

Ілленко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

УДК 631.461:579.64, 57.043::539.1]:579.22, 574::539.1.04, 504.5:628.4.047:631.466

**ЦЕЛЮЛОЗОРУЙНУЮЧА АКТИВНІСТЬ ҐРУНТОВОЇ МІКРОФЛОРИ ЗА
ВПЛИВУ РІЗНИХ РІВНІВ РАДІОНУКЛІДНОГО ЗАБРУДНЕННЯ****В. В. ІЛЛЕНКО**, кандидат біологічних наук, старший викладач,<https://orcid.org/0000-0002-0058-0442>**E-mail:** illienko@nubip.edu.ua**І. В. ВОЛКОГОН**, аспірант*, <https://orcid.org/0000-0003-2987-2235>**О. А. БОРДЮГ**, магістрант†**А. В. КЛЕПКО**, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності<http://orcid.org/0000-0002-7061-453X>**М. М. ЛАЗАРЄВ**, кандидат біологічних наук, доцент,<https://orcid.org/0000-0001-6286-0063>**І. М. ГУДКОВ**, доктор біологічних наук, професор,<http://orcid.org/0000-0003-3297-6190>**Національний університет біоресурсів і природокористування України**[https://doi.org/10.31548/dopovidi3\(103\).2023.004](https://doi.org/10.31548/dopovidi3(103).2023.004)

Анотація. Отримані результати щодо впливу різних рівнів радіоактивного забруднення ґрунту на мікробіоту і целюлозоруйнуючу мікрофлору. Стан вказаної мікрофлори є одним із показників загальної активності мікроорганізмів ґрунту та характеризує трансформацію органічної речовини та залучення важкодоступних форм вуглецю в біологічний кругообіг чи вивільнення в атмосферу. У віддалений період після Чорнобильської радіаційної аварії постає і вирішується проблема використання у народному господарстві радіоактивно забруднених територій та повернення до господарської діяльності земель, що були виведені з обігу у 1991–1996 рр. за радіологічними показниками.

Під час проведення наукової роботи, нами були використані наступні методи дослідження – спектрометричний та радіохімічний аналіз, мікробіологічні, агрохімічні, статистичні.

Для проведення польових досліджень у зоні безумовного (обов'язкового) відселення та зоні відчуження ЧАЕС обрано та обстежено по одному полігону в межах яких, за результатами радіологічного та агрохімічного аналізу, визначені місця закладки рослинного матеріалу. Для полігонів відмічений значний градієнт за радіологічними показниками та забезпечено максимально можливе дотримання однорідності агрохімічних характеристик ґрунту. Радіаційний фон коливається в

* науковий керівник – доктор біологічних наук, професор І. М. Гудков

† науковий керівник – кандидат біологічних наук, старший викладач В. В. Ілленко

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

межах від $0,13 \pm 0,01$ до $34,8 \pm 0,5$ мкЗв/год. Питома радіоактивність ґрунту цих полігонів характеризується такими параметрами: за ^{137}Cs – від 600 ± 45 до 203800 ± 4100 Бк/кг, за ^{90}Sr – від 33 ± 4 до 34000 ± 300 Бк/кг. Розрахунок потужності поглинутих доз на мікробіоту показав на 1-му полігоні максимальні значення до $1,57$ мкГр/год, на 2-му полігоні – до $84,00$ мкГр/год. Отримано дані щодо целюлозолітичної активності мікроорганізмів ґрунту обох полігонів, виконано розрахунок коефіцієнтів ТВІ-індексу та оцінено чисельність мікроорганізмів ґрунту за результатами посіву ґрунтової суспензії на поживні середовища.

Ключові слова: ґрунтова мікрофлора, забруднена радіонуклідами територія, питома активність радіонукліду, ^{137}Cs , ^{90}Sr

Актуальність. Вивчення стану мікроорганізмів ґрунту на радіоактивно забруднених територіях (у тому числі з великим радіаційним навантаженням) знаходиться на початковому рівні, навіть не зважаючи на інтенсивний розвиток таких досліджень після радіаційної аварії у Японії групою дослідників з Університету Токіо під керівництвом професора Т. Такахаші (Tadao Takahashi).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Слід відмітити, що в Україні спробу дати комплексну оцінку стану мікробного ценозу в ґрунтах, забруднених радіонуклідами внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, було здійснено З.В. Калашніковою та ін. (1996), Л. В. Григор'євою та ін. (1999). Вони визначали чисельність певних груп мікроорганізмів: автохтонну й алохтонну мікрофлору, серед яких, головним чином, були представлені амоніфікатори та нітрифікатори [1, 2].

Було відзначено зменшення кількості фізіологічних груп мікроорганізмів при збільшенні щільності забруднення понад 10 Ки/км^2 (555 кБк/м^2). І.К. Кравченко та ін. (1999) реєстрували значне зниження кількості ґрунтових бактерій у забруднених радіонуклідами ґрунтах, яке позитивно корелювало зі зменшенням радіусу від ЧАЕС [3].

За даними літератури дослідження були спрямовані в основному на вивчення потенціалу мікроорганізмів щодо перетворення фізико-хімічних форм радіоактивних речовин [4–6]. Так, велику увагу приділяють мікроорганізмам, виділеним з уранових шахт, та інших природних середовищ з підвищеним вмістом радіонуклідів. Дослідженнями провідної наукової групи під керівництвом Ейвері та співавторів з 1992 по 1999 рр. було зібрано і детально описано різні шляхи фізико-хімічного перетворення сполук цезію і стронцію, що відбуваються під дією

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

мікробіоти [7–11]. Поряд з мікроорганізмами, істотний вплив на руйнування целюлозовмісних органічних сполук мають мікроміцети. Вплив підвищених доз іонізуючого опромінення на метаболізм мікроміцетів і зміни в їх популяціях була детально досліджена групою Н.М. Жданової (1999), а пізніше і Т.І. Тугай (2005). Дослідники показали підвищення синтезу меланіну, радіотропізм та стимуляцію розвитку мікроміцетів під впливом іонізуючого випромінювання [4, 12].

