Как следует из данных, представленных в табл. 1, общая численность микроорганизмов в пробах почв ПГРЭЗ была на 33,6 % выше по сравнению с ОМЧ ББЗ (23,4 ± 2 млн клеток).

В работе проведена оценка встречаемости ауксотрофных вариантов *БГКП*, *B. cereus*, *B. subtilis*, *B. thuringiensis* и *B. mycoides* в отобранных пробах почв. Ауксотрофные варианты *микроорганизмов* идентифицировали по неспособности к росту на минимальной агаризованной среде (табл. 2).

Таблица 2

Показатели частоты встречаемости ауксотрофных вариантов исследованных микроорганизмов от общего количества исследуемых изолятов, %

Table 2

Indicators of the frequency of the studied microorganisms auxotrophic variants occurrence from the total number of studied isolates, %

Место отбора проб почвы	Микроорганизм				
	БГКП	*B. cereus*	*B. subtilis*	*B. thuringiensis*	*B. mycoides*
Проба почв ПГРЭЗ	52*(50,25÷53,75)	21,5*(20÷23,13)	37,5*(33,25÷42)	40,5*(40÷41)	12*(11÷12,75)
Проба почв ББЗ	10 (8,5÷11,4)	15 (13,7÷15,5)	8 (7,5÷8,4)	13 (12,2÷13,8)	8 (7,25÷8,75)

*Статистически значимые различия по сравнению с контролем ($p \leq 0,001$ по двустороннему критерию Фишера).

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что ауксотрофные варианты выделены на всех точках отбора проб в количестве от 8 до 52 % от общего объема культур. Наименьшее количество ауксотрофов установлено для контрольной территории ББЗ (8–15 %) с низким уровнем радиационного и прочего техногенного загрязнения.

Из данных табл. 3, ауксотрофные варианты *B. cereus, B. subtilis, B. thuringiensis,* выделенные из образца почвы ББЗ, во всех пробах проявляли ауксотрофность по отношению к глутаминовой кислоте. Также высокая частота встречаемости ауксотрофных вариантов указанных микроорганизмов, выделенных из почв ПГРЭЗ и ББЗ, отмечается по отношению к лейцину, серину и метионину. Необходимо отметить, что метионин служит источником азота и серы для бактерий, тем самым играя важную роль в синтезе белков и других биомолекул, необходимых для обеспечения нормального роста бактерии [15]. Отметим, что метионин вовлечен в регуляцию генов, связанных с метаболизмом и другими физиологическими процессами [16].

Установлено, что варианты *B. thuringiensis*, выделенные из обоих образцов почвы, во всех пробах проявляли ауксотрофность по отношению к пролину. Необходимо выделить, что пролин – аминокислота, которая играет важную роль в биохимических процессах роста и развития многих организмов, в том числе бактерий. Некоторые исследования показывают, что он может служить важным метаболическим и энергетическим источником для роста и выживаемости *B. thuringiensis* [17].

Однако эффект пролина на *B. thuringiensis* может быть факультативным и зависеть от условий культивирования. Так, небольшое количество исследований указывают на то, что его высокие концентрации могут оказывать ингибирующий эффект на рост бактерии, особенно при наличии других богатых азотом источников [18].

Таблица 3

Частота встречаемости (%) питательных потребностей выделенных вариантов БГКП и рода *Bacillus* в отдельных аминокислотах

Table 3

Frequency of occurrence (%) of nutritional requirements of isolated coliform and the genus *Bacillus* variants in individual amino acids

