



БИОТЕХНОЛОГИИ В СНИЖЕНИИ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 631.4

Интенсивное использование в зимний период противогололедных реагентов для борьбы с наледью на дорогах, тротуарах и дворовых территориях приводит к накоплению легкорастворимых солей и обменного натрия в городских почвах, усиливая процессы антропогенного галогенеза. Остаточное количество ПГР негативно сказывается не только на состоянии почвенного покрова, приводя к нарушению морфологического строения и химического состава почв, их деградации, но и древесных насаждений, вызывая преждевременное опадение листьев, усыхание и гибель растений [1–5], что в итоге негативно влияет на комфортность городской среды.

Александр Яковлев,
завлабораторией
экологической физиологии
растений Центрального
ботанического сада
НАН Беларуси,
кандидат
биологических наук,
доцент

Галина Булавко,
ведущий научный
сотрудник ЦБС
НАН Беларуси, кандидат
биологических наук,
доцент

Алла Николайчук,
старший научный
сотрудник ЦБС
НАН Беларуси,
кандидат
биологических наук

Ирина Ананьева,
завлабораторией
взаимоотношений
микроорганизмов почвы
и высших растений
Института микробиологии
НАН Беларуси,
кандидат
биологических наук

Зинаида Алещенкова,
главный научный
сотрудник Института
микробиологии
НАН Беларуси,
доктор
биологических наук

Ухудшающая экологическая обстановка г. Минска, особенно вдоль улиц и дорог, требует выработки определенной стратегии озеленения, направленной на создание устойчивых насаждений разных типов, способных не только оздоровить среду обитания, но и длительно сохранить декоративность.

Для улучшения эдафических условий, способствующих оптимальному росту и развитию растений, все более активно применяют биологические удобрения, основу которых составляет культура живых клеток микроорганизмов [6–8]. Важную роль в развитии растений играют интродуцированные в почву в составе микробных удобрений природные азотфиксаторы и фосфатмобилизаторы, механизм действия которых может быть прямым и опосредованным. Первый состоит в обеспечении элементами минерального питания за счет фиксации атмосферного азота диазотрофами, солюбилизации нерастворимых форм фосфора фосфатмобилизующими бактериями и арбускулярными микоризными грибами, второй – в регулировании роста и развития метаболитами фитогормональной природы. Инокуляция растений микроорганизмами стимулирует рост корней, увеличивая их размер и биомассу, что способствует увеличению поверхности корня, оказывает положительное влияние на потребление воды и поглощение питательных веществ, ослабляет негативные проявления солевого стресса у зеленых насаждений.

В городском озеленении биологические удобрения пока используются недостаточно, а исследования участия микроорганизмов в снятии стрессового воздействия засоления на растения до настоящего времени единичны и сфокусированы лишь на оценке ростостимулирующего эффекта у последних [9, 10]. Поэтому данное направление чрезвычайно актуально и привлекает внимание многих ученых и практиков.

В этой связи, в рамках выполнения задания Государственной программы «Наукоёмкие технологии

и техника» на 2016–2020 гг. сотрудниками лаборатории экологической физиологии растений ЦБС НАН Беларуси и лаборатории взаимоотношений микроорганизмов почвы и высших растений Института микробиологии НАН Беларуси проведены научные исследования, целью которых были разработка и внедрение технологии применения микробных удобрений на основе галотолерантных бактерий для минимизации негативного влияния противогололедных реагентов на городские насаждения и почву.

Из ризосферы растений, произрастающих вокруг солеотвалов Старобинского месторождения калийных солей ОАО «Беларуськалий», выделены штаммы бактерий *p. Bacillus* и *p. Rhodococcus*, адаптированные к высоким концентрациям хлорида натрия (5–15%), обладающие комплексом агрономически ценных свойств (азотфиксация, фосфатмобилизация, ростстимуляция, повышение стрессоустойчивости и др.), обусловленных наличием нитрогеназы, фосфатазы, синтезом ИУК и АЦК-дезаминазы [11], и использованные впоследствии в качестве компонентов микробного препарата (МБП) «Биотилия» [12].

