

Влияние высших растений в консорциуме с микроорганизмами на агрохимические показатели при биоремедиации нефтезагрязнённых земель

© 2022. В. И. Лямзин, магистрант,
И. Л. Бухарина, д. б. н., профессор, зав. кафедрой,
О. В. Здобяхина, магистрант, А. А. Исупова, магистрант,
Удмуртский государственный университет,
426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1,
e-mail: v-lyamzin@mail.ru

В статье приводятся результаты лабораторного эксперимента по исследованию влияния биопрепарата-нефтедеструктора, эндотрофного микромицета и высшего растения на агрохимические показатели нефтезагрязнённой дерново-подзолистой почвы разного механического состава. Для проведения эксперимента смоделирован этап биоремедиации супесчаной и суглинистой дерново-подзолистых почв с содержанием нефти объёмом 5 и 10%. В качестве мелиорантов в различных сочетаниях были использованы: биопрепарат-нефтедеструктор «Микрозим Петро Трит» (*Bacillus* sp., *Atherobacter* sp., *Nocordia* sp., *Rhodococcus* sp., *Pseudomonas* sp.) (контроль при использовании только биопрепарата), фитомелиорант мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) и эндотрофный микромицет *Fusarium equiseti* (Corda) Sacc. Спустя 6 месяцев по окончании эксперимента в варианте с 5% уровнем загрязнения нефтью дерново-подзолистой суглинистой почвы и совместным внесением биопрепарата-нефтедеструктора, растения и эндотрофного гриба массовая доля подвижного фосфора уменьшилась достоверно в 1,5 раза, подвижного калия – почти в 2 раза по сравнению с контрольным вариантом. При 10% загрязнении дерново-подзолистой суглинистой почвы нефтью при применении этой же совокупности биоремедиантов выявлены максимальная доступность подвижного фосфора для растений и микроорганизмов и интенсивное разложение органического вещества по сравнению с использованием лишь биопрепарата-нефтедеструктора. На дерново-подзолистой супесчаной почве с 5 и 10% загрязнением использование консорциума мелиорантов привело к достоверным изменениям кислотности почвенного раствора, массовой доли подвижного калия и фосфора по сравнению с применением одного лишь биопрепарата.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, биопрепарат, биоремедиация, эндотрофные микромицеты, биологический этап рекультивации, агрохимические показатели почвы.

Influence of plants in consortium with microorganisms on agrochemical indicators of oil-contaminated soils

© 2022. V. I. Lyamzin ORCID: 0000-0002-7550-3011, I. L. Bukharina ORCID: 0000-0001-8084-2547,
O. V. Zdobiyakhina ORCID: 0000-0001-6794-5672, A. A. Isupova ORCID: 0000-0002-3994-0935,
Udmurt State University,
1, Universitetskaya St., Izhevsk, Russia, 426034,
e-mail: v-lyamzin@mail.ru

The article presents the results of laboratory experiment on the study of the effect of biological oil-product destructor, endotrophic fungi (micromycete) and higher plant on agrochemical parameters of oil-contaminated soddy podzolic soil of different soil texture. The bioremediation stage of sandy loam and loamy soddy podzolic soils with an oil content of 5 and 10% was simulated for the experiment. As ameliorants in various combinations were used: biologic “Mikrozim Petro Trit” (*Bacillus* sp., *Atherobacter* sp., *Nocordia* sp., *Rhodococcus* sp., *Pseudomonas* sp.) (control when using only a biological oil-product destructor), the plant ameliorant Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.), and the endotrophic micromycete *Fusarium equiseti* (Corda) Sacc. After the end of the six month laboratory experiment the mass fraction of labile phosphorus in the variant with a 5% level contamination of loamy soddy podzolic soil with oil and the joint application of the oil-destructive biologic product, plant and endotrophic fungi of the genus *Fusarium* decreased certainly by 1.5 times, labile potassium almost 2 times compared with the control variant. Applying the same set of ameliorants was revealed maximum availability of labile phosphorus for plants and microorganisms and intensive organic matter degradation in comparison with the use only a biological oil-product destructor consisting of hydrocarbon-oxidizing microorganisms.

The application of plant in consortium with microorganisms led to significant changes in the actual soil acidity, the mass fraction of mobile potassium and phosphorus in comparison with the use of an only biological product on sandy loam soddy podzolic soil with 5 and 10% oil contamination.

