



ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>


ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫХОДА ИЗОТИОЦИАНАТОВ ИЗ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ БЕНТОНИТА НА МИКРОБИОТУ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ

Суханова А.А.¹, Позднякова А.В.¹,
Заболотная К.Е.^{*1}, Бояндин А.Н.^{1,2},
Ертилецкая Н.Л.¹, Прокопчук Ю.А.¹,
Сырцов С.Н.¹

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

² Институт биофизики ФНЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: zabolotnaya1999@bk.ru

Изотиоцианаты (ИТЦ) – это вещества, образующиеся при гидролизе глюкозинолатов, находящихся в растениях семейства крестоцветные и пасленовые. ИТЦ находят применение в сельском хозяйстве, медицине и пищевой промышленности. В данной статье описано получение комплексов на основе 3-х видов ИТЦ – аллилизотиоцианата (АИТЦ), бензилизотиоцианата (БИТЦ) и фенилэтилизотиоцианата (ФЭИТЦ) и их влияние на экологотрофические группы (ЭТГ) микроорганизмов темно-серой лесной почвы. Доказано, что депонирование ИТЦ в бентонит, способствует пролонгированному выходу АИТЦ, БИТЦ, ФЭИТЦ и уменьшает сроки их гидролиза в почве. При использовании свободных форм ИТЦ, численность аммонификаторов снизилась в 2,6 раз с добавлением АИТЦ, численность азотфиксаторов – выросла в 1,2 раза при внесении БИТЦ, а численность актиномицетов снизилась в 21, 1,4 и 1,9 раз при внесении АИТЦ, ФЭИТЦ и БИТЦ, соответственно. Численность микромицетов возросла только при внесении в почву ФЭИТЦ и БИТЦ. Внесение в почву комплексов ИТЦ с бентонитом привело к значительному снижению численности аммонификаторов в вариантах АИТЦ/бентонит и ФЭИТЦ/бентонит. Внесение в почву комплекса АИТЦ/бентонит увеличило численность азотфиксаторов, актиномицетов и микромицетов. Включение ФЭИТЦ и БИТЦ в комплексы также способствовало увеличению количества микромицетов и азотфиксаторов, соответственно, что, скорее всего, связано с их небольшими концентрациями в отличие от чистых растворов ИТЦ.

Ключевые слова: аллилизотиоцианат (АИТЦ) ♦ бензилизотиоцианат (БИТЦ) ♦ 2-фенилэтилизотиоцианат (ФЭИТЦ) ♦ бентонит ♦ комплексы ♦ экологотрофические группы микроорганизмов

Поступила в редакцию: 29.11.2024

STUDY OF THE EFFECT OF ISOTHIOCYANATES RELEASE FROM BENTONITE-BASED COMPLEXES ON THE MICROBIOTA OF FOREST SOIL

Sukhanova A.A.¹, Pozdnyakova A.V.¹,
Zabolotnaya K.E.^{*1}, Boyandin A.N.^{1,2},
Ertiletskaya N.L.¹, Prokopchuk Yu.A.¹,
Syrtsov S.N.¹

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

² Institute of biophysics FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: zabolotnaya1999@bk.ru

Isothiocyantes (ITCs) are substances formed in the result of hydrolysis of glucosinolates and widely found in plants of the cruciferous and *Solanaceae* families. ITCs are used in agriculture, medicine and the food industry. This article describes the preparation of complexes based on 3 types of ITCs (allyl isothionate (AITC), benzyl isothionate (BITC) and 2-phenylethyl isothiocienate (PEITC)) and their effect on ecologotrophic groups (ETG) of forest soil microorganisms. It has been proved that the deposition of ITC in bentonite contributes to the prolonged release of AITC, BITC, PEITC and reduces the time of their hydrolysis in the soil. Application of free forms of ITC decreased the number of ammonifiers by 2.6 times (when AITC was added), increased the number of nitrogen fixers up by 1.2 times (when BITC was added), and decreased the number of actinomycetes by 21, 1.4 and 1.9 times when AITC, PEITC and BITC were used, respectively. The number of micromycetes increased only when PEITC and BITC were introduced into the soil. The introduction of ITC/bentonite complexes into the soil resulted in a significant decrease in the number of ammonifiers for AITC/bentonite and PEITC/bentonite samples. The introduction of AITC/bentonite complex into the soil increased the number of nitrogen fixers, actinomycetes and micromycetes. The deposition of PEITC and BITC in the bentonite also led to an increase in the number of micromycetes and nitrogen fixers, respectively, which is most likely due to their low concentrations in contrast to free ITC.

