

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4;574;504

МЕТОД ТРИАД ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕМЕДИАЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ ГУМИНОВЫХ ПРЕПАРАТОВ НА УРБАНОЗЕМЫ*

© 2015 г. М. А. Пукальчик¹, В. А. Терехова^{1,2}, О. С. Якименко¹,
К. А. Кыдралиева³, М. И. Акулова¹

¹Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1-12
e-mail: pukalchik.maria@gmail.com, vtterekhova@gmail.com

²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, 119071, Москва, Ленинский пр., 33

³Институт прикладной биохимии и машиностроения (ОАО “Биохиммаш”), 127299, Москва, ул. Клары Цеткин, 4
Поступила в редакцию 23.12.2013 г.

Для характеристики ремедиационного эффекта гуминовых препаратов (лигногумата и наномангнетитогумата) использовали данные о содержании загрязняющих веществ, экотоксичности и структурно-функциональных особенностях сообществ почвенных микроорганизмов в образцах урбанизированных г. Киров. Методом триад рассчитан интегральный индекс состояния почв на загрязненных и фоновых участках. С его помощью на основе изменений химических, токсикологических и биоиндикационных показателей установлено, что гуминовые препараты способны снижать экотоксичность и изменять экофизиологические показатели биоты городских почв. Наиболее выраженное действие гуминовых препаратов выявлено при внесении 0.0025 и 0.01 мас. %. Очевидно, основным фактором, определяющим ремедиационный эффект наномангнетитогумата и лигногумата, является их биологическая активность, а не способность связывать токсиканты.

Ключевые слова: гуминовые вещества, лигногумат, нанокмппозиты, биотестирование, биоиндикация, интегральный индекс состояния.

DOI: 10.7868/S0032180X15060088

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный покров городских территорий испытывает высокую антропогенную нагрузку. Городские почвы отличаются от фоновых по физическим, химическим и биологическим свойствам [4, 13, 16]. Отмечается, что основополагающую роль в снижении способности городских почв выполнять экологические функции играют повышенные концентрации загрязняющих веществ и потеря биоорганического потенциала, то есть суммы живого и гумусированного органического вещества почв [9, 11, 17, 20, 24]. Гуминовые вещества играют одну из важнейших ролей в улучшении физико-химических свойств почв, активизации микрофлоры, миграции питательных веществ и, в конечном итоге, восстановлении почвенного и растительного покрова [10, 12].

Внесение промышленных аналогов природных гуминовых веществ (гуминовых препаратов) в городские почвы при определенных условиях

способно положительно воздействовать на экологическое состояние почв [3, 15, 32]. Повышенный интерес к гуминовым препаратам способствует совершенствованию традиционных технологий их производства, расширению сырьевой базы, в которую вовлекаются все новые виды углей, торфов, сланцев, пеллоидов, а также внедрению инноваций в этой отрасли. В частности, известны препараты, созданные на основе ускоренной гумификации лигнинсодержащего сырья — лигногумата [1, 27], а также путем увеличения количества реакционных центров за счет включения в гуминовую матрицу наноразмерных частиц металлов или их оксидов [5, 21, 28, 29]. Актуальность и целесообразность применения гуматов обуславливают необходимость проведения биотического контроля почв и проверки ремедиационной активности и экобезопасности гуминовых препаратов [33].

Очевидно, что ремедиационную активность гуминовых препаратов надо оценивать в соответствии с биотической концепцией, рассматривая совокупность данных химических и биологических анализов почв до и после обработки их гуматами. Основными проблемами в реализации био-

* Исследования поддержаны грантами РФФИ (12-04-01230-а; 14-04-31293 мол_а) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Живая природа: современное состояние и проблемы развития”.

тической концепции при оценке гуминовых препаратов, как и во многих других случаях, являются выбор способа свертывания информации в единый индекс и интерпретация количественных значений индекса в качественный критерий состояния почвы. В отношении оценки ремедиационной активности гуматов имеется опыт применения в качестве интегрального показателя коэффициента детоксикации [6, 7]. Однако наиболее объективной и разносторонней представляется методология междисциплинарного уровня — метода триад, который предполагает интеграцию триады экологических данных: химических, биологических и токсикологических показателей [26, 31].

Задача работы заключалась в оценке ремедиационного эффекта двух гуминовых препаратов (лигногумата и наномagnetитогумата) по отношению к образцам урбаноземов на основе метода триад.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в условиях вегетационного эксперимента с использованием урбаноземов, отобранных на двух участках территории г. Киров: на условно чистой фоновой и с пробной площадки в промышленном районе, где по результатам комплексных исследований 2010–2011 гг. отмечено повышенное содержание ряда тяжелых металлов, а почвы проявляли как фито-, так и экотоксичные свойства [14]. Для опытов использовали смешанный образец урбанозема из поверхностных горизонтов (0–20 см), отобранный с пробной площадки площадью 10 м², расположенной на расстоянии 5 м от оживленной автодорожки. Валовое содержание ионов тяжелых металлов в почве (мг/кг): Cd — 4.61; Ni — 97.23, Pb — 249.11; Cr — 296.21. Исходные почвы характеризовались среднесуглинистым гранулометрическим составом. Почву при естественной влажности освобождали от посторонних включений и просеивали через сито с ячейками 2–4 мм.