Объектами исследования являлись зеленые посадки, относящиеся к категории «насаждения на улицах и дорогах» (согласно постановлению Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь от 29.12.2004 г. №40). Полевые изыскания в 2019–2020 гг. были проведены в посадках 10–12-летнего возраста деревьев пяти пород (каштана конского – *A. hippocastanum*, клена остролистного – *A. platanoides*, липы сердцелистной – *T. cordata*, рябины обыкновенной – *S. aucuparia*, ясеня обыкновенного – *F. excelsior*), произрастающих вдоль дорожных линий с различной степенью транспортной нагрузки нашей столицы (11 ключевых участков) и в г. Могилеве (5) (табл. 1).

Для приготовления рабочего раствора препарата 10%-ной концентрации к 1 л суспензии микробного удобрения «Биотилия» добавляли 9 л воды и поливали 1 посадочное место. Обработка проведена дважды за сезон – в конце мая и конце июня.

Были использованы традиционные агрохимические [13], геоботанические [14], микробиологические [15], эколого-физиологические [16] методы исследований.

Ухудшение эдафических условий в посадках лиственных пород вдоль ключевых автомагистралей г. Минска, выявленное нами, сопровождалось аккумуляцией свободных ионов Cl^- и Na^+ в листьях изучаемых видов. Наиболее высоким уровнем накопления хлорид-иона ассимилирующими органами у липы характеризовались посадки на проспекте Независимости (КУ-5-7), а также на ул. Орловской (КУ-8), они достигали от 60,7 до 183,8 мг/г сухой массы. При этом уровень аккумуляции данного ксенобиотика в растительных тканях у деревьев, оцененных как «сильно ослабленные», был ниже, чем для категории деревьев «ослабленные», что, по всей вероятности, обусловлено более активным метаболизмом у последних, пытающихся противостоять негативному влиянию городских условий.

Концентрация анионов натрия в тканях листьев на всех пробных участках варьировала в небольшом диапазоне от 19,5 до 27,9 мг/г сухой массы. Минимальное количество отмечено в посадках липы вдоль улицы Академика Купревича (КУ-1, 2), максимальные – на проспекте Независимости (КУ-8).

Двухразовое внесение (в конце мая и в конце июня) двух штаммов микробиологических препаратов в посадки деревьев вдоль улиц г. Минска отличалось различием в ответной реакции опытных растений на данный агроприем. Результаты обработки МБП в первый срок характеризовались во второй декаде мая незначительным увеличением концентрации хлорид-иона в ассимилирующих органах липы, каштана и ясеня относительно контроля, что может быть связано, в первую очередь, с адаптацией почвенного микробиома урбаногема к добавлению новых групп микроорганизмов извне.

Повторный отбор образцов и анализ листьев в июле показал, что в вариантах с обработкой растений МБП концентрация свободных ионов Cl^- и Na^+ в листьях изучаемых пород была на 9–17% ниже, чем в вариантах без применения микробных препаратов. Более высокими темпами активизация снижения уровня токсичных ионов в листьях отмечалась в посадках липы возле ГУМа (КУ-5, 6) и на улице Орловской (КУ-7).

Зимний период 2019/2020 гг., характеризовавшийся значительным количеством бесснежных и безморозных дней, способствовал существенному (в 3 раза) снижению количества противогололедных материалов на дорогах г. Минска, по сравнению с аналогичным временным интервалом

2018/2019 гг., что в совокупности с интенсивными атмосферными осадками в виде дождя привело к минимальному накоплению остаточных количеств солевых реагентов в почве городских зеленых насаждений легкого механического состава (КУ-3, 4) во многом сопоставимому с контролем (диапазон варьирования Na_2O 8,15–14,57 мг/100 г почвы). Для суглинистых почв на ключевых участках (КУ-7, 8 и особенно возле ГУМа (КУ-5, 6) содержание натрия было сопоставимым с результатами марта 2019 г.

Так, в посадках липы сердцелистной по ул. Орловской различия в накоплении натрия и хлора в контрольном варианте и варианте с внесением препаратов не превышали 2,5% для натрия и 0,9% для хлора. В лунках с липами на пр-те Независимости (КУ-7) аналогичные