Keywords: allyl isothiocyante (AITC) ♦ benzyl isothiocyante (BITC) ♦ 2-phenylethyl isothiocyante (PEITC) ♦ bentonite ♦ complexes ♦ ecological and trophic groups of microorganisms

Принято в печать: 19.12.2024

Цитировать | Cite as

DOI: [10.31163/2618-964X-2024-7-4-252-259](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2024-7-4-252-259)

EDN: QAGKTX



ВВЕДЕНИЕ

Внедрение интенсивных методов земледелия невозможно без использования различных средств защиты растений от патогенов: нематод, вирусов и бактерий, грибов и т.д. Среди мер по защите сельскохозяйственных культур выделяют химические, бактериальные, фитocenотические методы, а в последнее время к ним так же добавились системы направленной контролируемой доставки активных веществ [Sukhanova et al., 2022]. Каждый из этих методов, в зависимости от применения, заболевания растения и/или патогенов, обладает своей обусловленной эффективностью, однако стоит отметить, что все они не лишены недостатков, один из которых – это подавление роста и развития естественной микрофлоры почвы. В результате этого происходит сокращение популяции полезных микроорганизмов и, в некоторых случаях, увеличение на этом фоне числа патогенов, что в конечном итоге приводит к повторной вспышке заболеваний растений, и, как следствие, сокращению объемов выращивания сельскохозяйственных культур [Xiong et al., 2015; Lyu et al., 2020]. Обработка почвы методом фумигации является одной из самых простых, экономичных и эффективных мер по профилактике и борьбе с заболеваниями, передающимися через почву [Kelling et al., 2016; Hoffmann et al., 2020]. В качестве фумигантов используется ряд веществ, таких как дазомет, 1,3-дихлорпропен, аллилизотиоцианат, метанатрий, бромистый метил, хлорпикрин и диметилдисульфид [Cao et al., 2018; Kelling et al., 2016]. Однако последние три были запрещены во всем мире Монреальским протоколом в 2015 году из-за их озоноразрушающих свойств [Cao et al., 2018;]. В связи с этим, широкое применение в сельском хозяйстве стали получать органические соединения, содержащие изотиоцианатную функциональную группу —N=C=S , являющиеся сернистыми аналогами изоцианатов [Xiong et al., 2015].

Изотиоцианаты (ИТЦ) встречаются в различных растениях, образуясь в них при гидролизе глюкозинолатов, катализируемом ферментом мирозиназой в растениях семейства крестоцветные (капуста, хрен, черная горчица и др.). На сегодняшний день обнаружено около 100 видов ИТЦ, но к ИТЦ, которые широко распространены в овощах и обладают противомикробным действием, доказанным экспериментально, в основном относятся бензилизотиоцианат (БИТЦ), сульфорофан (СФН), аллилизотиоцианат (АИТЦ) и 2-фенилэтилизоцианат (ФЭИТЦ) [Mitsiogianni et al., 2019]. Среди них АИТЦ, широко известный как природный вторичный метаболит, содержащий серу, и основной компонент изотиоцианатных веществ, обладает эффективностью против почвенных насекомых, патогенов, нематод и семян сорняков [Ren et al., 2018; Sukhanova et al., 2024].

Почвенные микроорганизмы включают бактерии, грибы и актиномицеты, которые не только участвуют в круговороте питательных веществ, разложении органического вещества и преобразовании углерода, азота и других элементов в почве, но и отвечают за плодородие почв. Разнообразие микробной популяции почвы или изменения в доминирующей флоре могут влиять на рост и развитие сельскохозяйственных культур [Круглов, 2016]. Поэтому изменения в составе и численности микрофлоры также стоит учитывать при тестировании различных препаратов, обладающих нематоцидной, фунгицидной или бактерицидной активностью. На примере АИТЦ Zhu и др. [Zhu, 2020] обнаружили, что АИТЦ оказывает меньшее воздействие на бактериальные, чем на грибковые сообщества и временно сокращает разнообразие почвенных бактерий, в то же время,