ТВІ-індекс за даними Keuskamp et al., 2013 [13] є найбільш чутливим до зміни природно кліматичних умов. Вони у своїй роботі показали, що значення k збільшувались зі збільшенням середніх значень річної температура та кількості опадів у відповідності до загального зростання швидкості розкладання рослинного матеріалу. Разом з тим, значення S зменшувались разом зі зниженням середньорічної температури та кількості опадів. За очікуваннями авторів, S повинен зростати для територій, що мають ґрунтовий покрив з високим потенціалом поглинання вуглецю. Були отримані наступні закономірності: S був низьким у тропічних лісах, мав проміжні значення в лісі на гумусових ґрунтах і високі на торфовищах, що акумулюють вуглець. Також

відмічено, що S був нижчим для ділянок з вищою температурою.

Peñalver-Alcalá et al., 2021 [14] відмітили зростання k від 0,004 до 0,016 для забруднених важкими металами хвостосховищ за використання рослинних решток та компосту як меліоранту. Аналізуючи низку інших параметрів ґрунту, автори дійшли висновку про підвищення функціональної здатності ґрунту. Kulagowski et al., 2021 [15] досліджували вплив різних методів обробітку ґрунту на його родючість та загальний функціональний стан та відзначили, що зростання k може слугувати індикатором покращення біологічної активності ґрунту.

Метод ТВІ набуває все ширшої популярності, як додатковий інструмент аналізу функціонального стану ґрунту. Хоча найбільшу чутливість зміни коефіцієнтів ТВІ-індексу мають до ґрунтово-кліматичних умов, але в своїх роботах науковці часто використовують його для дослідження різноманітних техногенно-змінених екосистем та відмічають зміну коефіцієнтів ТВІ-індексу у відповідь на дію різноманітних чинників. В нашому дослідженні цим чинником є забруднення штучними радіоактивними ізотопами.

Мета дослідження полягає у вивченні стан целюлозоруйнуючої

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

мікрофлори радіоактивно забруднених ґрунтів Українського Полісся та оцінити її активність за різних рівнів іонізуючого випромінювання.

Матеріали і методи дослідження. На обраних ділянках був проведений відбір зразків ґрунту для визначення поточного рівня радіонуклідного забруднення, заміри рівня гамма-фону (дозиметром-радіометром РКС-01 «СТОРА-ТУ»). У підготовлених пробах ґрунту питому активність ^{137}Cs визначали за допомогою γ -спектрометрії (СЕГ-001 “АКП-С”-63), ^{90}Sr виділяли з проб за допомогою радіохімічних методів [16], а його активність потім вимірювали шляхом β -спектрометрії (СЕБ-01-70). Для визначення швидкості процесів розкладання органічної речовини мікрофлорою використано стандартизований у світовій практиці метод Tea Bag Index (TBI) [13]. Суть методу полягає у використанні чайних пакетиків ТМ Lipton двох видів – зеленого чаю (EAN8714100770542) та ройбушу (EAN8722700188438), як стандартизованого рослинного матеріалу. Пакетики зважували на електронних вагах (AXIS ADG200C) та маркували, потім закопували в ґрунт на глибину 8 см і залишали на 90 днів. Після завершення експозиції, пакетики діставали, обережно та ретельно очищували від залишків ґрунту, висушували в сушильній шафі за

температури 70 °С 48 годин і повторно зважували чай. Отримані дані використали для розрахунку параметрів ТВІ-індексу: коефіцієнту розкладання (k) та коефіцієнту стабілізації (S) [13]. Визначення потужності поглиненої дози для мікроорганізмів ґрунту в місцях закладки рослинного матеріалу проводили згідно з рекомендаціями [17]. Після того як в лабораторії було визначено питому активність радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у ґрунті, провели розрахунок дозового навантаження зовнішнього γ - і β -випромінювання у 10 см шарі ґрунту для кожного радіонукліда окремо та визначили сумарну потужність поглинутої дози. Коефіцієнти дозового перетворення для ^{137}Cs по γ -випромінюванні – $4,82\text{E-}03$ (мкГр/добу)/Бк/кг_{ґрунту}, по β -випромінюванні відповідно – $2,47\text{E-}03$ (мкГр/добу)/Бк/кг_{ґрунту}. Коефіцієнти дозового перетворення для $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ по β -випромінюванні – $1,56\text{E-}02$ (мкГр/добу)/Бк/кг_{ґрунту}. Активність мікробіологічних процесів та загальну чисельність мікроорганізмів у ґрунті визначали за загальноприйнятими мікробіологічними методами [18]. Досліди проводили у триразовій повторності, статистичне опрацювання отриманих результатів виконували з використанням пакетів програм MS Excel 2016 та STATISTICA 10.

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

Результати досліджень та їх обговорення. Були обрані два дослідні полігони – перший на межі з зоною Відчуження (Народицький район, Житомирська область) В межах цього полігону виділені три точки закладання рослинного матеріалу та відбору зразків ґрунту: Народичі Min – N51,24076°, E29,21497°; Народичі Med – N51,24029°, E29,22043°; Народичі Max – N51,23815°, E29,22245°. Другий полігон обрали безпосередньо в зоні

Відчуження Чорнобильської АЕС (ЧЗВ). На другому полігоні виділені дві точки закладання рослинного матеріалу та відбору ґрунту: ЧЗВ Min – N51,38595°, E30,03035°; ЧЗВ Max – N51,38231°, E30,03298°. Обидва полігони характеризуються достатньо значимим градієнтом радіонуклідного забруднення та мають ґрунт однорідний за агрохімічними показниками таблиця 1.

1. Агрохімічна характеристика точок для закладки рослинного субстрату на полігонах

Агрохімічні показники	1-й полігон			2-й полігон	
	Народичі Min	Народичі Med	Народичі Max	ЧЗВ Min	ЧЗВ Max
кислотність обмінна (рН _{KCl})	6,2±0,05	6,2±0,02	6,3±0,5	4,0±0,3	5,0±0,7
кислотність гідролітична (Н _г), мг-екв/100 г ґрунту	1,23±0,04	1,23±0,03	1,25±0,04	2,1±0,25	2,3±0,27
сума ввібраних основ, мг-екв/100 г ґрунту	8,7±1,3	9,5±0,7	9,8±0,8	7,7±0,5	8,5±0,7
рухомі фосфати, мг/кг ґрунту (за Кірсановим)	428±90	434±20	444±59	76±11	50±8
обмінний калій, мг/кг ґрунту (за Кірсановим)	164±18	161±20	196±78	29±8	35±9
гумус, %	2,3±0,1	2,6±0,2	2,7±0,1	1,2±0,2	0,9±0,1
азот легко-гідролізований, мг/кг	75±8	80±11	81±2	н/д	н/д
нітратний азот мг/кг	6,2±4,1	7,5±4,3	5,4±3,5	н/д	н/д
загальний азот, %	0,09±0,01	0,1±0,02	0,09±0,01	н/д	н/д

Результати визначення радіологічних характеристик обраних експериментальних полігонів наведені у таблиці 2.