№ п-п	Месторасположение временного участка наблюдения	Тип и способ посадки деревьев	Древесная порода
1.	г. Минск ул. Академика Купревича, справа	Однорядная посадка на газоне	<i>T. cordata</i>
2.	ул. Академика Купревича, слева	Однорядная посадка на газоне	<i>T. cordata</i>
3.	пр-т Независимости, 45 справа, (гимназия №23)	Однорядная посадка на газоне	<i>A. hippocastanum</i>
4.	пр-т Независимости, 45 слева, (напротив гимназии №23)	Однорядная посадка на газоне	<i>A. hippocastanum</i>
5.	пр-т Независимости, 21 справа, (ГУМ)	Однорядная посадка в лунке	<i>T. cordata</i>
6.	пр-т Независимости, 20 слева, (напротив ГУМ) (<i>T. cordata</i>)	Однорядная посадка в лунке	<i>T. cordata</i>
7.	пр-т Независимости, 14 слева (<i>T. cordata</i>)	Однорядная посадка в лунке	<i>T. cordata</i>
8.	ул. Орловская, справа (ост. общ. трансп. «Выставочный комплекс»)	Однорядная посадка на газоне	<i>T. cordata</i>
9.	пр-т Победителей, справа, (ост. общ. трансп. «Радужная»)	Двурядная посадка на газоне	<i>F. excelsior</i>
10.	пр-т Победителей, справа, (ост. общ. трансп. «Радужная»)	Двурядная посадка на газоне	<i>F. excelsior</i>
11.	участок МКАД 50 км в р-не ул. Хмаринская, 2	Двурядная посадка на газоне	<i>A. platanoides</i>
12.	г. Могилев ул. Симонова, 20, справа	Двурядная посадка на газоне	<i>T. cordata</i>
13.	ул. Симонова, 19, слева	Однорядная посадка на газоне	<i>S. aucuparia</i>
14.	ул. Якубовского, 18, справа	Однорядная посадка на газоне	<i>A. hippocastanum</i>
15.	пр-т Пушкинский, 4 справа	Однорядная посадка на газоне	<i>T. cordata</i>
16.	ул. Первомайская, 31 справа	Однорядная посадка в лунке	<i>T. cordata</i>

Таблица 1. Местонахождение временных участков наблюдения за состоянием древесных насаждений г. Минска и г. Могилева

показатели составили соответственно 4,1% и 1,1%, а возле ГУМа (КУ-5, 6) они были практически снижены до 0,7% для натрия и 0,2% для хлора. И только в посадках на ул. Академика Купревича (КУ-1, 2) содержание натрия в контроле оказалось на 9–11% выше, чем в варианте с обработкой. Для ясеня обыкновенного на пр-те Победителей и в 1-м ряду от дороги (КУ-9), и во 2-м (КУ-10) оно варьировалось соответственно в диапазоне 73–81 мг/100 г сухой почвы, а в обработанных препаратами вариантах – 65–67 мг/100 г.

На урбанизированных территориях изменялись и агрохимические характеристики. Показатель рН почв изменялся незначительно – от нейтрального до слабощелочного состояния. Содержание органического вещества в верхнем слое не превышало 5,5%, что характерно для городских почв. Максимальные значения в основном приходились на участки, где формировался плодородный слой за счет привозных грунтов с высокой долей торфа. В вариантах опыта с использованием микробных препаратов также проявились неоднозначные тенденции в поведении остаточных количеств противогололедных материалов.

К концу сезона вегетации растений в условиях максимального техногенного загрязнения улиц (КУ-5–7) установлено возрастание содержания как аммонийной формы азота (113,3 мг/100 г почвы), так и подвижных форм фосфора (217,2 мг/100 г почвы), обусловленных, в первую очередь, положительным влиянием микробных удобрений за счет азотфиксации и фосфатмобилизации в почвенном субстрате урбаноземов по сравнению с контрольным вариантом (98,3 и 184,5 мг/100 г почвы соответственно).

Установлено, что городские почвы имели более низкие показатели как содержания микробной массы, так и дыхания субстрата относительно почв зонального ряда. Определение биологической активности урбаноземов на ключевых участках г. Минска, проведенное в течение вегетационного периода растений, показало устойчивое повышение изучаемых характеристик на ключевых участках наблюдения с высокой и низкой степенью негативного воздействия остаточных количеств противогололедных материалов. В посадках липы мелколистной на КУ-5–7 и на ул. Академика Купревича (КУ-1, 2) все определяемые показатели были стабильно выше (в 1,2–1,4 раза) контрольных площадок (без обработки). Под ясенем обыкновенным на пр. Победителей (КУ-9, 10) при небольшом повышении активности респирации от $9,7 \pm 0,4$ мкг $\text{CO}_2/\text{г}$ почвы в сутки в контроле до $10,6 \pm 1,0$ мкг $\text{CO}_2/\text{г}$ почвы в сутки

в варианте с обработкой запасы микробной массы имели значимое превышение контроля $152,6 \pm 4,0$ против $190,7 \pm 6,9$ мкг С/г почвы. Аналогичная закономерность наблюдалась и в посадках липы мелколистной на ключевых участках в г. Могилеве, что может свидетельствовать об усилении существующего в почве микробного комплекса за счет накопительного эффекта от применения микробных препаратов. При этом городские почвы на территории областного центра оказались более отзывчивыми на внесение бактериальных удобрений, эффект от обработки которыми здесь сохранялся на всех ключевых участках без исключения.