стимулируя разнообразие почвенных грибов в долгосрочной перспективе и значительно изменяя структуру грибкового сообщества. Кроме того, другие исследования показали, что относительное обилие бактериальных сообществ почвы изменилось после фумигации АИТЦ – на уровне рода относительное обилие бактерий *Proteus* значительно увеличилось за короткий промежуток времени, в то время как для серных бактерий оно значительно уменьшилось. Среди них значительно увеличилось относительное обилие группы *Firmicutes*, что может быть связано с высокой устойчивостью к внешним стрессовым воздействиям данной группы бактерий [Feld et al., 2015; Rokunuzzaman et al., 2016]. Fang и др. [Fang et al., 2018] обнаружили, что хотя численность некоторых групп бактерий изменилась, фумигация ДМД и АИТЦ не оказала существенного влияния на состав и структуру основных микробных сообществ исследуемой почвы. Численность *Planctomycetes*, *Chloroflexi* и *Acinetobacteria* значительно снизились, в то время как численность *Firmicutes*, *Gemmatimonadetes*, *Actinobacteria*, *Verrucomicrobia*, *Saccharibacteria* и *Parcubacteria* увеличились. Gao и др. так же обнаружили, что фумигация оказала значительное влияние на структуру микробного сообщества [Gao et. al., 2020].

Не смотря на то, что ИТЦ могут эффективно предотвращать заболевания, передающиеся через почву, на сегодняшний день существует мало исследований, посвященных реакции почвенных микроорганизмов на обработку почвы ИТЦ, а особенно их влиянию на разнообразие и структуру бактериальных и грибковых сообществ почвы.

Целью данной работы стало исследование влияния ИТЦ, в том числе депонированных в комплексы с бентонитом, на численность эколого-трофических групп микроорганизмов почвы в зависимости от концентрации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве ИТЦ использовали аллилизотиоцианат (АИТЦ, $M_w=99,15$ г/моль, $\rho=1,01$ г/мл, $T_{\text{кип}}=152^\circ\text{C}$), бензилизотиоцианат (БИТЦ, $M_w=149,21$ г/моль, $\rho=1,12$ г/мл, $T_{\text{кип}}=242^\circ\text{C}$) и 2-фенилэтилизотиоцианат (ФЭИТЦ, $M_w=163,24$ г/моль, $\rho=1,09$ г/мл, $T_{\text{кип}}=140^\circ\text{C}$) («Zoranchem», Китай), в качестве носителя бентонит (порошок серо-белого цвета, степень набухания - 14-16 раз, плотность $0,760\text{—}0,879$ г/см³ или $2\text{--}2,5$ г/см³, температура кипения $381,8^\circ\text{C}$, температура плавления $>1200^\circ\text{C}$, не растворим в воде). Для получения комплексов также использовали Tween 80 (ООО "НПЦ "Биокомпас-С" (Россия)), гексан (ГК «ЭКРОС», Россия), метанол (ООО «АО РЕАХИМ» (Россия)).

Инкапсулирование ИТЦ в бентонит выполняли по методике, описанной de Souza и др. с некоторыми модификациями [de Souza et. al., 2020]. Выбранный ИТЦ (2 г) и бентонит (10 г) в соотношении 1:5 добавляют в раствор, содержащий Tween 80 (4 г) и метанол (60 мл). Смесь перемешивают на магнитной мешалке при 800 об/мин до полной гомогенизации. Затем смесь сушили при 67°C в течение 8 часов. Содержание ИТЦ в полученном супернатанте определяли методом ГХ-МС (газовый хроматограф Agilent 6890N, оснащенный масс-спектрометром Agilent 5975C), с использованием колонки Agilent VF-200ms. В качестве газа-носителя применялся гелий при скорости потока 1,2 мл/мин и разведении 20:1. Температуры устройства ввода и интерфейса были установлены на 300°C и 280°C , соответственно. Использовали следующий температурный режим работы печи: 60°C в течение 2 мин, затем нагрев до 300°C при $17^\circ\text{C}/\text{мин}$, и эту температуру выдерживали в течение 2 мин. Для ионизации образцов использовали электронный удар (70 эВ). Анализировался диапазон отношений масса/заряд от

10 до 500. Использовалось программное обеспечение MSD Chemstation версии E.02.02.1431 [Martin et. Al., 1991]. Эффективность инкапсулирования рассчитывали по формуле:

$$E_{inc}(\%) = C_d C_T \cdot 100 \quad (1)$$

где C_d – количество ИТЦ в образце, определенное методом ГХ (г/г),
 C_T – теоретический максимум включения ИТЦ (г/г).