Keywords: oil pollution, biological oil-product destructor, bioremediation, endotrophic fungi, biological stage of remediation, agrochemical indicators of soil.

Восстановление нефтезагрязнённых почв остаётся серьёзной экологической проблемой. Нефтяное загрязнение почв приводит к изменению тонких механизмов функционирования почв, окислительно-восстановительных процессов, снижению активности почвенных ферментов и биоразнообразия микробных комплексов [1]. Скорость процессов самоочищения почв от нефти в любой климатической зоне зависит от взаимодействия и эффективности физических, физико-химических и биологических факторов [2]. Вследствие невысокого естественного плодородия почв Удмуртской Республики и недостаточной скорости их самовосстановления в естественных климатических условиях при проведении работ по рекультивации нефтезагрязнённых почв наиболее эффективным является применение биоаугментации, т. е. применение биопрепаратов, содержащих штаммы микроорганизмов (МО), способных производить деструкцию нефти на более простые углеводороды [3]. Однако сложный химический состав нефти обуславливает различную степень их доступности воздействию МО. Кроме того, эффективность применения биопрепарата-нефтедеструктора зависит от почвенной среды: типа почвы, минерального и органического состава, температуры, влажности, содержания кислорода, процессов адсорбции, окисления, гидролиза, каталитического разложения, состава микробного комплекса [4]. Зачастую эти факторы не соответствуют оптимальным условиям для функционирования углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) [5]. Вместе с тем применение биопрепаратов-нефтедеструкторов позволяет лишь только очищать загрязнённую почву от нефти, не восстанавливая её до исходных агрохимических и биологических параметров. Появляется необходимость не только в деструкции нефтяного загрязнения, но и в восстановлении агрохимических свойств почвы и её биологической активности.

На современном этапе исследований по биоремедиации почв значительное внимание уделяется использованию симбиотических связей организмов разной таксономической принадлежности [6]. Например, связи, воз-

никающие между высшими растениями и эндотрофными микромицетами, оказывают значительное влияние на развитие представителей обеих групп, а также на показатели плодородия почв, на процессы обмена биогенными элементами [7]. Устойчивость микоризы к полициклическим ароматическим углеводородам (ПАУ) и изменение скорости их деградации способствует приобретению растениями питательных веществ, что отражается на формировании растительного покрова на загрязнённой почве [8]. Такие подходы уже находят своё применение в ризоремедиации – стимулировании почвенных МО на этапе биоремедиации почв [9]. Так, при внесении микроскопических грибов (грибов-эндофитов) повышается усвоение фосфора растениями и активность их антиоксидантных ферментов [10], а при добавлении к ним почвенных МО происходит деструкция ПАУ [11]. Дальнейшее изучение особенностей функционирования эндотрофных микромицетов в загрязнённой почвенной среде является перспективной областью исследования при разработке биоремедиационных методов деструкции загрязняющих веществ [12].

Целью нашего исследования явилось изучение влияния мятлика лугового (*Poa pratensis* L.) в консорциуме с углеводородокисляющими микроорганизмами биопрепарата-нефтедеструктора «Микрозим Петро Трит» и эндофитным микромицетом *Fusarium equiseti* (Corda) Sacc. на агрохимические показатели при восстановлении нефтезагрязнённых земель.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено методом многофакторного лабораторного эксперимента, моделирующего биологический этап восстановления нефтезагрязнённых земель. Схема эксперимента включала разное процентное содержание нефти в различных по механическому составу дерново-подзолистых почвах и использование для восстановления нефтезагрязнённых почв биопрепарата-нефтедеструктора «Микрозим Петро Трит», фиторемедианта мятлика лугового (*Poa pratensis* L.) и эндотрофного микромицета