Материалом для исследования служили гуминовые препараты, изготовленные с применением современных технологий синтеза:

Гуминовый препарат 1 (ГП 1) — “лигногумат К” (НПО “РЭТ”, Россия) получен в ходе искусственной гумификации лигносульфоната. Он содержит небольшое количество (мас. %) N — 0.37; S ~ 4.0; C — 35.0; K — 3.0; P — 0.1. Для его состава характерно преобладание фульвокислот и веществ кислоторастворимых фракций над гуминовыми кислотами: 90 и 10% соответственно.

Гуминовый препарат 2 (ГП 2) — “наномagnetитогумат” (ОАО “Биохиммаш”, Россия) получен в ходе механохимического синтеза из гуминовых кислот окисленных бурых углей и высокоактивных наночастиц магнетита. Содержание гумино-

вых кислот, связанных с магнетитом, не более 10 мас. % от общего количества [23]. В элементном составе этого препарата N — 2.8; C — 33.8; H — 2.6; Fe — 15.3; K — 14.0 мас. %. Повышенное содержание азота связано с содержанием остаточного количества NH₄Cl, использованного в процессе синтеза магнетита. Высокое содержание калия в этом препарате обусловлено использованием в процессе синтеза гуматов калия (содержание калия в исходном гуминовом препарате — 23%).

Содержание тяжелых металлов (Pb, Cd, Ni, Cr) в обоих ГП составляет следовые количества.

Гуминовые препараты вносили в сухом виде в образцы почв в трех концентрациях 0.0025, 0.01 и 1 мас. % (эквивалентны 0.025, 0.1 и 10 г/кг). Смеси тщательно перемешивали и помещали в вегетационные сосуды (пластиковые емкости, рассчитанные на 500 г воздушно-сухой почвы). Повторность каждого варианта — трехкратная. Контрольным почвенным образцом (далее — контроль) служил образец урбанозема, не обработанный гуминовыми препаратами. В качестве природных референсных образцов использовали фоновые почвы (далее — фон), которые отобрали с пробной площадки, заложенной в юго-западной части города на территории лесопарковой зоны, где, согласно проведенным исследованиям [14], почвы находятся в наиболее благополучном состоянии.

Непосредственно после заполнения опытными образцами в каждый сосуд высевали по 2 г смеси газонных трав “Универсал” (Россия), в составе которой присутствовали следующие виды: овсяница луговая (*Festuca pratensis*) — 30%, овсяница красная (*F. rubra*) — 35%, райграс многолетний (*Lolium perenne*) — 15%, овсяно-райграсный гибрид — 20%. Полив соответствовал среднемесячной норме выпадения осадков для июня–июля в г. Киров. Освещение создавали искусственно с режимом 12 ч света/12 ч темноты.

Длительность эксперимента составила 56 суток с момента посадки растений. По завершению эксперимента произвели укос трав. Токсичность почв и влияние гуминовых препаратов оценивали по продуктивности биомассы растений. Образцы почв, освобожденные от корней, исследовали по ряду химических, токсикологических и биоиндикационных показателей.

Химические исследования включали определение pH водной вытяжки потенциометрическим методом, содержание подвижных форм металлов определяли после экстракции ацетатно-аммонийным буфером (pH 4.8) методом атомно-абсорбционной спектроскопии согласно стандартным методикам. Основные агрохимические показатели (NPK и C орг) оценивали общепринятыми в почвоведении методами.

Токсикологические исследования проводили с применением трех тест-систем по реакциям

организмов разной таксономической и трофической принадлежности (водорослей *Scenedesmus quadricauda*, ракообразных *Daphnia magna* и генномодифицированных бактерий *Escherichia coli*) согласно процедурам, прописанным в стандартных методиках (ФР.1.39.2007.03223 аналогично ISO 8692-1; ФР.1.39.2007.0322, ISO 7346-1); (ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.11-04; ПНД Ф Т 16.1:2.3:3.8-04, аналогично ISO-11348-2) .