Для исследования выхода чистых ИТЦ и ИТЦ из комплексов с бентонитом в почву были использованы растворы с чистыми изотиоцианатами, и полученные комплексы с бентонитом. Комплексы с изотиоцианатами (АИТЦ — 200 мг, БИТЦ — 38 мг, ФЭИТЦ — 19 мг – массы рассчитаны на основе полученных концентраций ИТЦ в комплексах) помещали в тканевые мешочки и закапывали по одному мешочку в каждый контейнер с содержанием почвы 100 г. В качестве чистых ИТЦ использовали 600 мкл 0,5 %-ного раствора АИТЦ, БИТЦ или ФЭИТЦ в гексане. Полив и рыхление земли производили дважды в неделю. Пробоотбор производился по точкам соответствующим определенным промежуткам времени. Пробы с растворами и комплексами отбирали в следующие промежутки времени: 1, 3, 7, 14, 30, 45, 60, 75, 90 сутки.

ИТЦ в почве измеряли следующим образом: 15 г образца почвы для исследования помещали в виалу и приливали к ней 10 мл этилацетата. Виалу с почвой для исследования встряхивали на шейкере в течение 15 минут. Полученный экстракт в этилацетате сливали через воронку с фильтровальной бумагой в свежую емкость (колба или виала объемом не менее 40 мл), стараясь, чтобы почва не попала на фильтровальную бумагу. Шаг с добавлением этилацетата, встряхиванием и фильтрованием повторяли еще 3 раза с использованием 5 мл этилацетата, каждый раз фильтровали в одну и ту же емкость. Полученный суммарный почвенный экстракт в этилацетате использовали для ГХ (Agilent 6890N, оснащенный масс-спектрометром Agilent 5975C) (брали по 2 мл и помещали в виалы для хроматографии). Параллельно отбирали 15-20 г почвы на анализ влажности.

Определение состава почвенной микробиоты проводили методом посева разведений почвенной суспензии на твердые селективные среды. Стерильно (над спиртовкой) изымали 2 г исследуемой почвы и помещали их в 200 мл стерильной воды. Колбу инкубировали в течение 1 ч при температуре 32°C и 150 об/мин на шейкере-инкубаторе ES-20 («Biosan», Россия). После инкубирования из колбы с суспензией делали последовательные разведения до 10^5 . Далее делали посева для бактерий образца почвы из разведений 10^4 и 10^5 , для грибов – из разведений 10^2 , 10^3 . Посевы делали на агаризованные селективные среды мясоептонный агар (МПА), Сабуро, крахмало-аммиачный агар (КАА) и Эшби, предназначенные для выделения аммонификаторов, грибов (микромизетов), актиномицетов и азотфиксаторов, соответственно. Использовали готовые среды МПА и Сабуро (Россия). Среду КАА и Эшби делали самостоятельно по прописям. Среда КАА имела следующий состав, г: крахмал – 10, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 2, K_2HPO_4 – 1, MgSO_4 – 1, CaCO_3 – 3, агар-агар – 20, вода дистиллированная – 1000 мл. Агар Эшби имел следующий состав, г: сахароза – 20,0; K_2HPO_4 – 0,2; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,2; NaCl – 0,2; FeSO_4 – 0,1; CaCO_3 – 5,0; вода дистиллированная – 1000 мл. Далее 0,1 мл соответствующего разведения вносили в чашку Петри с застывшей стерильной агаризованной средой, а затем тщательно растирали предварительно прокаленным/стерильным шпателем. Посевы инкубировали в термостате в течение 3-7 суток при температуре 32/25°C. После

инкубирования чашки просматривали, производили подсчет колоний, их описание, рассчитывали общую численность микроорганизмов.

Для исследования ЭТГ микроорганизмов использовали темно-серую лесную почву (г. Красноярск, Октябрьский район, СТО «Рябиновый сад») со следующими агрохимическими свойствами: содержание гумуса 8,18 %, валового калия – 0,77 %, валового фосфора – 2,28 %, азота нитратного – 8,3 мг/кг, аммонийного – 12,24 мг/кг; почва в достаточной степени обеспечена гумусом и питательными веществами. Влажность почвы поддерживали на уровне 60 %. По данным исследования эколого-трофических групп микроорганизмов в контрольном варианте (почва без внесения ИТЦ и комплексов) была выявлена следующая численность аммонификаторов ($1,76 \cdot 10^6$ КОЕ/г) и азотфиксаторов ($1,66 \cdot 10^6$ КОЕ/г).