Таблица 1 / Table 1

Схема лабораторного эксперимента / The scheme of laboratory experiment

Фактор А – содержание нефти в почве Factor A – oil content in soil	Фактор В – биоремедиант Factor B – bioremediant	Фактор С – механический состав дерново-подзолистой почвы Factor C – soddy podzolic soil texture	Варианты опыта Experience variants
A1 – содержание нефти 5% от массы почвы (50 г/кг) A1 – oil content 5% of the soil mass (50 g/kg)	B1* – Биопрепарат «Микрозим Петро Трит» (контроль) B2 – Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L.) фиторемедиант B3 – Фиторемедиант + грибы-эндифиты рода <i>Fusarium</i> B4 – Биопрепарат «Микрозим Петро Трит» + фиторемедиант + грибы-эндифиты рода <i>Fusarium</i>	C1 – супесчаная почва C1 – sandy loamy soil	A1B1C1 A1B2C1 A1B3C1 A1B4C1 A2B1C1 A2B2C1 A2B3C1 A2B4C1
A2 – содержание нефти 10% от массы почвы (100 г/кг) A2 – oil content 10% of the soil mass (100 g/kg)	B1* – Biological product “Microzyme Petro Trit” (control) B2 – <i>Poa pratensis</i> L. plant bioremediant B3 – plant bioremediant + <i>Fusarium</i> fungi B4 – Biological product “Microzyme PetroTrit” + plant bioremediant + <i>Fusarium</i> fungi	C2 – суглинистая почва C2 – loamy soil	A1B1C2 A1B2C2 A1B3C2 A1B4C2 A2B1C2 A2B2C2 A2B3C2 A2B4C2

Примечание: * – варианты A1B1C1, A2B1C1, A1B1C2 и A2B1C2 были использованы в качестве контрольных вариантов.

Note: * – variants A1B1C1, A1B1C2, A2B1C1 and A2B1C2 were used as control variants.

Fusarium equiseti (Corda) Sacc. Все варианты опыта закладывались в 4-х кратной повторности (табл. 1).

В качестве контроля (варианта сравнения) для каждого типа почв и степени загрязнения использован вариант с биопрепаратом «Микрозим Петро Трит»: для супесчаной почвы и 5% загрязнения нефтью – контроль A1B1C1 и для 10% загрязнения – A2B1C1; для суглинистой почвы с 5% загрязнением – A1B1C2 и для 10% загрязнения – A2B1C2. Таким образом, задачей эксперимента являлось выявление мелиоранта (группы мелиорантов), влияющих на агрохимические показатели при восстановлении разных типов почв при 5 и 10% загрязнении нефтью.

В лабораторном эксперименте использовали контейнеры, содержащие по 0,5 кг дерново-подзолистой супесчаной или суглинистой почвы, в которую, согласно схеме эксперимента, была внесена нефть массой 25 и 50 г (соответственно 50 и 100 г/кг) для моделирования 5 и 10% загрязнения почвы соответственно. Согласно схеме эксперимента, был внесён биопрепарат «Микрозим Петро Трит» в виде водной суспензии из расчёта 1 и 1,5 г на 1 кг почвы в вариантах 5 и 10%

загрязнения нефтью согласно технологии применения биопрепарата. Биопрепарат представляет собой микробиологический реагент биодеструктор нефтяных углеводородов, предназначенный для очистки почвы от загрязнения нефтяными углеводородами. Биоценоз биопрепарата представлен такими МО как *Bacillus* sp., *Atherobacter* sp., *Nocardia* sp., *Rhodococcus* sp., *Pseudomonas* sp. Спустя 10 дней в соответствующие схеме варианты опыта были посеяны семена мятлика лугового (*Poa pratensis* L.). Через 10 дней после прорастания семян в соответствующие варианты опыта была внесена грибная суспензия объёмом 25 мл на 1 контейнер (титр суспензии: споры – 5 млн шт./мл, фрагменты мицелия – 150 шт./мл). Для производства суспензии («Способ приготовления и внесения грибного биопрепарата для повышения устойчивости растений», решение о выдаче патента от 02.04.2020), была использована культура эндотрофного микромицета *F. equiseti* (Corda) Sacc., выделенная из корней растений, произрастающих в условиях длительного загрязнения почв тяжёлыми металлами.

Лабораторный эксперимент проводили в контролируемых условиях климатической

камеры BINDERKBWF. С 08:00 до 18:00 ч был установлен дневной режим: температура +23 °С, максимальное освещение 15000 лк и вентиляция. С 18:00 до 08:00 ч устанавливали ночной режим: температура +18 °С, вентиляция и отсутствие освещения. В вариантах опыта осуществлялся полив почвы, а в вариантах без растений регулярно производили аэрацию почвы (рыхление).