Отримані результати, свідчать, що на обох полігонах дотримано умови проведення експерименту, а саме – наявність достовірного градієнту радіоактивного забруднення ґрунту.

Питома активність радіонуклідів у різних точках відрізняється у рази і, логічно, що доза опромінення ґрунтової мікрофлори буде відрізнятися у рази. Такий градієнт радіологічної характеристики дозволить оцінити результати саме впливу радіаційної ситуації на активність целюлозоруйнуючих

мікроорганізмів як такі, що обумовлені переважно радіологічними характеристиками.

2. Радіологічна характеристика точок для закладки рослинного субстрату на дослідних полігонах

Точка відбору проби	Потужність еквівалентної дози γ -випромінювання, мкЗв/год	Питома активність ^{137}Cs у ґрунті, Бк/кг	Питома активність ^{90}Sr у ґрунті, Бк/кг	Сумарна потужність поглинутої дози, мкГр/год ($^{137}\text{Cs}+^{90}\text{Sr}$)
Народичі Min	$0,13\pm 0,01$	600 ± 45	33 ± 4	0,20
Народичі Med	$0,41\pm 0,03$	2900 ± 80	180 ± 15	1,00
Народичі Max	$0,74\pm 0,04$	4600 ± 110	270 ± 12	1,57
ЧЗВ Min	$1,7\pm 0,04$	10400 ± 200	800 ± 100	3,68
ЧЗВ Max	$34,8\pm 0,5$	203800 ± 4100	34000 ± 300	84,00

На 2-му полігоні в зоні відчуження визначені місця з більш високим рівнем забруднення радіонуклідами. При цьому різниця в потужності поглинутої дози для точки з найнижчим рівнем забруднення 1-го полігону та точки з найвищим рівнем забруднення 2-го полігону сягає більше, ніж 420 разів.

Були отримані результати активності целюлозоруйнуючих

мікроорганізмів у радіоактивно забрудненому ґрунті для 1-го полігону. Так, розраховані коефіцієнти S та k для зразків чаю (рис. 1), що були в ґрунті 88 днів (з жовтня по січень 2021р.) при найнижчій активності радіоактивних ізотопів складають $0,588\pm 0,020$ та $0,0105\pm 0,0026$, при середній активності – $0,494\pm 0,001$ та $0,0175\pm 0,0059$, та при найвищій активності – $0,456\pm 0,032$ та $0,0113\pm 0,0006$ відповідно.

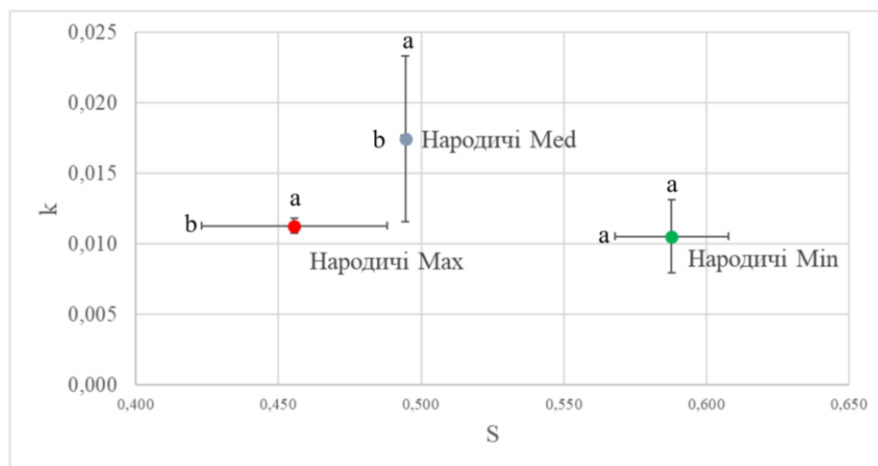


Рис. 1. Параметри ТВІ-індексу 1-го полігону

Примітка. Тут і далі: букви a, b, c, d позначають належність варіантів до різних гомогенних рядів за методом Фішера при $p\leq 0,05$. Порівнювати треба кожний коефіцієнт окремо.

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

Для 2-го полігону при найнижчій активності $0,463 \pm 0,035$ та $0,008 \pm 0,001$ (рис. 2).
та при найвищій активності – $0,486 \pm 0,058$ та $0,007 \pm 0,002$ відповідно (рис. 2).

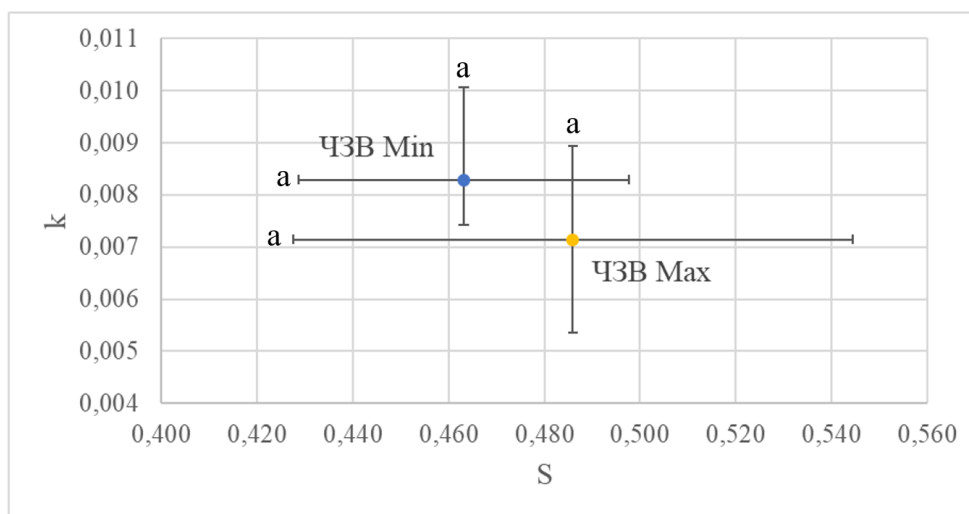


Рис. 2. Параметри ТВІ-індексу 2-го полігону

З отриманих нами даних бачимо, що зафіксовані зміни коефіцієнтів ТВІ-індексу для 1-го полігону підтверджують вплив іонізуючого випромінювання на активність мікрофлори ґрунту (рис. 1). Найвищу активність розкладання зафіксовано на ділянці з найвищим рівнем радіонуклідного забруднення (рис. 3). Разом з тим ці процеси потребують подальшого дослідження, зокрема аналізу зразків з другого полігону зі значно вищими рівнями забруднення. Хоча з уже отриманих даних видно, що вплив іонізуючого випромінювання на целюлозоруйнуючу мікрофлору ґрунту за досліджуваних рівнів забруднення радіонуклідами не є основним