На засоленных почвах микоризованные растения более устойчивы, чем немикоризованные, в связи с тем, что наблюдается высокое осмотическое давление в гифах гриба по сравнению с клетками корней, и за счет медленного накапливания хлоридов, которые и приводят к солевому шоку. В этой связи в полевом эксперименте проанализированы данные степени микоризации корневых систем 4 древесных пород, используемых в озеленении г. Минска.

Выявлено, что в сложных экологических условиях минимальное развитие микоризы получили корни липы (0–11%), клена (1–5%) и каштана (0–8%) (рисунок). Причем для липы и каштана, характеризующихся сильно ослабленным состоянием на пр-те Независимости (КУ-3, 4 и КУ-5, 6), в корнях не обнаружено микоризного компонента вообще. У ясеня обыкновенного степень микоризации была самой высокой и независимо от уровня антропогенной нагрузки превышала 80%, что соответствует растениям ненарушенных местообитаний. В отдельных случаях выявлено повышение доли микоризованных корней: в районе Главпочтамта (от 5 до 59% у липы сердцевидной), гимназии №23 (от 0 до 9% у каштана

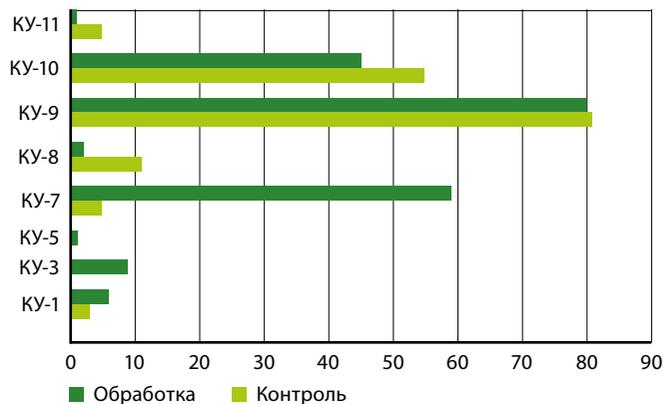


Рисунок. Развитие микоризы у древесных растений в полевом эксперименте, %

конского) и на контрольной площадке на ул. Академика Купревича (от 3 до 6% у липы сердцевидной). Наряду с этим были участки, где степень развития микоризной инфекции после обработки удобрениями сокращалась: на ул. Орловской (от 11 до 2% у липы сердцевидной), напротив гимназии №23 (от 8 до 5% у каштана конского).

При микроскопировании корней в клетках обнаружены арбускулы и везикулы, а на поверхности корней развит наружный мицелий, позволяющий получать растению дополнительное питание. Таким образом, в условиях города почти все растения имели в разной степени микоризный симбиоз, но усиление почвенного микробоценоза бактериальными удобрениями не всегда повышало долю микоризованных корней.

Важным элементом, характеризующим снижение негативного влияния остаточных количеств противогололедных материалов на деревья, считается оценка их индекса состояния (ИС). По материалам Лесотехнической академии [14], к категории здоровых следует относить насаждения, имеющие средний балл этого показателя не более 1,5; ослабленных – с баллом 1,6–2,5; сильно ослабленных – 2,6–3,9, с более высоким баллом относят к категории усыхающих.

Анализ данных, полученных в результате оценки жизненного состояния в городских придорожных посадках, проводился с учетом различных условий их мест произрастания. Распределение обследованных деревьев по ИС показало, что наиболее низкий показатель жизненного состояния (3,2–3,5) имели те, которые произрастали в «лунках» среди замощенного пространства. Это позволяло отнести их к категории «сильно ослабленных» деревьев (табл. 2). Насаждения в однорядной посадке на газоне, а также в первом ряду многорядной характеризовались как «ослабленные» (1,7–1,8), а во втором ряду от дороги – «здоровые с признаками ослабления» (1,6). Общим выявленным закономерностям несколько не соответствует временный участок наблюдения за липой мелколистной на ул. Орловской, произрастающей на газоне. И в контрольном, и в опытном вариантах насаждения оценивались как сильно ослабленные (диапазон варьирования ИС 3,0–3,9). Это объясняется в первую очередь большим возрастом опытных растений в посадках, поскольку замена их в последние 7 лет не проводилась, в отличие от центральных проспектов нашей столицы.