Биоиндикационные исследования включали определение следующих показателей:

- интенсивности почвенного дыхания по величине субстрат индуцированного дыхания обогащенной глюкозой почв и интенсивности микробного дыхания без добавления глюкозы. Из полученных данных рассчитывали значение микробной биомассы и микробный метаболический коэффициент, согласно [24, 25];

- структуры почвенных микромицетов методом посева почвенной суспензии на агаризованную среду Чапека; синэкологический анализ проводили по общей численности колониеобразующих единиц, доле устойчивых к неблагоприятным факторам темнопигментированных видов грибов;

- активности фермента уреазы колориметрическим методом, основанным на измерении количества аммиака, образующегося при гидролизе мочевины, с реактивом Несслера;

- активности фермента каталазы газометрическим методом, основанным на изменении скорости распада перекиси водорода по объему выделившегося кислорода;

- прирост надземной части газонных трав после укуса растений на 56-е сутки эксперимента. Растения высушивали при температуре 105°C и определяли биомассу весовым методом.

При расчетах значения каждого из указанных показателей в фоне принимали за 100% и по отношению к нему выражали в процентах значения в других вариантах опыта (в обработанной почве и необработанном гуминовыми препаратами урбаноземе). Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программ MS Excel 2003 и Statistica 6.0.

Для количественной оценки действия гуминовых препаратов как ремедиантов загрязненных почв использовали метод триад, позволяющий выявить изменение токсичности, состояние почвенной биоты и содержание загрязняющих веществ в почвах, обработанных ГП по сравнению с контролем и фоном в относительной безразмерной шкале значений (от 0 до 1) [26]. В комплексности такого интегрального показателя заключаются явные преимущества триадного подхода при оценке действия гуминовых препаратов по сравнению, например, с расчетом констант связывания или коэффициентов детоксикации [7]. Получаемые методом триад значения

индексов состояния почв содержат сведения о влиянии гуминовых препаратов на разные уровни биологической организации – от организма до уровня популяции и сообщества. Расчет индексов состояния (ИСх, ИСт и ИСб) проходит в три этапа: сравнение полученных значений с данными для фоновых проб по каждому показателю; выбор функции перевода в зависимости от степени отклонения от фоновых величин для каждого показателя; нахождение суммарных показателей ИСх, ИСт и ИСб [26, 31].

Расчет индекса состояния почв по химическим показателям. Результаты, полученные для испытуемых образцов, сравнивали с фоновыми значениями. Для перехода к шкале, нормированной от 0 до 1, применяли функции вида (1)

$$ИСх_i = \begin{cases} \frac{C_i}{C_{фон_i}} \times 0.50, & \text{если } C_i \leq C_{фон_i} \\ 0.50 + \left(\frac{C_i - C_{фон_i}}{10C_{фон_i} - C_{фон_i}} \right) \times 0.50, & \text{если } C_{фон_i} < C_i \leq 10C_{фон_i} \\ 1, & \text{если } 10C_{фон_i} < C_i \end{cases} \quad (1)$$

где ИСх_i – преобразованное значение, индекс состояния почв по концентрации *i*-го химического показателя; *C_i* – концентрация *i*-го химического показателя в пробе; *C_{фон_i}* – концентрация *i*-го химического показателя в фоне.

Полученные данные по всем исследованным компонентам проб обобщали как среднее арифметическое ИСх_i:

$$ИСх = \frac{\sum_{i=1}^n ИСх_i}{n}, \quad (2)$$

где ИСх – индекс состояния почв по химическим данным; *n* – количество исследованных показателей.

Расчет индекса состояния почв по токсикологическим показателям. Значения тест-функций *i*-й тест-системы (биотеста) сравнивали со значениями, полученными для фонового образца по уравнению (3):

$$П_i = \frac{|T_i - T_{фон_i}|}{T_{фон_i}}, \quad (3)$$

где *П_i* – степень отклонения значения тест-функции *i*-го биотеста в пробе от фона; *T_i* – значение тест-функции *i*-го биотеста в пробе, *T_{фон_i}* – значение тест-функции в фоновом образце.

Таблица 1. Влияние гуминовых препаратов на содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве

Концентрация ГП, мас. %	Pb	Cd	Ni	Cr
	мг/кг			
0	3.67 ± 1.28 _a	0.32 ± 0.08 _a	0.63 ± 0.11 _a	4.30 ± 0.21 _a
0	11.69 ± 2.81 _b	0.58 ± 0.10 _b	1.00 ± 0.22 _b	5.32 ± 0.58 _b
0.0025	8.42 ± 2.02 _c	0.54 ± 0.12 _b	0.79 ± 0.17 _{ab}	5.35 ± 0.59 _b
0.01	5.54 ± 1.31 _{ac}	0.45 ± 0.09 _{ab}	0.80 ± 0.17 _{ab}	5.34 ± 0.58 _b
1	4.78 ± 1.14 _a	0.46 ± 0.09 _{ab}	0.94 ± 0.21 _b	5.40 ± 0.60 _b
0.0025	10.32 ± 2.47 _{bc}	0.43 ± 0.09 _{ab}	0.75 ± 0.10 _{ab}	5.29 ± 0.57 _b
0.01	5.01 ± 1.20 _a	0.43 ± 0.08 _{ab}	0.82 ± 0.18 _{ab}	5.26 ± 0.56 _b
1	4.45 ± 1.07 _a	0.44 ± 0.08 _{ab}	0.97 ± 0.21 _b	5.40 ± 0.60 _b

Примечание. Здесь и далее величины с разными буквами отличаются достоверно (LSD test, $P < 0.05$) для каждого показателя.