Аминокислота		БГКП	*B. cereus*	*B. subtilis*	*B. thuringiensis*	*B. mycoides*
Аргинин	ББЗ	42	48	20	66	42
	ПГРЭЗ	63	85	92	0	50
Гистидин	ББЗ	27	50	41	83	72
	ПГРЭЗ	0	84	43	22	0
Лизин	ББЗ	63	66	62	99	63
	ПГРЭЗ	66	92	94	63	92
Цистеин	ББЗ	42	83	24	33	42
	ПГРЭЗ	44	92	0	0	32
Пролин	ББЗ	0	49	40	96	30
	ПГРЭЗ	20	84	90	90	95
Лейцин	ББЗ	79	66	60	84	50
	ПГРЭЗ	62	88	62	63	86
Тирозин	ББЗ	80	84	83	83	50
	ПГРЭЗ	52	71	42	85	63
Серин	ББЗ	82	85	64	80	50
	ПГРЭЗ	44	90	25	0	82
Метионин	ББЗ	73	98	85	49	42
	ПГРЭЗ	15	87	94	72	88
Глутамин	ББЗ	42	100	100	100	30
	ПГРЭЗ	20	95	89	90	52

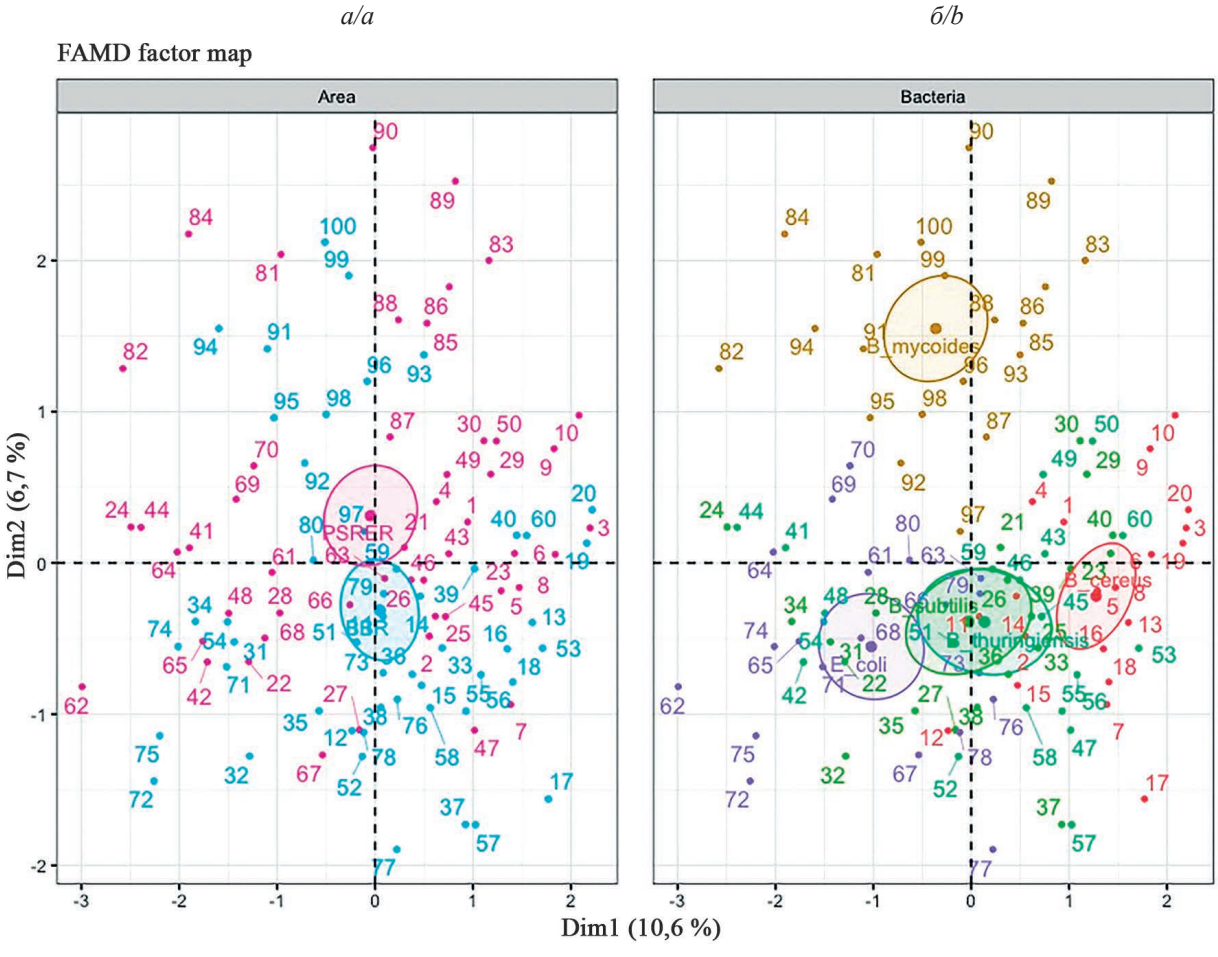
Следует отметить низкий уровень ауксотрофности бактерии *B. mycoides*, выделенной из обоих образцов почвы, к глутамину в отличие от остальных представителей рода *Bacillus*.