чинником. Домінуючий вплив здійснює температура та вологість. Рівні забруднення 1-го полігону мають ознаки стимуляції целюлозоруйнуючої активності мікрофлори.

Аналізуючи отримані результати щодо целюлозоруйнуючої активності на 1-му полігоні (рис. 3), варто відмітити, що при однакових ґрунтово-кліматичних умовах, найінтенсивніше процес розкладання рослинного матеріалу проходив у точці з найвищим рівнем забруднення (Народичі Max). Щодо розкладання більш стійкого субстрату – ройбушу, то видно найнижчу швидкість розкладання у точці Народичі Min.

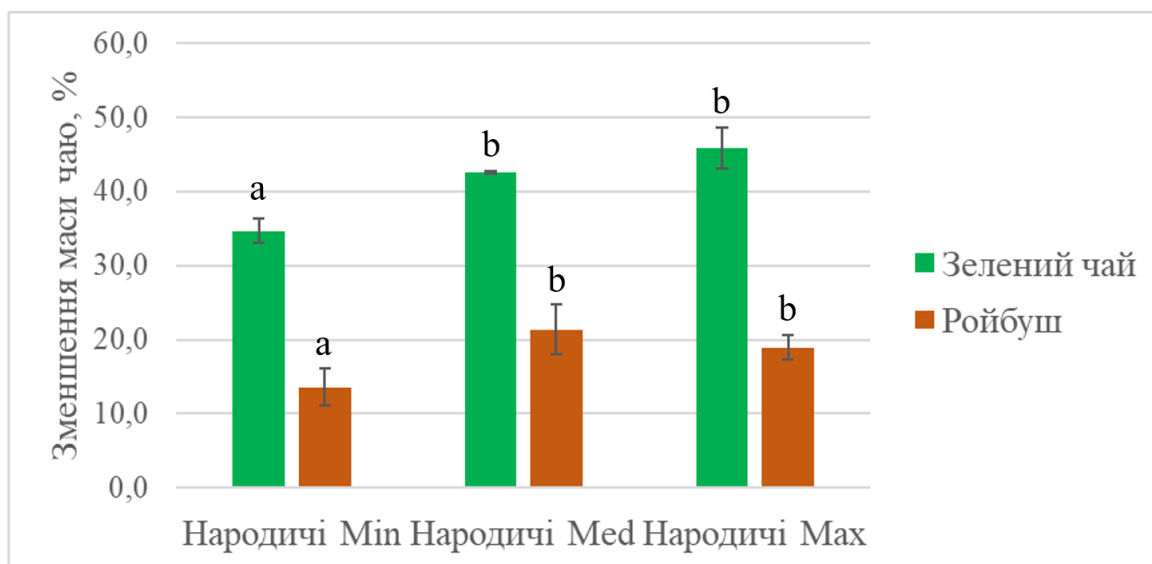


Рис. 3. Інтенсивність розкладання рослинного матеріалу на дослідних ділянках 1-го полігону

Що ж до результатів ще двох точок зони відчуження Чорнобильської АЕС, то як видно з рис. 4 для зеленого чаю інтенсивність розкладання знаходиться на рівні з точкою Народичі Max. А інтенсивність розкладання ройбушу була дещо нижчою. Порівняння результатів з двох полігонів є не зовсім коректне, адже вони мають різні ґрунтово-кліматичні умови. А як відомо, то саме вони є визначними у зміні швидкості процесів розкладання. Хоча, з отриманих результатів можна констатувати – радіонуклідне забруднення також вносить зміни у досліджуваний процес. Проте вплив цього фактору не є визначальним, а більш сильно впливає, наприклад, вологість, температура та наявність доступних поживних елементів в ґрунті. Хоча порівнювати значення

коефіцієнтів ТВІ-індексу ми можемо лише в межах одного полігону. Для полігону в зоні відчуження Чорнобильської АЕС потрібно підбір додаткових точок для закладання рослинного матеріалу для одержання додаткових даних.

Для 1-го полігону проведено облік чисельності мікроорганізмів на різних селективних середовищах. Чисельність представників усіх еколого-трофічних груп мікроорганізмів (посів на ґрунтовому агарі, середовищі Чапека, Імшенецького-Солнцевої, Муромцева, Ешбі та Гільтая) є найвищою у варіанті з найвищою радіоактивністю (за виключенням амоніфікаторів). На другому місці за чисельністю більшості досліджених мікроорганізмів – варіант з найнижчою радіоактивністю і найменшу

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

чисельність відмічено для варіанту з проміжною радіоактивністю (табл. 3).