Для перехода к шкале, которая нормирована от 0 до 1, применяли функции вида (4):

$$ИСт_i = \begin{cases} 0, & \text{если } П_i \leq 0.20 \\ \frac{П_i - 0.20}{0.80 - 0.20}, & \text{если } 0.20 < П_i \leq 0.80. \\ 1, & \text{если } П_i > 0.80 \end{cases} \quad (4)$$

Подобным образом с использованием формул (3) и функций (4) проводили оценку биоиндикационных показателей. Индекс состояния по токсикологическим и биоиндикационным параметрам (ИСт и ИСб) рассчитывали путем нахождения среднего арифметического из ИСт_i и ИСб_i соответственно (аналогично формуле (2)).

При расчете интегрального индекса состояния по триаде показателей: химическим, токсикологическим и биоиндикационным (ИСх, ИСт и ИСб соответственно) — воспользовались “весовыми коэффициентами”, равными 1.5 и 2.0:

$$ИС = \frac{ИСх + 1.5ИСт + 2.0ИСб}{1.0 + 1.5 + 2.0}. \quad (5)$$

Предложение Дагнино и соавт. [26] о присвоении “весовых коэффициентов” в данном случае оправдано, поскольку именно биотические (токсикологические и биоиндикационные) показатели являются наиболее информативными с точки зрения поддержания устойчивого состояния экосистем и выполнения почвами экологических функций, в частности, такой как среда обитания для живых организмов [30].

Таким образом, интегральный индекс состояния почв, рассчитанный по методу триад, отражает изменение содержания загрязняющих веществ, интегральной токсичности и биоиндикационных параметров почв в присутствии ГП по сравнению с показателями тех же образцов без их добавления.

Уменьшение значения ИС свидетельствует об улучшении экологического состояния почв при внесении ГП, увеличение — об ухудшении. При этом наиболее благоприятным для функционирования биоты будет значение, близкое к 0 (фоновое состояние почвы).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние гуминовых препаратов на содержание тяжелых металлов и агрохимические показатели почв. Известно, что гуминовые препараты обладают протекторным действием по отношению к широкому перечню загрязняющих веществ. Характер проявления протекторных свойств по отношению к определенным загрязняющим веществам зависит от многих факторов, прежде всего, от дозы внесения и состава гуминовых препаратов. Результаты эксперимента показали, что внесение 0.01 и 1% лигногумата и наномангнетитогумата оказало влияние на концентрации подвижных форм ионов свинца и кадмия, но не повлияло на содержание подвижных форм никеля и хрома в урбаноземе (табл. 1).

Влияние гуминовых препаратов на токсикологические показатели почв. Способность почв обеспечивать рост растений является хорошим индикатором качества почв. В условиях вегетационного эксперимента оценили прирост биомассы наземной части газонных трав. В контрольном образце (урбанозем, не обработанный ГП) он характеризовался меньшими значениями, чем в фоновых почвах (прирост уменьшался на 28%). Внесение гуминовых препаратов оказало неоднозначное влияние на ростовые характеристики смеси газонных трав в условиях вегетационного эксперимента (рис. 1).