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием программного пакета Microsoft Excel 2020 для Windows 10. Эксперименты проводились в количестве не менее трех повторностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получены комплексы изотиоцианатов (аллилизотиоцианат, бензилизотиоцианат, 2-фенилэтилизотиоцианат) с наполнителем бентонитом в соотношениях, указанных в Таблице 1. Визуально при инкапсулировании ИТЦ в бентонит, полученные комплексы не имели отличий в цвете по сравнению с чистым наполнителем, но можно было отметить незначительные изменения размеров частиц бентонита (с 2,49 до 8,85 мкм), что в основном связано с методикой получения комплексов (ультразвука).

Таблица 1. Характеристика комплексов ИТЦ с бентонитом

Образец	Концентрация ИТЦ, %	Эффективность инкапсулирования, %
АИТЦ/Бентонит 1:5 метанол + Tween80	1,5	9,2
ФЭИТЦ/Бентонит 1:5 метанол + Tween80	8	48,2
БИТЦ/Бентонит 1:5 метанол + Tween80	16,5	55,4

По данным таблицы 1 отмечено, что одни из самых низких показателей эффективности инкапсулирования зарегистрирован для комплекса АИТЦ/Бентонит 1:5 метанол + Tween80. Это может быть связано с наименьшей молекулярной массой АИТЦ (99,15 г/моль) и соответственно, его высокой степенью летучести. Самый высокий показатель эффективности инкапсулирования отмечен для комплекса БИТЦ/Бентонит 1:5 метанол + Tween80, что также коррелирует с концентрацией ИТЦ в комплексе.

При исследовании выхода ИТЦ из комплексов в почву в контрольных образцах БИТЦ и ФЭИТЦ (почва, обработанная раствором ИТЦ) уже с первых суток можно было наблюдать постепенное снижение содержания ИТЦ с 3 мг/г до 1,5-2,0 мг/г на 3 сутки и до 0,5 мг/г на 7 сутки экспозиции ИТЦ в почве (Рис. 1). В контрольном варианте с АИТЦ падение концентрации ИТЦ произошло уже после первых суток экспозиции в почве – его концентрация составила около 0,0004 мг/г. В целом, внесение ИТЦ в виде растворов в почву привело к быстрому испарению АИТЦ и деградации БИТЦ и ФЭИТЦ.

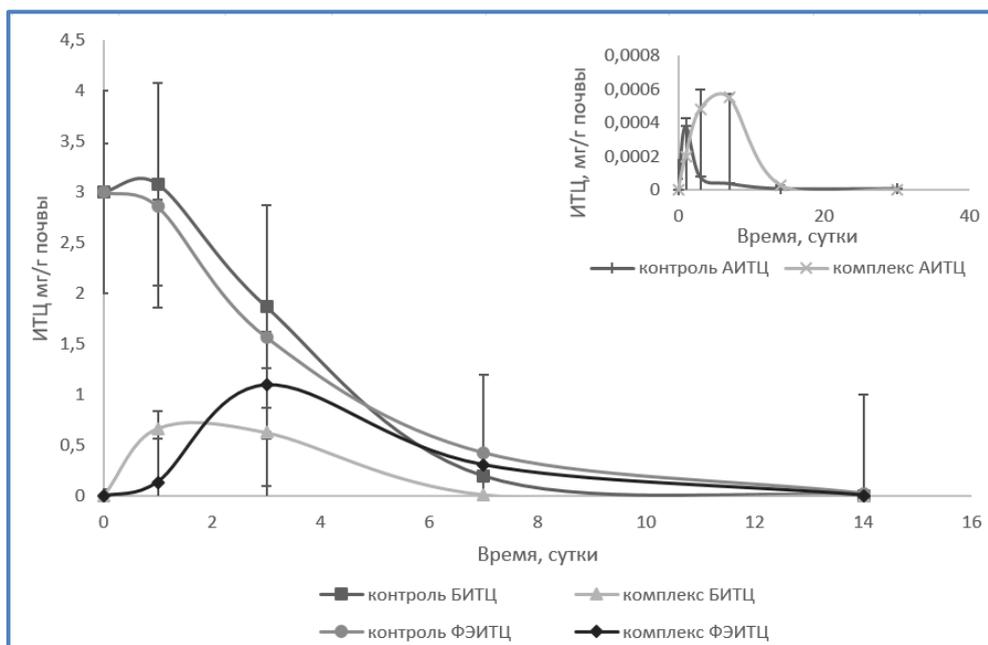


Рис. 1. Профили выхода ИТЦ в почву в течение 75 суток: А – АИТЦ; Б – БИТЦ; В – ФЭИТЦ.