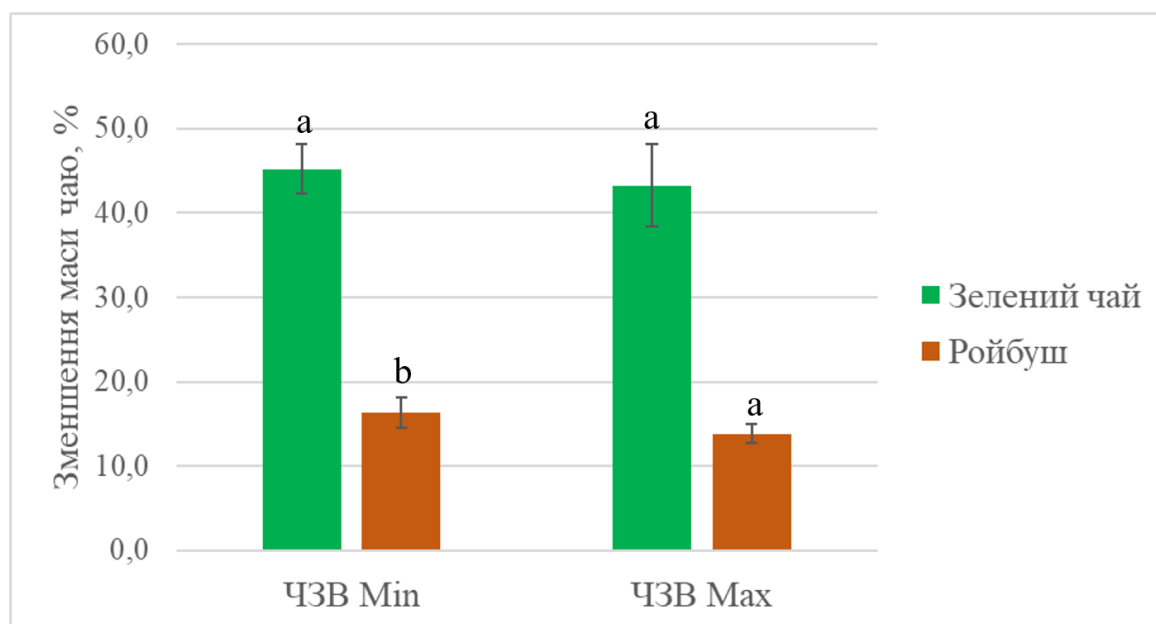


Рис. 4. Інтенсивність розкладання рослинного матеріалу на дослідних ділянках 2-го полігону

3. Облік чисельності мікроорганізмів ґрунту 1-го полігону, тис./г

Точки відбору проби	Народичі Min	Народичі Med	Народичі Max
Мікроорганізми			
що засвоюють переважно органічний азот (амоніфікатори) (середовище МПА)	3800±195	6950±450	2367±381
що засвоюють переважно мінеральні сполуки азоту (середовище КАА)	2167±150	900±83	7867±470
гриби (середовище Чапека)	120,0±0,090	33,3±0,004	433,0±0,310
оліготрофи (ґрунтовий агар)	933±22	277±13	2280±184
що розчиняють мінералофосфати (середовище Муромцева)	433	400	2533
азотфіксатори (середовище Ешбі)*	0,459	0,459	45,000
денітрифікатори (середовище Гільтая)*	2500	950	25000
целюлозоруйнівні бактерії (середовище Імшенецького-Солнцевої)*	0,459	0,450	95,000

*) облік мікроорганізмів на рідких середовищах (Імшенецького-Солнцевої, Гільтая) і напіврідких (Ешбі) передбачає процедуру визначення чисельності за методом граничних розведень і таблицями Мак-Креді, які розроблено за використання статистичних методів, тож статистична обробка результатів не потрібна

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

Найвищу активність біологічних процесів (емісія CO_2 , потенційна активність денітрифікації, потенційна активність азотфіксації, співвідношення $\text{N}_2\text{O}/\text{CO}_2$) спостерігали у зразку з найвищим рівнем радіонуклідного забруднення. У пробі з середнім рівнем забруднення відмітили найменшу активність процесів. Отримані результати дозволяють припустити, що у варіанті

з середнім рівнем радіонуклідного навантаження процеси або приглушені, або ж у варіанті з найвищим рівнем забруднення вони стимулюються. Варіант з найнижчим рівнем забруднення радіонуклідами займає проміжне положення, проте більшою мірою наближається до варіанта з середнім рівнем забруднення (табл. 4).

4. Активність біологічних процесів ґрунту 1-го полігону

Точки відбору проби	Народичі Min	Народичі Med	Народичі Max
Активність процесу			
Емісія CO_2 , нмоль $\text{CO}_2/\text{г ґрунту/годину}$	764,9 $\pm$ 7,0	730,4 $\pm$ 16,3	839,0 $\pm$ 26,8
Потенційна активність денітрифікації, нмоль $\text{N}_2\text{O}/\text{г ґрунту/годину}$	32,98 $\pm$ 1,38	19,42 $\pm$ 0,86	41,81 $\pm$ 3,01
Потенційна активність азотфіксації, нмоль етилену/г ґрунту/годину	16,8 $\pm$ 4,38	10,0 $\pm$ 1,6	95,4 $\pm$ 10,9
Співвідношення $\text{N}_2\text{O}/\text{CO}_2$ (питомі втрати N_2O на одиницю емісійного CO_2)	0,050	0,027	0,043

У таблиці 5 наведено результати обліку чисельності мікроорганізмів ґрунту на 2-му полігоні. У зв'язку з раннім відбором зразків (низькі температури повітря, що передували відбору) не було виявлено мікроорганізмів певних екологіко-трофічних груп: азотфіксатори та целюлозоруйнівні для обох точок відбору, а для точки з найвищим рівнем радіонуклідного забруднення також не було виявлено грибів на середовищі Чапека та

фосфатмобілізівних бактерій на середовищі Муромцева.

У той же час, у ґрунті з точки ЧЗВ Min доволі багато мінеральних сполук азоту, про що свідчить як кількість мікроорганізмів, що засвоюють переважно мінеральні сполуки азоту, так і чисельність денітрифікаторів (вірогідно, це наслідки минулої (літньо-осінньої) активної амоніфікації). Порівнюючи зразки, можна сказати наступне: результати даного висіву показали значну різницю у чисельності мікроорганізмів ґрунту

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

між точками з різним рівнем вищою в точці з меншим рівнем радіонуклідного забруднення. забруднення.

Чисельність мікроорганізмів була

5. Облік чисельності мікроорганізмів ґрунту 2-го полігону, тис./г

Точки відбору проби	ЧЗВ Min	ЧЗВ Max
Мікроорганізми		
що засвоюють переважно органічний азот (амоніфікатори) (середовище МПА)	650,1±37	391,8±19
що засвоюють переважно мінеральні сполуки азоту (середовище КАА)	12826±510	45±5
гриби (середовище Чапека)	23,8±4	не виявлено
оліготрофи (ґрунтовий агар)	10246±160	6214±119
що розчиняють мінералофосфати (середовище Муромцева)	1024±92	не виявлено
азотфіксатори (середовище Ешбі)*	не виявлено	не виявлено
денітрифікатори (середовище Гільтая)*	4770	988
целюлозоруйнівні бактерії (середовище Імшенецького-Солнцевої)*	не виявлено	не виявлено

*) облік мікроорганізмів на рідких середовищах (Імшенецького-Солнцевої, Гільтая) і напіврідких (Ешбі) передбачає процедуру визначення чисельності за методом граничних розведень і таблицями Мак-Креді, які розроблено за використання статистичних методів, тож статистична обробка результатів не потрібна

Також були отримані дані по потенційною емісією CO₂), що біологічній активності ґрунту (за відображені в таблиці 6.