По завершении эксперимента был проведён анализ почв на содержание нефти и основные агрохимические показатели (ГОСТ 26483-85, ГОСТ Р 54650-2011, ГОСТ 26213-91, ГОСТ 26489-85, ГОСТ 26951-86) в аккредитованной лаборатории АО Агрохимцентр «Удмуртский».

Результаты и обсуждение

Эксперимент проводили на дерново-подзолистых суглинистой и супесчаной почвах, наиболее подвергаемых нефтяному загрязнению в Удмуртии. По окончании эксперимента при 5 и 10% загрязнении супесчаной и суглинистой почв нефтью достоверных изменений в содержании нефти по вариантам опыта не обнаружено (табл. 2). При этом наблюдали значимые различия агрохимических показателей нефтезагрязнённых почв (табл. 2).

Достоверное увеличение показателя рН почвенного раствора выявлено в варианте А1В3С1 по сравнению с контрольным вариантом А1В1С1 (табл. 2). Таким образом, в супесчаной почве с 5% содержанием нефти использование совокупности мелиорантов фиторемедиант + гриб увеличивает значение рН почвы, сводя его в щелочную сторону. Для супесчаной почвы с 10% загрязнением нефтью в варианте А2В4С1 (полный комплекс мелиорантов) значение рН почвенного раствора оказалось достоверно ниже, чем в контрольном варианте А2В1С1, наблюдалось снижение показателя до нейтральных значений (табл. 2).

В супесчаной почве с 5% загрязнением нефтью содержание подвижного фосфора и калия в варианте А1В3С1 оказалось достоверно меньше в 2,5 и 1,5 раза соответственно, чем в контрольном варианте, что объясняется более интенсивным поглощением этих элементов растениями по сравнению с УОМ (табл. 2). На этих же почвах при 10% загрязнении (варианты А2В2С1 и А2В3С1) выявлено достоверное снижение массовой доли фосфора в 2,2 и 2,4 раза соответственно по сравнению с контрольным вариантом. Растение мелио-

рант, а также совокупность растения и гриба проявляют большую активность в усвоении фосфора, чем отдельно внесённые УОМ биопрепарата или же полная совокупность мелиорантов.

При 5% загрязнении содержание массовой доли подвижного калия по окончании эксперимента в варианте А1В4С2 оказалось достоверно почти в 2 раза меньше, чем в контрольном (А1В1С2) варианте, и более чем в 1,5 раза достоверно меньше, чем в вариантах А1В2С2 и А1В3С2 (табл. 2). Полученные результаты подтверждают, что совместное применение биопрепарата-нефтедеструктора, грибов-эндофитов и растений повышает доступность подвижного калия, как для растений, так и для МО при 5% загрязнении суглинистой почвы нефтью.

На суглинистых почвах результаты определения агрохимических показателей почвы по окончании эксперимента отличались от результатов на супесчаных грунтах. При 5% загрязнении использование полного консорциума мелиорантов привело к достоверному снижению содержания подвижного фосфора почти в 1,5 раза по сравнению с контрольным вариантом применения биопрепарата (табл. 2). При 10% загрязнении выявлено существенно меньшее по сравнению с контролем содержание подвижного фосфора (в 1,8 и 1,7 раза для вариантов А2В3С2 и А2В4С2 соответственно) (табл. 2). Таким образом, совместное применение биопрепарата, эндотрофных грибов и растений повышает доступность подвижного фосфора как для растений, так и для МО при 5 и 10% загрязнении суглинистой почвы.

На суглинистых почвах применение разных мелиорантов повлияло на содержание нитратного азота и массовую долю органического вещества в почве при 10% загрязнении почв нефтью. В варианте А2В3С2 содержание нитратного азота достоверно уменьшилось почти в 2 раза по сравнению с контрольным вариантом, и почти в 1,2 раза по сравнению с вариантом А2В2С2 (табл. 2). Это можно объяснить положительной ролью грибов-эндофитов в снабжении растений азотом в форме нитратов. На этом же типе почв также при 10% содержании нефти при использовании полного консорциума мелиорантов (А2В4С2) по окончании вегетационного эксперимента выявлено существенно более низкое, по сравнению с использованием только биопрепарата, содержание органического вещества в почве, что указывает на эффективность разложения органического вещества МО и повышения его