Наиболее устойчивой оказалась двухрядная аллея ясеня обыкновенного на пр-те Победителей в столице, где и контрольные и обработанные деревья были отнесены к категории «ослабленных» (1,6–1,8). И хотя действие бактериального препарата «Биотилия» во втором варианте с обработкой незначительно превышало контроль (в среднем в 1,1 раза), следует отметить общую физиологическую устойчивость данной породы к загрязнению урбосреды противогололедными материалами.

Незначительная антропогенная нагрузка на посадки *T. cordata* в районе ул. Академика Купревича (КУ-1, 2) в целом позволяет характеризовать их состояние как «здоровое», и большая активизация процессов текущего прироста опытных растений, подтверждающая положительную роль азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий, является серьезным аргументом необходимости использования препарата «Биотилия».

Наименование пункта наблюдения	Древесная порода	Индекс состояния, балл	
		контроль	обработка
г. Минск			
КУ-1	<i>T. cordata</i>	1,6	1,5
КУ-2	<i>T. cordata</i>	1,6	1,5
КУ-3	<i>A. hippocastanum</i>	2,5	2,0
КУ-4	<i>A. hippocastanum</i>	2,4	2,2
КУ-5	<i>T. cordata</i>	3,5	2,5
КУ-6	<i>T. cordata</i>	3,2	2,5
КУ-7	<i>T. cordata</i>	3,3	2,6
КУ-8	<i>T. cordata</i>	3,9	3,0
КУ-9	<i>F. excelsior</i>	1,8	1,6
КУ-10	<i>F. excelsior</i>	1,7	1,6
КУ-11	<i>A. platanoides</i>	3,5	2,9
г. Могилев			
КУ-12	<i>T. cordata</i>	2,9	2,0
КУ-13	<i>S. aucuparia</i>	4,0	3,7
КУ-14	<i>A. hippocastanum</i>	1,8	1,5
КУ-15	<i>T. cordata</i>	2,5	1,8
КУ-16	<i>T. cordata</i>	3,0	2,6

Таблица 2. Характеристика жизненного состояния опытных растений г. Минск и г. Могилева по итогам двухлетних наблюдений (среднее за 2019–2020 гг.)

Внесение МБП по сравнению с контролем оказывало положительное влияние на жизненное состояние деревьев во всех точках наблюдения, но наибольшей разницы достигало именно на участках, испытывавших высокую степень негативной нагрузки.

Из всех обследованных аллей деревьев в г. Могилеве самой неустойчивой породой оказалась рябина обыкновенная, посадки которой, выполненные в 2016 г., практически не сохранились и требуют замены. Оценить степень влияния препарата также не удалось, поскольку из 5 обработанных растений осталось только одно, в крайне неудовлетворительном состоянии. А вот конский каштан, напротив, оказался наиболее устойчивым, но категория «относительно здоровые» обусловлена также и удаленностью от края дорожного покрытия через тротуар.

При максимальной степени транспортной загрузки пр-та Пушкина (КУ-3), сопоставимой со столичными магистралями, состояние липы мелколистной было значительно лучше, и в варианте с обработкой опытные растения характеризовались как «относительно здоровые». При этом посадки липы в лунках на ул. Первомайской были более отзывчивыми на действие микробного препарата, чем в аналогичных случаях в г. Минске.

Данный факт позволяет высказать предположение, что ответная реакция опытных растений на применение бактериального препарата является не столь выраженной и лабильной, как изменение агрохимических свойств и микробиологической активности городских почв, поскольку метаболизм растений в поисках преодоления проблем, в том числе и с загрязнением, находит свои решения в конкретной экологической ситуации. Поэтому краткосрочные наблюдения за изменениями жизненного состояния городских насаждений, скорее всего, не являлись основой для вынесения заключения по оценке эффективности того или иного препарата или агроприема. Также выводы должны осуществляться по итогам изучения агрохимических и микробиологических свойств субстрата, тем более что и само бактериальное удобрение рассчитано именно на улучшение эдафических условий, а через них уже и на сами растения.