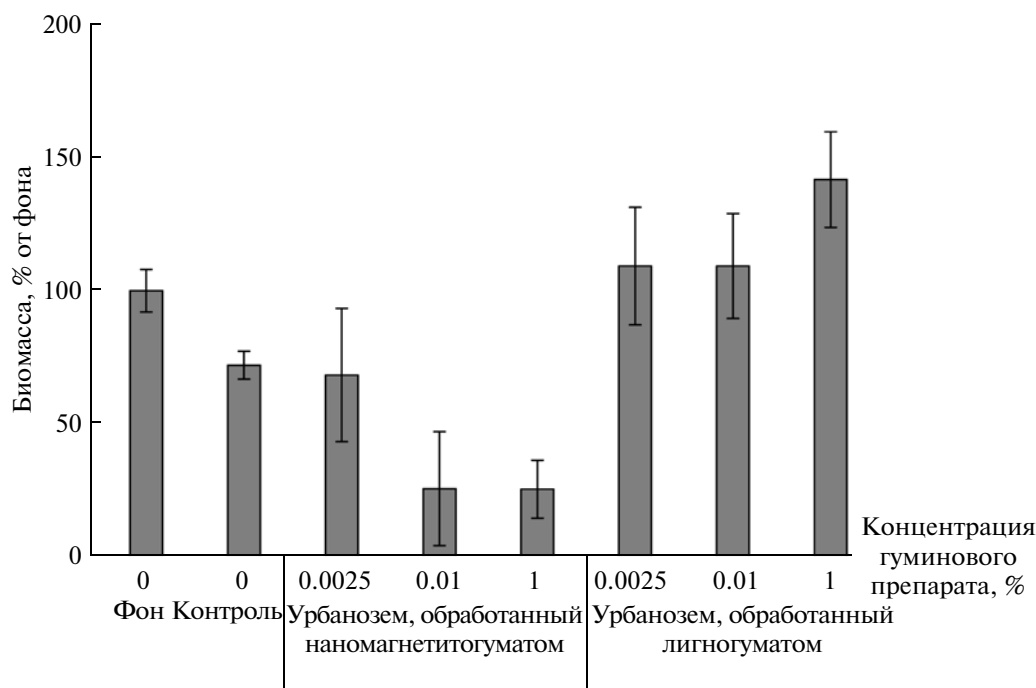


Рис. 1. Влияние гуминовых препаратов на биомассу растений.

В варианте с внесением лигногумата отмечались самые высокие показатели прироста биомассы надземной части растений. Выявлена тенденция снижения роста растений в урбаноземах, обработанных наногуматом. Рост растений заметно замедлялся при увеличении концентрации наногумата в почве. В вариантах с внесением 0.01 и 1% наногумата значения сухой биомассы уменьшились более чем на 50% относительно контрольных и фоновых почв. Наблюдались морфологические изменения листовых пластин, некроз листьев.

В исследовании действия гуминовых препаратов на токсикологические характеристики почв помимо газонных трав использовали стандартные лабораторные биотесты. Для биотестов использовали три вида разных трофических уровней: *S. quadricauda*, *D. magna*, *E. coli*. Контрольный образец (урбанозем, не обработанный ГП) был токсичным для всех трех тест-систем, ингибирование тест-функций биотестов достигало 48–70% по сравнению с фоновым образцом. Обработка гуминовыми препаратами оказала значительное влияние на проявление почвами экотоксичных свойств (рис. 2).

При внесении ГП токсический эффект почв полностью снимался. Форма отклика биотестов практически не зависела от концентрации ГП и видовой принадлежности биотеста. Полученные результаты для биотестов теоретически можно обобщить и на более широкий круг биологических объектов. Можно допустить, что внесение ГП ока-

жет стимулирующее воздействие на сообщества почвенных беспозвоночных, почвенных водорослей и микромицетов.

Влияние гуминовых препаратов на почвенную биоту. Известно, что гуминовые препараты способны оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее действие на почвенную биоту. В вегетационном эксперименте оценивали интегральные показатели функционирования почвенной биоты (величину эмиссии CO_2 , активности ферментов каталазы и уреазы) и индивидуальные показатели (структурные параметры сообщества микромицетов). Внесение малых доз гуминовых препаратов (0.025 и 0.01%) оказало стимулирующее действие на развитие микробной биомассы, ингибировало показатели микробного дыхания, и как следствие, наблюдалось уменьшение микробного метаболического коэффициента (табл. 2). Снижение микробного метаболического коэффициента может свидетельствовать об улучшении качества почв как среды обитания почвенных микроорганизмов [23, 25].

Гуминовые препараты в высокой концентрации (1%) не оказали заметного влияния на интенсивность почвенного дыхания и экофизиологические параметры почвенной биоты. Можно предположить, что их эффект в малых дозах (0.0025 и 0.01%) обусловлен собственной физиологической активностью, а не влиянием дополнительного количества С орг как источника питания микроорганизмов.