Таблица 2 / Table 2

Агрохимические показатели нефтезагрязнённых почв после завершения лабораторного эксперимента
 Agrochemical indicators of oil-contaminated soils at the end of the laboratory experiment

Механический состав дерново-подзолистой почвы / Soddy podzolic soil texture	Содержание нефти Oil concentration	Биоремедианты* / Bioremediates*			
		B1	B2	B3	B4
		содержание нефти, мг/кг / oil concentration, mg/kg			
Суглинистая Loamy soil	5%	9900±3500**	13800±3500	11300±2800	12000±3000
	10%	20300±5100	26600±6700	23800±6000	22000±5500
Супесчаная Sandy loamy soil	5%	11000±2800	16600±4100	13000±3300	11600±2800
	10%	27000±6800	31000±7700	32500±8100	27900±7000
pH солевой вытяжки / pH range of salt extract					
Суглинистая Loamy soil	5%	7,4±0,1	7,4±0,1	7,3±0,1	7,4±0,1
	10%	7,3±0,1	7,5±0,1	7,5±0,1	7,5±0,1
Супесчаная Sandy loamy soil	5%	6,7±0,1	6,9±0,1	7,2±0,1	6,9±0,1
	10%	7,1±0,1	7,0±0,1	7,0±0,1	6,8±0,1
Массовая доля подвижного калия, мг/кг Mass fraction of labile potassium, mg/kg					
Суглинистая Loamy soil	5%	61±12	52±10	57±11	32±6
	10%	35±7	32±6	29±6	29±6
Супесчаная Sandy loamy soil	5%	31±6	23±5	20±4	22±4
	10%	33±7	28±6	26±5	34±7
Массовая доля подвижного фосфора, мг/кг Mass fraction of labile phosphorus, mg/kg					
Суглинистая Loamy soil	5%	129±25	145±29	127±25	86±17
	10%	91±18	61±29	51±10	53±11
Супесчаная Sandy loamy soil	5%	30±11	16±6	12±4	19±7
	10%	53±11	24±8	22±8	41±8
Массовая доля органического вещества, % Mass fraction of organic matter, %					
Суглинистая Loamy soil	5%	3,5±0,5	3,3±0,5	3,3±0,5	3,5±0,5
	10%	4,5±0,7	6,5±0,7	4,7±0,7	2,8±0,6
Супесчаная Sandy loamy soil	5%	5,3±0,5	4,4±0,7	5,1±0,5	5,3±0,5
	10%	8,1±0,8	6,2±0,6	8,8±0,9	7,7±0,8
Массовая доля нитратного азота, мг/кг Mass fraction of nitrate nitrogen, mg/kg					
Суглинистая Loamy soil	5%	5,5±1,7	3,1±0,9	3,5±1,1	3±0,9
	10%	7,6±2,3	4,7±1,4	< 2,8	5,5±1,7
Супесчаная Sandy loamy soil	5%	3,1±0,9	< 2,8	< 2,8	3,5±1,1
	10%	4,9±1,5	4,5±1,4	3,3±1,0	6,6±2,0

Примечание: * – биоремедианты: B1 – биопрепарат «Микрозим Петро Трит», B2 – мятлики луговой (*Poa pratensis* L.), B3 – фиторемедиант + грибы-эндофиты р. *Fusarium*, B4 – биопрепарат «Микрозим Петро Трит» + фиторемедиант + грибы-эндофиты р. *Fusarium*; ** – среднее значение показателя ± стандартное отклонение.

Note: * – bioremediates: B1 – biological product “Microzyme PetroTrit”, B2 – plant bioremediant, B3 – plant bioremediant + *Fusarium* fungi, B4 – biological product “Microzyme PetroTrit” + plant bioremediant + *Fusarium* fungi; ** – average value of the parameter ± standard deviation.

доступности для растений при использовании полного консорциума мелиорантов.