6. Активність біологічних процесів ґрунту 2-го полігону

Точки відбору проби	ЧЗВ Min	ЧЗВ Max
Активність процесу		
Емісія CO ₂ , нмоль CO ₂ /г ґрунту/годину	355±5,0	225±16,3

Нажаль, ще не отримані показники активності процесів азотфіксації та біологічної денітрифікації, які буде визначено пізніше. Емісія CO₂ є нижчою для точки ЧЗВ Max, що підтверджується меншою кількістю мікроорганізмів у цьому зразку за

результатами посіву на поживні середовища.

Значення коефіцієнта стабілізації (S) для 1-го полігону статистично достовірно відрізняється для точок Народичі Med і Народичі Max від значень для точки Народичі Min (рис.

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

1). Те саме стосується і показника інтенсивності розкладання рослинного матеріалу (рис. 3): інтенсивність розкладання статистично достовірно більша у точках Народичі Мед і Народичі Мах порівняно зі значеннями для точки з найменшою радіоактивністю ґрунту. Результати обліку чисельності мікроорганізмів (табл. 3) для 1-го полігону показали найбільшу кількість практично всіх груп мікроорганізмів (крім амоніфікаторів) у точці Народичі Мах, а ось точка Народичі Мед відзначилася лише найвищою чисельністю амоніфікаторів. Активність біологічних процесів для точки Народичі Мах відмічена на найвищому рівні (табл. 4). Проаналізувавши вищезазначене, можемо припустити, що рівні радіонуклідного забруднення в точці Народичі Мах можуть бути стимулюючими для розвитку мікроорганізмів. Якщо також взяти до уваги результати визначення вмісту гумусу в ґрунті 1-го полігону, то в точці Народичі Min вміст гумусу є найнижчим – $2,3 \pm 0,1\%$. А як показують значення коефіцієнта S TVI-індексу тут ми відмічаємо найвищий на полігоні рівень накопичення органічної речовини ґрунтом. Разом з тим, ми проаналізували в даній роботі малоінтенсивний період розвитку ґрунтових мікроорганізмів протягом року – з жовтня по січень. Отже, для 1-

го полігону можна зробити висновок, що в точках з вищим рівнем радіонуклідного забруднення відмічено зниження накопичення органічної речовини в ґрунті та підвищену інтенсивність целюлозолітичних процесів за рахунок збільшення чисельності та активності ґрунтових мікроорганізмів.

Статистично достовірної різниці для точок 2-го полігону в значеннях коефіцієнтів TVI-індексу не було знайдено. Разом з тим інтенсивність розкладання рослинного матеріалу була вища для точки ЧЗВ Min (для ройбушу цей показник відрізняється статистично). Аналізуючи результати посівів ґрунтової суспензії (табл. 5), відмічаємо, що загальна чисельність мікроорганізмів та активність емісії CO_2 є вищою в точці ЧЗВ Min. Але, як бачимо з таблиці 1, вміст гумусу в точці ЧЗВ Min є також вищим, ніж у точці ЧЗВ Мах. Враховуючи достатньо високу різницю в інтенсивності радіонуклідного забруднення між точками ЧЗВ Min та ЧЗВ Мах (потужність поглинутої дози відрізняється більше, ніж у 20 разів), та результати досліджень 1-го полігону, ми припускаємо, що поглинуті дози іонізуючого випромінювання сформовані на мікроорганізми ґрунту в точках Народичі Мах та ЧЗВ Min можуть мати стимулюючий ефект на розвиток мікроорганізмів, а вищі дози

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

(на рівні значень поглинутої дози в точці ЧЗВ Мах) пригнічують діяльність ґрунтових мікроорганізмів. Хоча активність мікрофлори зберігається за всіх досліджуваних нами рівнів радіонуклідного забруднення ґрунту.

Робота продовжується в даному напрямку і вже підібрані додаткові точки та проведена закладка рослинного матеріалу.

Висновки і перспективи. У зоні безумовного (обов'язкового) відселення та зоні відчуження Чорнобильської АЕС відібрано та обстежено перед закладанням рослинного матеріалу по одному полігону. Обидва полігони характеризуються градієнтом радіонуклідного забруднення та відносною однорідністю агрохімічних характеристик ґрунту та однаковими кліматичними умовами в межах кожного окремого полігону.

Розрахунок потужності поглинутих доз показав, що в залежності від активності радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у ґрунті максимальні сумарні потужності поглинутої дози для мікрофлори дорівнювали: на 1-му полігоні – 1,57 мкГр/год, на 2-му полігоні – 84,00 мкГр/год. Зафіксовані

зміни коефіцієнтів целюлозолітичної активності мікрофлори (ТВІ) підтверджують вплив іонізуючого випромінювання на активність мікрофлори ґрунту.

За результатами аналізу даних з 1-го полігону відмічено, що в точках з вищим рівнем радіонуклідного забруднення відбувається зниження накопичення органічної речовини в ґрунті та підвищену інтенсивність целюлозолітичних процесів за рахунок збільшення чисельності та активності ґрунтових мікроорганізмів.

Розрахована потужність поглинутої дози іонізуючого випромінювання на мікроорганізми ґрунту в межах від 1,00 до 3,68 мкГр/год нами вбачається як стимулююча, а дози вище 84,00 мкГр/год навпаки пригнічують розвиток мікроорганізмів. Проте, за отриманими нами результатами поки ми не можемо говорити про більш чітку межу поглинутої дози іонізуючого випромінювання при якій стимуляція розвитку мікрофлори переходить у пригнічення. Плануємо вирішення цього питання у подальших дослідженнях.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку Національному фонду наукових досліджень України за підтримку цієї роботи в рамках проекту НФДУ №200/01/0489 «Целюлозоруйнуюча активність мікрофлори ґрунтів Українського Полісся в

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

умовах радіоактивного забруднення та її участь у ґрунтоутворюючих процесах (включаючи пірогенно трансформовані ґрунти».