Выполненные исследования показали, что использование микробного удобрения «Биотилия» повышает общую биогенность, стимулирует развитие азотфиксирующей и фосфатмобилизующей микробиоты в верхнем корнеобитаемом слое почвы зеленых насаждений в урбанизированной среде, активизирует на 21–27% микробиоту почв вдоль дорожных магистралей с различной степенью нагрузки, ингибирует на 7–9% поступление остаточных количеств

противогололедных реагентов (хлора, натрия) в ассимилирующие органы растений, снижает степень поврежденности листьев краевым ожогом (хлорозом) (до 18–21%). В этой связи для минимизации негативных последствий применения ПГР, повышения устойчивости придорожных деревьев к таким условиям и улучшения их жизненного состояния организационные и организационно-технические мероприятия, предложенные нами ранее [17], должны быть дополнены агротехническими, связанными с внесением микробного препарата «Биотилия», и предусматривающими обязательное его использование как для молодых насаждений, так и уже сформированных. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Обухов А.И., Лепнева О.М. Экологические последствия применения противогололедных соединений на городских автомагистралях и меры по их устранению // Экологические исследования в Москве и Московской области: мат-лы науч.-практ. конф. – М., 1990.
2. Н.И. Шевякова, В.В. Кузнецов, Л.О. Карпачевский. Причины и механизмы гибели зеленых насаждений при действии техногенных факторов городской среды и создание стресс-устойчивых фитоценозов // Лесной вестник. 2009. №6 (15). С. 25–33.
3. Судник А.В., Ефимова О.Е., Яковлев А.П. Влияние противогололедных реагентов на зеленые насаждения вдоль улиц и дорог г. Минска // Леса Евразии – Белорусское Поозерье: мат-лы XII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 145-летию Г.Ф. Морозова. 30 сентября – 6 октября 2012 г. – М., 2012.
4. Яковлев А.П., Судник А.В. Влияние солевых реагентов на экологическое состояние почвы и растений в городской среде // Состояние и перспективы развития зеленого строительства в Республике Беларусь: тез. респ. науч.-практ. семинара (г. Минск, 26–27 апреля 2018 г.). ЦБС НАН Беларуси / под ред. В.В. Титка. – Минск, 2018.
5. О.В. Наместникова, М.В. Бузаева. Мониторинг засоления почв в системе обеспечения экологической безопасности крупного города // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2019. №1(30). С. 44–52.
6. Сельскохозяйственная биотехнология / Шевелуха В.С. [и др.]; под общ. ред. В.С. Шевелухи. – М., 1998.
7. Структура и функции бактериальных сообществ в агроценозе / Т.Н. Добровольская [и др.] // Почвоведение. 2016. №1. С. 79–83.
8. Талалайко Н.М. Микробиологическая индикация урбаноэмов города Воронежа: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.06. – Воронеж, 2005.
9. Емцев В.Т. Микробиология: учебник для бакалавров. – М., 2016.
10. Long H.H., Schmidt D.D., Baldwin T. Native bacterial endophytes promote host growth in a species-specific manner; phytohormone manipulations do not result in common growth responses / PLoS ONE. 2008. 3(7). P. e2702. // <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002702>
11. Штамм галотолерантных бактерий *Bacillus aryabhattai* для стимуляции роста растений в условиях засоления: пат. BY23256 / З.М. Алещенкова, И.Н. Ананьева, Н.И. Наумович, Г.В. Сафронова, К.И. Евенкова-Чернецова. Оpubл. 30.12.2020.
12. Удобрение микробное «Биотилия». Технические условия. ТУ ВУ100289066.163–2020.
13. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М., 1970.
14. Дорофеева Т.Б., Парфенова Л.Н., Семакова Т.А. Методики обследования состояния городских зеленых насаждений. – СПб., 2002.
15. Anderson J., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. P. 215–221.
16. Гавриленко В.Ф., Ладыгина М.Е., Хандобина Л.М. Большой практикум по физиологии растений. Фотосинтез. Дыхание: учебное пособие. – М., 1975.
17. Создание антропогенно устойчивых насаждений вдоль улиц и дорог в населенных пунктах (методические рекомендации) / А.П. Яковлев [и др.]. – Минск, 2013.