Заключение

Предложенные совокупности мелиорантов оказали влияние на агрохимические показатели нефтезагрязнённых почв по сравнению с использованием лишь биопрепарата-нефтедеструктора. На супесчаной почве при концентрации нефти 5% и использовании в качестве мелиоранта сочетания растение + микромицет происходит увеличение значений рН почвенного раствора, а также достоверное снижение содержания подвижных форм калия и фосфора. При 10% загрязнении нефтью при применении фиторемедианта, а также совокупности мелиорантов фиторемедиант + гриб, наблюдается достоверное уменьшение подвижного фосфора, а при использовании полного консорциума мелиорантов – снижение рН почвенного раствора до нейтральных показателей. На суглинистой почве с концентрацией нефти 5% и полным консорциумом мелиорантов выявлено достоверное уменьшение содержания подвижных форм калия и фосфора, а при 10% нефти в почве – достоверное снижение содержания органического вещества в почве по сравнению с применением лишь биопрепарата-нефтедеструктора. Сочетание фиторемедианта и гриба при содержании нефти 10% в суглинистой почве привело к снижению содержания нитратного азота.

Результаты эксперимента показали, что в условиях нефтяного загрязнения грибы-эндифиты способны влиять на интенсивность разложения органического вещества почвы и на содержание минеральных элементов в почве, скорее всего, на их доступность как для УОМ, так и для растений.

References

1. Kulikova O.A., Terekhova V.A., Mazlova E.A., Nishkevich Yu.A., Kydralievа K.A. Ecotoxicological characteristics of oil-contaminated soils (sludges) after their reagent treatment // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 120–126 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-120-126
2. Khabibullina F.M., Ibatullina I.Z. Transformation of the micromycetes community in peat-gley soils of

the Far North with oil pollution // *Theoretical and Applied Ecology*. 2011. No. 3. P. 76–85 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-3-076-085

3. Nazarko M.D., Shcherbakov V.G., Aleksandrova A.V. Prospects of using microorganisms for biodegradation of oil contamination of soils // *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 2004. No. 4. P. 89–91 (in Russian).

4. Rashmi M., Venkateswara S.V. Mycoremediation of heavy metal and hydrocarbon pollutants by endophytic fungi // *Mycoremediation and Environmental Sustainability. Fungal Biology*. 2017. V. 1. P. 133–151. doi: 10.1007/978-3-319-68957-9_8

5. Lyamzin V.I., Bukharina I.L., Zdobyakhina O.V., Islamova N.A., Zagrebina V.S. Research of the effectiveness of the joint application of the biological product and endotrophic fungi at the stage of biological recovery of oil contaminated soils // *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2018. No. 3 (45). P. 94–98 (in Russian).

6. Christofi N., Ivshina I.B., Kuykina M.S. Biological treatment of crude oil contaminated soil in Russia // *Contaminated land and groundwater. Future directions*. London: Geological Society Engineering Geology Publications, 1998. V. 14. P. 45–51.

7. Kireyeva N.A., Galimzyanova N.F., Miftakhova A.M. Micromycetes of soils polluted with oil and their phytotoxicity // *Mikologiya i fitopatologiya*. 2000. No. 1. P. 36–41 (in Russian).

8. Miftakhova A.M. Some aspects of the relationship between higher plants and microscopic fungi in soils polluted with oil // *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2005. No. 3. P. 41–46 (in Russian).

9. Prabhu A.A., Chityala S., Jayachandran D., Naik N., Dasu V.V. Rhizoremediation of environmental contaminants using microbial communities // *Plant-microbe interactions in agro-ecological* / Eds. D.P. Singh, H.B. Singh, R. Prabha. Singapore: Springer, 2017. P. 433–453. doi: 10.1007/978-981-10-6593-4_17

10. Nadeem S.M., Khan M.Y., Waqas M.R., Binyamin R., Akhtar S., Zahir Z.A. Arbuscular mycorrhizas: an overview // *Arbuscular mycorrhizas and stress tolerance of plants* / Ed. Q.-Sh. Wu. Singapore: Springer, 2017. P. 1–24. doi: 10.1007/978-981-10-4115-0_1

11. Fecih T., Baoune H. Arbuscular mycorrhizal fungi remediation potential of organic and inorganic compounds // *Microbial Technology for the Welfare of Society, Microorganisms for Sustainability*. 2019. V. 17. P. 247–257. doi: 10.1007/978-981-13-8844-6_11

12. Mathur N., Singh J., Bohra S. Arbuscular mycorrhizal fungi: a potential tool for phytoremediation // *Journal of Plant Sciences*. 2007. V. 2. P. 127–140. doi: 10.3923/jps.2007.127.140