В отличие от обработки почвы растворами ИТЦ, их инкапсулирование в комплексы позволило увеличить время выхода БИТЦ до 10 суток, а АИТЦ и ФЭИТЦ – до 14 суток.

Внесение различных ИТЦ по-разному влияло на соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов в обработанной почве (Таблица 2). Численность аммонификаторов незначительно снизилась только при добавлении в почву свободного АИТЦ (снижение в 2,6 раз до $0,68 \cdot 10^6$ КОЕ/г). На численность азотфиксаторов повлияло только внесение свободного БИТЦ – она незначительно выросла с $1,66 \cdot 10^6$ КОЕ/г до $1,95 \cdot 10^6$ КОЕ/г. Что касается актиномицетов, то их численность изменилась при внесении всех использованных типов ИТЦ. В частности, при внесении АИТЦ, ФЭИТЦ и БИТЦ численность актиномицетов снизилась в 21, 1.4 и 1.9 раз, соответственно. Интересно, что численность микромицетов, напротив, возросла при внесении в почву ФЭИТЦ и БИТЦ (увеличение с $1,5 \cdot 10^3$ КОЕ/г до $9,0 \cdot 10^3$ КОЕ/г и $5,0 \cdot 10^3$ КОЕ/г, соответственно).

Таблица 2. Численность микроорганизмов в почве после обработки свободными и депонированными формами изотиоцианатов, КОЕ/г

Варианты опыта	Аммонификаторы, $\times 10^6$	Азотфиксаторы $\times 10^6$	Актиномицеты, $\times 10^5$	Микромицеты, $\times 10^3$
Контроль	$1,76 \pm 0,04$	$1,66 \pm 0,16$	$6,30 \pm 0,30$	$1,50 \pm 0,21$
АИТЦ свободное	$0,68 \pm 0,02$	$1,75 \pm 0,15$	$0,3 \pm 0,01$	-*
комплекс	$0,96 \pm 0,02$	$3,37 \pm 0,33$	$11,4 \pm 1,5$	$4,00 \pm 0,41$
ФЭИТЦ свободное	$1,84 \pm 0,04$	$1,64 \pm 0,39$	$4,35 \pm 0,28$	$9,00 \pm 0,14$
комплекс	$1,33 \pm 0,12$	$1,51 \pm 0,13$	$2,40 \pm 0,28$	$3,00 \pm 0,28$
БИТЦ свободное	$1,44 \pm 0,10$	$1,95 \pm 0,03$	$3,30 \pm 0,04$	$5,00 \pm 0,70$
комплекс	$1,71 \pm 0,07$	$2,09 \pm 0,01$	$5,65 \pm 0,37$	$1,50 \pm 0,07$

*- численность микромицетов ниже чувствительности метода

Известно, что ИТЦ обладают антибактериальным эффектом и могут влиять на мембранный потенциал таких микроорганизмов, как *Pseudomonas aeruginosa*, *E. coli* и *S. aureus* [Borges et al.]. Этим можно объяснить уменьшение количества аммонификаторов в группах с БИТЦ и ФЭИТЦ, так как в отличие от АИТЦ, эти два типа ИТЦ имеют более

высокую молекулярную массу и в меньшей степени летучи, что повлияло на их более медленный гидролиз в почве и, соответственно, на более выраженное антимикробное действие на микрофлору.

При внесении в почву комплексов ИТЦ с бентонитом, количество аммонификаторов было значительно снижено по сравнению с контролем в вариантах АИТЦ/бентонит и ФЭИТЦ/бентонит. Интересный эффект можно было наблюдать при внесении комплекса АИТЦ/бентонит. Если внесение раствора АИТЦ практически не приводило к изменению численности микроорганизмов по сравнению с контролем, то применение его депонированной в комплекс формы привело к увеличению численности азотфиксаторов, актиномицетов и микромицетов по сравнению с контролем в 2, 1.8 и 2.7 раз, соответственно. Этому, скорее всего, способствовал его более медленный выход за счет инкапсулирования в бентонит. Включение ФЭИТЦ и БИТЦ в комплексы также способствовало увеличению количества микромицетов и азотфиксаторов, соответственно, что, скорее всего, связано с их небольшими концентрациями в отличие от чистых растворов ИТЦ.