Для более детального анализа структуры связей между измеряемыми параметрами в работе применен метод факторного анализа, позволяющий сократить размерность исходного вектора измерений и перейти к новым переменным (факторам), корреляция между которыми равна нулю. Полученные факторы – причины, объясняющие множество частных (парных) корреляционных зависимостей – позволяют объединить между собой исходные параметры по принципу наибольшей корреляции.

Не вдаваясь в детальное рассмотрение и интерпретацию результатов факторного анализа, можно отметить, что полученные данные хорошо разделяются по признаку территории отбора проб (рис. 1*а*), а также по признаку принадлежности к определенному виду бактерий (рис. 1*б*).

В целом, факторы, сязанные с территорией отбора проб и видовой принадлежностью, объясняют около 20 % суммарной вариабельности (изменчивости) ауксотрофии выделенных микроорганизмов. Как следует из данных, представленных в левой части (рис. *а*), выделенные варианты БГКП и рода *Bacillus* в целом различаются по потребностям в отдельных аминокислотах в зависимости от территории, с которой были отобраны образцы почв для анализа. Причем, сопоставив данные, представленные в левой и правой части (рис. *б)*, можно отметить, что данное различие в большей мере обусловлено дифференцированными показателями ауксотрофности бактерии *B. mycoides*.

В целом следует подчеркнуть, что использованный метод факторного анализа позволяет достаточно хорошо классифицировать бактерии по их видовой принадлежности в зависимости от частоты встречаемости питательных потребностей в отдельных аминокислотах. Из данных, представленных в правой части (рис. *б)*, можно заключить, что БГКП, а также *B. mycoides* и *B. cereus* различаются по признаку наличия/отсутствия ауксотрофности к определенной аминокислоте, в то время как бактерии *B. subtilis* и *B. thuringiensis* имеют практически идентичные показатели ауксотрофности по всем десяти проанализированным аминокислотам.



Числа 1–100 – порядковый номер наблюдения в наборе данных, PSRER – ПГРЭЗ, BBR – ББЗ

Рис. Карта распределения бактерий по признаку наличия / отсутствия ауксотрофии к аминокислотам в двумерной плоскости факторов, сязанных с территорией *а)* отбора проб (Dim2) и *б)* видовой принадлежностью (Dim1)

The numbers 1–100 are the ordinal number of the observation in the data set, PSRER – PGREZ, BBR – BBZ

Fig. A map of the distribution of bacteria based on the presence / absence of auxotrophy to amino acids in the two-dimensional plane of factors related *a)* to the sampling area (Dim2) and *b)* species (Dim1)

Заключение

1. Выделены и идентифицированы микроорганизмы БГКП, а также рода *Bacillus* из проб почв, подвергшихся длительному воздействию ионизирующего излучения (ПГРЭЗ) и находившихся в условиях его естественного фонового уровня (ББЗ). Общее микробное число составило $31{,}8*10^6 \pm 2$ и $23{,}4*10^6 \pm 2$ в пересчете на 1 г почвы соответственно.

2. Проведена оценка встречаемости ауксотрофных вариантов среди выделенных представителей рода *Bacillus* и БГКП. Установлено, что показатели частоты встречаемости ауксотрофных вариантов исследованных микроорганизмов, выделенных из образцов почв ПГРЭЗ, были в среднем в 1,4–5,2 раза больше в зависимости от вида микроорганизма.