Список використаних джерел

1. Григор'єва Л. В., Корчак Г. И., Єрусалимська Л. Ф. Вплив різних рівнів радіаційного забруднення ґрунту на індикаторні та патогенні мікроорганізми. Довкілля та здоров'я. 1999. № 1. С. 53–56.

2. Калашникова З. В., Корчак Г. И., Карачев И. И. та ін. Оценка доступности радионуклидов растениям при разных условиях жизнедеятельности микробиоценозов почвы. Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения. 1996. Т. 3. С. 168–174.

3. Кравченко И. К., Семенов А. М., Дедыш С. Н. та ін. Анализ природных популяций микроорганизмов в почвах, подвергнутых воздействию аварии на ЧАЭС. Биоиндикация радиоактивных загрязнений. М.: Наука, 1999. С. 313–322.

4. Жданова Н. Н., Василевская А. И., Захарченко В. О. Микромицеты почв, загрязненных в результате чернобыльской катастрофы, и их вклад в процессы миграции радионуклидов. Биоиндикация радиоактивных загрязнений. М.: Наука, 1999. С. 352–356.

5. Кравець О. П. Радіологічні наслідки радіоактивного забруднення агроценозів" Логос, 2008. 241 с.

6. Жданова Н. Н., Лашко Т. Н., Редчиц Т. И. и др. Взаимодействие почвенных микромицетов с "горячими" частицами в модельной системе. Микробиол. журн. 1991. 53(4). С. 9 – 17.

7. Avery S. V. Caesium accumulation by microorganisms: Uptake mechanisms, cation competition, compartmentalization and toxicity. Journal of Industrial Microbiology. 1995. 14(2). P. 76–84. <https://doi.org/10.1007/BF01569888>

8. Avery S. V. Fate of caesium in the environment: Distribution between the abiotic and biotic components of aquatic and terrestrial ecosystems. Journal of Environmental

Radioactivity. 1996. 30(2). P. 139–171. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(96\)89276-9](https://doi.org/10.1016/0265-931X(96)89276-9)

9. Avery S. V., Codd G. A., & Gadd G. M. Y. Transport kinetics, cation inhibition and intracellular location of accumulated caesium in the green microalga *Chlorella salina*. Microbiology. 1993. 139(4). P. 827–834. <https://doi.org/10.1099/00221287-139-4-827>

10. Avery S. V., Smith S. L., Ghazi A. M., & Hoptroff M. J. Stimulation of Strontium Accumulation in Linoleate-Enriched *Saccharomyces cerevisiae* Is a Result of Reduced Sr^{2+} Efflux. Applied and Environmental Microbiology. 1999. 65(3). P. 1191–1197.

11. Avery S. V., & Tobin J. M. Mechanisms of strontium uptake by laboratory and brewing strains of *Saccharomyces cerevisiae*. Applied and Environmental Microbiology. 1992. 58(12). P. 3883–3889.

12. Тугай Т. И., Жданова Н. Н., Желтоножский В. А. та ін. Ответные реакции грибов, выделенных из различных по уровню радиоактивного загрязнения помещений объекта "Укрытие", на действие ионизирующего излучения. Збірник наукових праць інститут ядерних досліджень. 2005. С. 128–136.

13. Keuskamp J. A., Dingemans B.J.J., Lehtinen T., Sarneel J.M. and Hefting M.M. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. Methods Ecol. Evol. 2013. 4. P. 1070–1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>

14. Peñalver-Alcalá A., Álvarez-Rogel J., Conesa H. M., & González-Alcaraz M. N. Biochar and urban solid refuse ameliorate the inhospitality of acidic mine tailings and foster effective spontaneous plant colonization under semiarid climate. Journal of Environmental Management. 2021. 292. P. 112824. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112824>

15. Kulagowski R., Thoumazeau A., Leopold A., Lienhard P., Boulakia S., Metay A., Sturm T., Tixier P., Brauman A., Fogliani B., &

Іллєнко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

Tivet F. Effects of conservation agriculture maize-based cropping systems on soil health and crop performance in New Caledonia. *Soil and Tillage Research*. 2021. 212. P. 105079. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105079>

16. ISO 18589-5:2009. International standard. Measurement of radioactivity in the environment. Soil. Part 5: Measurement of strontium-90. 2009.

17. Спирин Е. В., Пименов Е.П. Разработка дозиметрических моделей для оценки доз облучения почвенного микробоценоза и мезофауны при радиоактивном загрязнении окружающей среды. Обнинск: ВНИ-ИСХРАЭ, 2011. 55 с.

18. Експериментальна ґрунтова мікробіологія / за ред. В.В. Волкогона. К.: Аграрна наука, 2010. 464 с.

References

1. Hryhor'yeva L. V., Korchak H. Y., Yerusalymka L. F. (1999). Vplyv riznykh rivniv radiatsiynoho zabrudnennya ґruntu na indykatorni ta patohenni mikroorhanizmy [Influence of different levels of radiation contamination of soil on indicator and pathogenic microorganisms]. *Dovkillya ta zdorov'ya*. 1, pp. 53–56. (in Ukrainian).

2. Kalashnikova Z. V., Korchak G. I., Karachev I. I. ta ін. (1996). Otsenka dostupnosti radionuklidov rasteniyam pri raznykh usloviyakh zhiznedeiatel'nosti mikrobitsenozov pochvy [Assessment of the availability of radionuclides to plants under different conditions of soil microbiocenoses' vital activity]. *Problemy Chernobyl'skoy zony otchuzhdeniya*. 3, pp. 168–174. (in Russian).

3. Kravchenko I. K., Semenov A. M., Dedysh S.N. ta ін. (1999). Analiz prirodnykh populyatsiy mikroorganizmov v pochvakh, podvergnutykh vozdeystviyu avarii na CHAES [Analysis of natural populations of microorganisms in soils affected by the Chernobyl accident]. *Bioindikatsiya radioaktivnykh zagryazneniy*. M. : Nauka, pp. 313–322. (in Russian).

4. Zhdanova N. N., Vasilevskaya A.I., Zakharchenko V.O. (1999). Mikromitsety pochv, zagryaznennykh v rezul'tate

chernobyl'skoy katastrofy, i ikh vklad v protsessy migratsii radionuklidov [Micromycetes of soils contaminated as a result of the Chernobyl disaster and their contribution to the migration of radionuclides]. *Bioindikatsiya radioaktivnykh zagryazneniy*. M. : Nauka, pp. 352–356. (in Russian).