В целом показано, что ИТЦ при внесении в почву приводят к уменьшению численности аммонификаторов и увеличению количества азотфиксаторов, микромицетов при депонировании в комплексы. Ранее в работах других авторов было показано, что АИТЦ и БИТЦ обладают высоким антибактериальным и противогрибковым эффектом [Plaszko]. ИТЦ, скорее всего, действуют через свою химическую активность. Они содержат очень электрофильный атом углерода, который реагирует с тиолами, аминами и спиртами, давая дитиокарбаматы, тиомочевину или производные O-тиокарбамата, соответственно [Hansch et al., 2014]. Белки, пептиды и аминокислоты, следовательно, содержат сайты, подходящие для атаки ИТЦ, что приводит к образованию тиомочевин в аминокислоте. В случае ФЭИТЦ было обнаружено, что при его гидролизе происходит медленное высвобождение H₂S фрагментов, что в большей степени влияет на таких бактерий как *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli* и, возможно, в меньшей степени на микромицетов. Однако для изучения подобных механизмов необходимо проведение молекулярных исследований на уровне генов, чтобы понять, как грибы справляются с окислительным стрессом при воздействии ИТЦ. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на почвенные микроорганизмы оказывают АИТЦ и БИТЦ в том числе и депонированные в комплексы.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-16-00184.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круглов Ю.В. Микробное сообщество почвы: физиологическое разнообразие и методы исследования // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. № 1. С. 46-59. DOI: [10.15389/agrobiology.2016.1.46rus](https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.1.46rus)
2. Borges A., Abreu A.C., Ferreira C. et al. Antibacterial activity and mode of action of selected glucosinolate hydrolysis products against bacterial pathogens // Journal of food science and technology. 2015. 52 (8): 4737-4748. DOI: [10.1007/s13197-014-1533-1](https://doi.org/10.1007/s13197-014-1533-1)
3. Cao A., Wang J. Principle and application of soil disinfection. Beijing: Sci. Press, 2015.
4. Fang W., Yan D., Wang X. et al. Responses of nitrogen-cycling microorganisms to dazomet fumigation // Frontiers in Microbiology. 2018. 9: 2529. DOI: [10.3389/fmicb.2018.02529](https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02529)
5. Feld L., Hjelmsø M.H., Nielsen M.S. et al. Pesticide side effects in an agricultural soil ecosystem as measured by amoA expression quantification and bacterial diversity changes // PLoS One. 2015. 10 (5): e0126080. DOI: [10.1371/journal.pone.0126080](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126080)
6. Gao J., Pei H., Xie H. Influence of allyl isothiocyanate on the soil microbial community structure and composition during pepper cultivation // Journal of Microbiology and Biotechnology. 2021. 31 (7): 978-989. DOI: [10.4014/jmb.2012.12016](https://doi.org/10.4014/jmb.2012.12016)