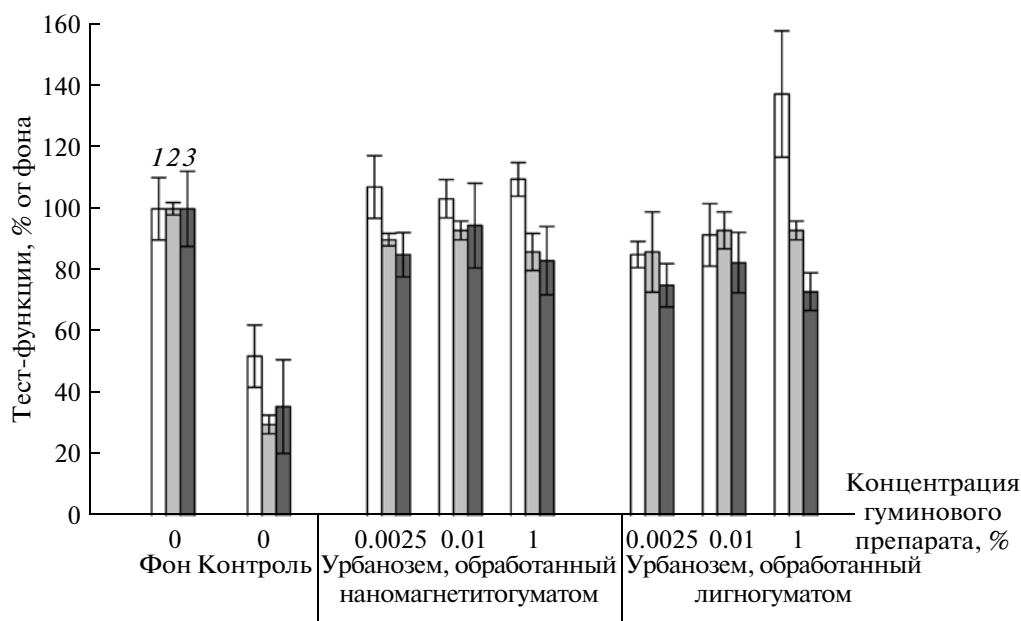


Рис. 2. Влияние гуминовых препаратов на “отклики” биотест-систем по результатам вегетационного эксперимента: 1 – прирост клеток *S. quadricauda*, 2 – выживаемость особей *D. magna*, 3 – биолюминесценция *E. coli*.

Активность ферментов. Влияние гуминовых препаратов проявилось в изменении биохимических показателей почв, в частности, на активности ферментов уреазы и каталазы (рис. 3). Наибольшее влияние на уреазную активность оказывало внесение наномангнетитогумата в концентрациях 0.0025 и 0.01%. В этих вариантах уреазная активность стабильно превышает таковую в контроле. Биостимуляция активности уреазы может быть обусловлена избыточным содержанием общего азота после обработки почв наномангнетитогуматом.

Выявлена тенденция снижения активности каталазы в почве при внесении наномангнетитогумата по сравнению с фоновыми и контрольными образцами урбаноземов. Присутствие в препарате высокоактивных наночастиц магнетита в макролигандах гуминовых кислот могло способствовать образованию разнолигандных координационных узлов с участием как гуминовых кислот, так и фермента каталазы (в активный центр которого входит трехвалентное железо). Образующиеся при этом фермент-ингибиторные комплексы могут характеризоваться более высокой устойчивостью и подавлять активность ферментов [8].

Таблица 2. Влияние гуминовых препаратов на интенсивность субстрат-индуцированного дыхания (СИД, мкмоль $\text{CO}_2/\text{г}$ в час), микробного дыхания (МД, мкмоль $\text{CO}_2\text{—C}/\text{г}$ в сут), содержание углерода микробной биомассы (С мик, мкг С/г почвы) и микробный метаболический коэффициент ($q\text{CO}_2$, мкг $\text{CO}_2\text{—C}/\text{мг С мик}/\text{ч}$)

Концентрация ГП, мас. %	Величина эмиссии CO_2 из почвенных образцов		Экофизиологические параметры	
	СИД	МД	С мик	$q\text{CO}_2$
Фон				
0	$0.054 \pm 0.005a$	$0.058 \pm 0.005a$	$44.89 \pm 1.33ac$	$5.24 \pm 0.63a$
Урбанозем (контроль)				
0	$0.047 \pm 0.001b$	$0.076 \pm 0.005b$	$42.33 \pm 1.09a$	$7.05 \pm 0.54ab$
Урбанозем, обработанный наномангнетитогуматом				
0.0025	$0.051 \pm 0.002a$	$0.060 \pm 0.004ad$	$45.89 \pm 1.73a$	$5.09 \pm 0.70ac$
0.01	$0.050 \pm 0.008a$	$0.063 \pm 0.008adc$	$44.91 \pm 7.81a$	$5.45 \pm 1.34a$
1	$0.050 \pm 0.002a$	$0.060 \pm 0.006a$	$45.13 \pm 2.33a$	$5.21 \pm 1.88ac$
Урбанозем, обработанный лигнотгуматом				
0.0025	$0.063 \pm 0.003c$	$0.069 \pm 0.001c$	$57.17 \pm 1.56b$	$4.67 \pm 0.24ac$
0.01	$0.054 \pm 0.003a$	$0.073 \pm 0.001bc$	$48.66 \pm 3.31c$	$5.81 \pm 0.62a$
1	$0.046 \pm 0.001b$	$0.070 \pm 0.002bc$	$42.07 \pm 2.67a$	$5.21 \pm 1.43ac$