3. Проведен анализ питательных потребностей ауксотрофных вариантов условно-патогенных микроорганизмов, находившихся под длительным воздействием ионизирующего излучения, а также в условиях его естественного фонового уровня. Показано, что выделенные варианты БГКП и рода *Bacillus* в целом различаются по потребностям в отдельных аминокислотах в зависимости от территории, с которой были отобраны образцы почв для анализа. Причем данное различие в большей мере обусловлено дифференцированными показателями ауксотрофности бактерии *B. mycoides*.

4. Проведенный анализ частоты встречаемости ауксотрофных вариантов условно-патогенных микроорганизмов, находившихся под длительным воздействием ионизирующего излучения, может является необходимым элементом комплексной процедуры разработки биоиндикационной системы тестовых микробиологических показателей для оценки состояния белорусских ландшафтов.

Библиографические ссылки

1. Домрачева ЛИ, Ашихмина ТЯ, редакторы. *Устойчивость микробных комплексов почвы к антропогенным факторам среды*. Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН; 2019. 254 с.

2. Линге ИИ, Крышев ИИ, редакторы. *Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»*. Москва: [б. и.]; 2021. 555 с.

3. Stepanov AL, Tsvetnova OB, Panikov SN. Changes in the structure of the microbial community under the influence of oil and radioactive pollution. *Eurasian Soil Science*. 2012;45:1169–1173.

4. Durrell LW, Lora MS. Fungi isolated in culture from soils of the Nevada Test Site. *Mycologia*. 1960;52:636–641.

5. Kieft TL, Kovacik WP, Ringelberg DB, White DC, Haldeman DL, Amy PS, Hersman LE. Factors limiting microbial growth and activity at a proposed high-level nuclear repository, Yucca Mountain, Nevada. *Applied and Environmental Microbiology*. 1997;63:3128–3133.

6. Dighton J, Tugay T, Zhdanova N. Fungi and ionizing radiation from radionuclides. *FEMS*. 2008;281:109–120.

7. Wehrden Hv, Fischer J, Brandt P, Wagner V, Kümmerer K, Kuemmerle T, Nagel A, Olsson O, Hostert P. Consequences of nuclear accidents for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Letters*. 2012;5:81–89.

8. Васильев ДА, Калдыркаев АИ, Феоктистова НА, Алёшкин АВ *Идентификация бактерий Bacillus cereus на основе их фенотипической характеристики*. Ульяновск: НИИЦМиБ УлГСХА им. П. А. Столыпина; 2013. 98 с.

9. Власенко ВС, Елеусизова АТ, Байсеитов СТ, Ансабаева ЛС Методы индикации бактерий группы кишечной палочки и E. coli в мясе. *Вестник Омского государственного аграрного университета.* 2021; 2(42)50–57.

10. Clowes RC, Hayes W. Experiments in microbial genetics. Oxford: Blackwell scientific publications; 1968. 248 p.

11. Асеева ИВ, и др. Методы почвенной микробиологии и биохимии. Москва: Издательство МГУ; 1991. 302 с.

12. Сыса АГ, Живицкая ЕП. *Статистический анализ в биологии и медицине*. Минск : ИВЦ Минфина; 2018. 140 с.

13. Pagès J. *Multiple Factor Analysis by Example Using R.* New York: Chapman and Hall/CRC; 2014. 272 p.

14. Kassambara A. *Practical guide to principal component methods in R.* New York: STDHA; 2017. 169 p.

15. Ferla MP, Patrick WM. Bacterial methionine biosynthesis. *Microbiology (Reading)*. 2014;160(Pt 8):1571–1584.

16. Gruzdev N, Hacham Y, Haviv H. Conversion of methionine biosynthesis in *Escherichia coli* from trans- to direct-sulfurylation enhances extracellular methionine levels. *Microbial Cell Factories*. 2023;22:151.

17. Ibrahim MA, Griko N, Junker M, Bulla LA. Bacillus thuringiensis: a genomics and proteomics perspective. *Bioeng Bugs*. 2010;1(1):31–50.

18. Christgen SL, Becker DF. Role of Proline in Pathogen and Host Interactions. *Antioxid Redox Signal*. 2019;30(4):683–709.