7. Hanschen F.S., Lamy E., Schreiner M., Rohn S. et al. Reactivity and stability of glucosinolates and their breakdown products in foods // *Angewandte Chemie International Edition*. 2014. **3** (43): 11430-11450. DOI: [10.1002/anie.201402639](https://doi.org/10.1002/anie.201402639)
8. Hoffmann M., Ajwa H.A., Westerdahl B.B. et al. Multitactic preplant soil fumigation with allyl isothiocyanate in cut flowers and strawberry // *HortTechnology*. 2020. **30** (2): 251-258. DOI: [10.21273/HORTTECH04362-19](https://doi.org/10.21273/HORTTECH04362-19)
9. Kelling K.A., Stevenson W.R., Speth P.E., James R.V. Interactive effects of fumigation and fungicides on potato response to nitrogen rate or timing // *American journal of potato research*. 2016. **93**: 533–542. DOI: [10.1007/s12230-016-9532-6](https://doi.org/10.1007/s12230-016-9532-6)
10. Lyu J., Jin L., Jin N. et al. Effects of different vegetable rotations on fungal community structure in continuous tomato cropping matrix in greenhouse // *Frontiers in Microbiology*. 2020. **11**: 829. DOI: [10.3389/fmicb.2020.00829](https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00829)
11. Martin T.D., Brockhoff C.A., Creed J.T., Long S.E. Trace Elements in Water, Solids, and Biosolids by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry // *Technology Applications Inc*. 1991.
12. Mitsiogianni M., Koutsidis G., Mavroudis N. et al. The role of isothiocyanates as cancer chemopreventive, chemo-therapeutic and anti-melanoma agents // *Antioxidants*. 2019. **8** (4): 106. DOI: [10.3390/antiox8040106](https://doi.org/10.3390/antiox8040106)
13. Ren Z., Li Y., Fang W. et al. Evaluation of allyl isothiocyanate as a soil fumigant against soil-borne diseases in commercial tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) production in China // *Pest management science*. 2018. **74** (9): 2146-2155. DOI: [10.1002/ps.4911](https://doi.org/10.1002/ps.4911)
14. Rokunuzzaman M., Hayakawa A., Yamane S. et al. Effect of soil disinfection with chemical and biological methods on bacterial communities // *Egyptian Journal of basic and applied sciences*. 2016. **3** (2): 141-148. DOI: [10.1016/j.ejbas.2016.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2016.01.003)
15. Sukhanova A.A., Boyandin A.N., Ertiletskaya N.L. Potato cyst nematode management strategies: current situation and promising approaches // *ACS Agricultural Science & Technology*. 2022. **2** (3): 415-425. DOI: [10.1021/acsagscitech.1c00274](https://doi.org/10.1021/acsagscitech.1c00274)
16. Sukhanova A.A., Prokopchuk Yu.A., Ertiletskaya N.L. et al. Poly-ε-caprolactone-based granules with allylisothiocyanate for controlling of golden cyst potato nematode // *Известия вузов*. 2024. **14** (2): 215-228. DOI: [10.21285/achb.911](https://doi.org/10.21285/achb.911)
17. De Souza A.G., dos Santos N.M.A., da Silva Torin, Rondes F., dos Santos Rosa D., Synergic antimicrobial properties of Carvacrol essential oil and montmorillonite in biodegradable starch films // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. **164** (1): 1737-1747. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2020.07.226](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.226)
18. Xiong W. et al. Different continuous cropping spans significantly affect microbial community membership and structure in a vanilla-grown soil as revealed by deep pyrosequencing // *Microbial ecology*. 2015. **70**: 209-218. DOI: [10.1007/s00248-014-0516-0](https://doi.org/10.1007/s00248-014-0516-0)
19. J.Zhu, Z.Ren, B.Huang et al. Effects of fumigation with allyl isothiocyanate on soil microbial diversity and community structure of tomato. // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020. **68** (5): 1226-1236. DOI: [10.1021/acs.jafc.9b07292](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07292)
20. Plaszkó T., Szűcs Z., Vasas G., Gonda S. Effects of Glucosinolate-Derived Isothiocyanates on Fungi: A Comprehensive Review on Direct Effects, Mechanisms, Structure-Activity Relationship Data and Possible Agricultural Applications // *Journal of Fungi*. 2021; **7** (7): 539. DOI: [10.3390/jof7070539](https://doi.org/10.3390/jof7070539)

Цитировать как

Суханова А.А., Позднякова А.В., Заболотная К.Е., Бояндин А.Н., Ертилецкая Н.Л., Прокопчук Ю.А., Сырцов С.Н. Исследование влияния выхода изотиоцианатов из комплексов на основе бентонита на микробиоту лесной почвы // *Экобиотех*, 2024, Т. 7 № 4. С. 252-259. DOI: [10.31163/2618-964X-2024-7-4-252-259](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2024-7-4-252-259) EDN: QAGKTX

Cited as

Sukhanova A.A., Pozdnyakova A.V., Zabolotnaya K.E., Boyandin A.N., Ertiletskaya N.L., Prokopchuk Yu.A., Syrtsov S.N. Study of the effect of isothiocyanates release from bentonite-based complexes on the microbiota of forest soil. *Èkobioteh*. 2024, V. 7 (4). P. 252-259. DOI: [10.31163/2618-964X-2024-7-4-252-259](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2024-7-4-252-259) EDN: QAGKTX (In Rus.)