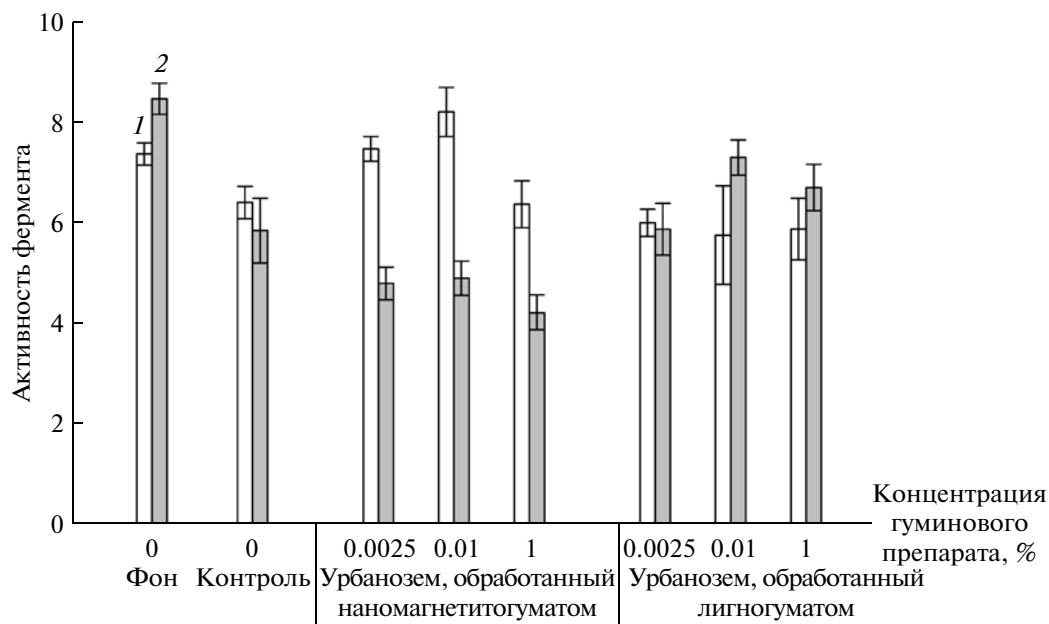


Рис. 3. Влияние гуминовых препаратов на активность уреазы (1, мг NH₃/10 г почвы) и каталазы (2, мл O₂/мин/г почвы) в образцах урбаноземов.

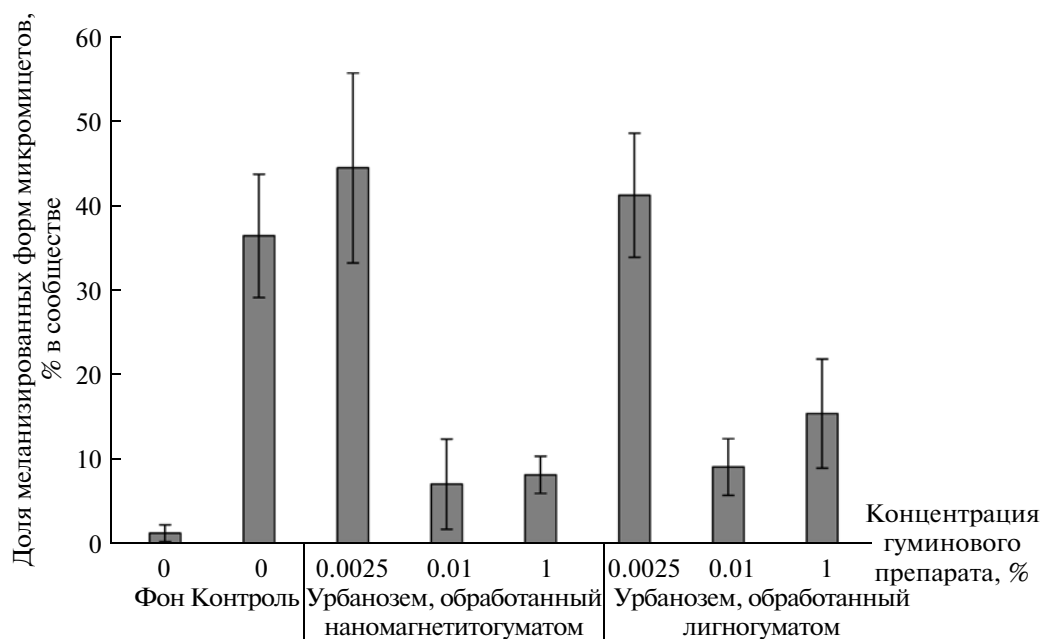


Рис. 4. Влияние гуминовых препаратов на долю темноокрашенных микромицетов в сообществе.

Внесение лигногумата не оказало значимого воздействия на показатель активности уреазы, однако способствовало росту активности каталазы в урбаноземе, причем наиболее эффективно при концентрации 0.01%.

Интересный, на наш взгляд, результат применения гуминовых препаратов заключался в перестройке сообщества почвенных микромицетов, а

именно в сокращении доли темноокрашенных микромицетов в сообществе в вариантах с внесением 0.01 и 1% гуминовых препаратов (рис. 4).