References

1. Domracheva LI, Ashikhmina TY, editors. *Ustoiichivost' mikrobnykh kompleksov pochvy k antropogennym faktoram sredy* [Stability of soil microbial complexes to anthropogenic environmental factors]. Syktyvkar: IB Federal Research Center Komi Scientific Center Ural Branch RAS; 2019. 254 p. Russian.

2. Linge AI, Kryshev AI, editors. *Radioekologicheskaya obstanovka v regionakh raspolozheniya predpriyatiĭ Gosudarstvennoy korporatsii po atomnoy energii «Rosatom»* [Radioecological situation in the regions where enterprises of the State Atomic Energy Corporation Rosatom are located]. Moscow: [publisher unknown]; 2021. 555 p. Russian.

3. Stepanov AL, Tsvetnova OB, Panikov SN. Changes in the structure of the microbial community under the influence of oil and radioactive pollution. *Eurasian Soil Science*. 2012;45:1169–1173.

4. Durrell LW, Lora MS. Fungi isolated in culture from soils of the Nevada Test Site. *Mycologia*. 1960;52:636–641.

5. Kieft TL, Kovacik WP, Ringelberg DB, White DC, Haldeman DL, Amy PS, Hersman LE. Factors limiting microbial growth and activity at a proposed high-level nuclear repository, Yucca Mountain, Nevada. *Applied and Environmental Microbiology*. 1997;63:3128–3133.

6. Dighton J, Tugay T, Zhdanova N. Fungi and ionizing radiation from radionuclides. *FEMS*. 2008;281:109–120.

7. Wehrden Hv, Fischer J, Brandt P, Wagner V, Kümmerer K, Kuemmerle T, Nagel A, Olsson O, Hostert P. Consequences of nuclear accidents for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Letters*. 2012;5:81–89.

8. Vasil'yev DA, Kaldyrkayev AI, Feoktistova NA, Aleshkin AV. *Identifikatsiya bakteriy Bacillus cereus po ikh fenotipicheskim priznakam* [Identification of Bacillus cereus bacteria based on their phenotypic characteristics]. Ulyanovsk: NIITSMIB Ugsha named after P. A. Stolypin; 2013. 98 p. Russian.

9. Vlasenko VS, Yeleusizova AT, Bayseitov ST, Ansabayeva LS. *Metody opredeleniya bakteriy gruppy E. coli v myase* [Methods of indication of E. coli group bacteria in meat]. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*; 2021;2(42)50–57. Russian.

10. Clowes RC, Hayes W. Experiments in microbial genetics. Oxford: Blackwell scientific publications; 1968. 248 p.

11. Aseeva IV, et al. *Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii* [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1991. 302 p. Russian.

12. Sysa AG, Zhivitskaya EP. *Statisticheskiy analiz v biologii i meditsine* [Statistical analysis in biology and medicine]. Minsk: Information Computing Center of the Ministry of Finance; 2018. 140 p. Russian.

13. Pagès J. *Multiple Factor Analysis by Example Using R.* New York: Chapman and Hall/CRC; 2014. 272 p.

14. Kassambara A. *Practical guide to principal component methods in R.* New York: STDHA; 2017. 169 p.

15. Ferla MP, Patrick WM. Bacterial methionine biosynthesis. *Microbiology (Reading)*. 2014;160(Pt 8):1571–1584.

16. Gruzdev N, Hacham Y, Haviv H. Conversion of methionine biosynthesis in *Escherichia coli* from trans- to direct-sulfurylation enhances extracellular methionine levels. *Microbial Cell Factories*. 2023;22:151.

17. Ibrahim MA, Griko N, Junker M, Bulla LA. Bacillus thuringiensis: a genomics and proteomics perspective. *Bioeng Bugs*. 2010;1(1):31–50.

18. Christgen SL, Becker DF. Role of Proline in Pathogen and Host Interactions. *Antioxid Redox Signal*. 2019;30(4):683–709.

Статья поступила в редколлегию 13.12.2023.
Received by editorial board 13.12.2023.