5. Kravets O. P. (2008). Radiolohichni naslidky radionuklidnoho zabrudnennya ahrotsenoziv [Radiological consequences of agrocenoses radionuclide contamination]. K.: Logos. 244 p. (in Ukrainian).

6. Zhdanova N. N., Leshko T. N., Redchetz T. I. (1991). Vzaimodeystviye pochvennykh mikromitsetov s «goryachimi» chastitsami v model'nykh sistemakh [Interaction of soil micromycetes with "hot" particles in model systems]. *Microbiol. Journal*. 53(4), pp. 9–17. (in Russian).

7. Avery S. V. (1995). Caesium accumulation by microorganisms: Uptake mechanisms, cation competition, compartmentalization and toxicity. *Journal of Industrial Microbiology*. 14(2), pp. 76–84. <https://doi.org/10.1007/BF01569888>

8. Avery S. V. (1996). Fate of caesium in the environment: Distribution between the abiotic and biotic components of aquatic and terrestrial ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 30(2), pp. 139–171. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(96\)89276-9](https://doi.org/10.1016/0265-931X(96)89276-9)

9. Avery S. V., Codd G. A., & Gadd G. M. Y. (1993). Transport kinetics, cation inhibition and intracellular location of accumulated caesium in the green microalga *Chlorella salina*. *Microbiology*. 139(4), pp. 827–834. <https://doi.org/10.1099/00221287-139-4-827>

10. Avery S. V., Smith S. L., Ghazi A. M., & Hoptroff M. J. (1999). Stimulation of Strontium Accumulation in Linoleate-Enriched *Saccharomyces cerevisiae* Is a Result of Reduced Sr^{2+} Efflux. *Applied and Environmental Microbiology*. 65(3), pp. 1191–1197.

11. Avery S. V., & Tobin J. M. (1992). Mechanisms of strontium uptake by laboratory and brewing strains of *Saccharomyces*

Ілленко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

cerevisiae. Applied and Environmental Microbiology. 58(12), pp. 3883–3889.

12. Tugay T. I., Zhdanova N. N., Zheltonozhskiy V. A. та ін. (2005). Otvetye reaktsii gribov, vydelennykh iz razlichnykh po urovnyu radioaktivnogo zagryazneniya pomeshcheniy ob'yekta [Response reactions of the fungi, isolated from inner locations of "ukrytitya", which have different levels of radioactivity]. *Scientific papers of the institute for nuclear research*. 1(14). pp. 128–136 (in Russian).

13. Keuskamp J. A., Dingemans B. J. J., Lehtinen T., Sarneel J.M. and Hefting M.M. (2013). Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods Ecol Evol*. 4, pp. 1070–1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>

14. Peñalver-Alcalá A., Álvarez-Rogel J., Conesa H. M., & González-Alcaraz M. N. (2021). Biochar and urban solid refuse ameliorate the inhospitality of acidic mine tailings and foster effective spontaneous plant colonization under semiarid climate. *Journal of Environmental Management*. 292, pp. 112824. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112824>

15. Kulagowski R., Thoumazeau A., Leopold A., Lienhard P., Boulakia S., Metay A., Sturm T., Tixier P., Brauman A., Fogliani B., & Tivet F. (2021). Effects of conservation agriculture maize-based cropping systems on soil health and crop performance in New Caledonia. *Soil and Tillage Research*, 212, pp. 105079.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105079>

16. ISO 18589-5:2009 (2009). International standard. Measurement of radioactivity in the environment. Soil. Part 5: Measurement of strontium-90.

17. Spirin Ye.V., Pimekhov Ye.P. (2011). Razrabotka dozimetricheskikh modeley dlya otsenki doz oblucheniya pochvennogo mikrobotsenoza i mezofauny pri radioaktivnom [Development of dosimetric models for assessing the radiation doses of soil microbocenosis and mesofauna in case of radioactive contamination of the environment]. Obninsk : VNIISKHRAE. 55 p. (in Russian).

18. Volkogon V.V. (2010). Eksperymental'na gruntova mikrobiologiya: Monohrafiya [Experimental soil microbiology: Monograph]. (V.V. Volkogon, Ed.). K.: Agricultural science, 464 p. (in Ukrainian).

CELLULOSE DESTRUCTIVE ACTIVITY OF SOIL MICROFLORA AT THE INFLUENCE OF DIFFERENT RADIONUCLIDE CONTAMINATION LEVELS

V. Illienko, I. Volkogon, O. Bordyug, A. Klepko, M. Lazarev, I. Gudkov

Abstract. *The results on impact of different levels of soil radionuclide contamination on microbiota and cellulosedestroying microflora obtained. The state of this microflora is one of the indicators of the overall soil microbial activity. In the remote period after Chernobyl accident, there is a problem of the agricultural use of radionuclide contaminated territories and returning to economic activity the lands that withdrawn from circulation in 1991-1996.*

We used the following research methods - spectrometric, radiochemical analysis, microbiological, agrochemical and statistical analysis.

For field research in the zone of unconditional (compulsory) resettlement and exclusion zone of the Chernobyl NPP, two sites selected and inspected, within which the burial places for plant material identified and soil samples took for radiological and agrochemical analysis. For sites, a significant gradient in radiological parameters observed. The radiation background varies from 0.13 ± 0.01 to 34.8 ± 0.5 $\mu\text{Sv/h}$. The

Ілленко В. В., Волкогон І. В., Бордюг О. А., Клепко А. В., Лазарєв М. М., Гудков І. М.

radionuclides activity concentrations in the soil of sites is characterized by the following parameters: ^{137}Cs - from 600 ± 45 to 203800 ± 4100 Bq/kg, ^{90}Sr - from 33 ± 4 to up to 34000 ± 300 Bq/kg. The absorbed dose rate for microbiota showed maximum values up to $1.57\text{ }\mu\text{Gy/h}$ at the 1st site and up to $84.00\text{ }\mu\text{Gy/h}$ at the 2nd site. Data on cellulolytic activity of soil microorganisms of both sites were obtained, TBI index coefficients were calculated and the number of soil microorganisms was estimated based on the results of sowing soil suspension on nutrient media.

Keywords: soil microflora, territory contaminated radionuclides, radionuclide activity concentration, ^{137}Cs , ^{90}Sr