Оценка ремедиационного действия гуминовых препаратов с применением метода триад. Результаты вегетационного эксперимента свидетельствуют, что внесение гуминовых препаратов оказывает влия-

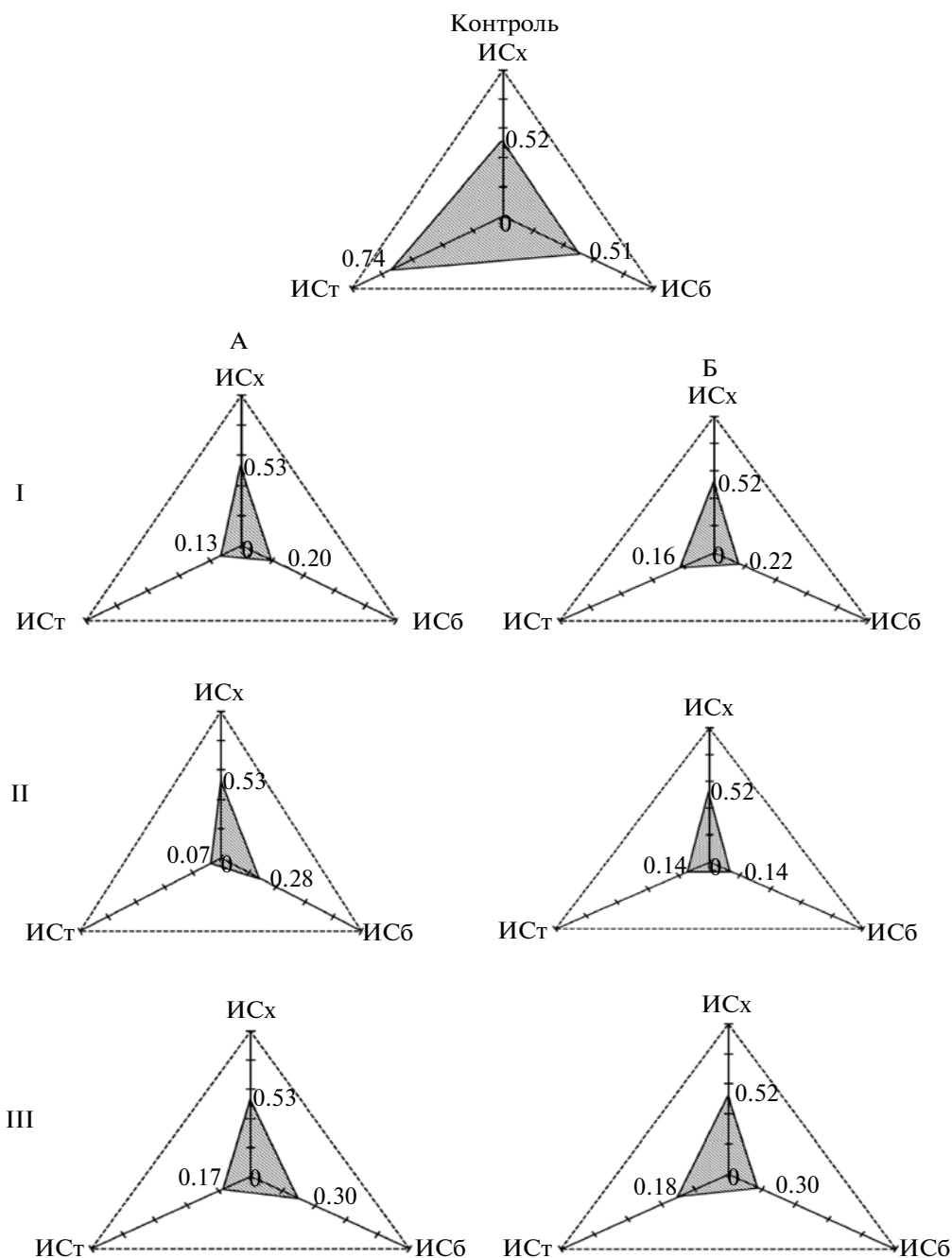


Рис. 5. Графическое отображение результатов оценки экологического состояния урбаноземов после обработки гуминовыми препаратами с применением метода триад (значения по осям ИСх, ИСб, ИСт соответствуют индексам состояния почв, рассчитанным по химическим, биоиндикационным и токсикологическим данным; 0 – фоновое состояние; площадь темного треугольника отражает степень нарушенности почв; доза внесения гуминовых препаратов, %: I – 0.0025, II – 0.01; III – 1.0). А – урбанозем, обработанный наномагнетитогуматом; Б – урбанозем, обработанный лигногуматом.

ние на подвижность некоторых тяжелых металлов, содержание элементов питания растений, проявление фито- и экотоксичных свойств, структурные и физиологические показатели функционирования почвенного биоценоза. В целях интеграции данных о влиянии гуминовых препаратов на урба-

ноземы с помощью метода триад рассчитали индексы состояния почв после обработки гуминовыми препаратами по химическим, биоиндикационным и токсикологическим показателям (ИСх, ИСб, ИСт), а также интегральный индекс состояния почв.

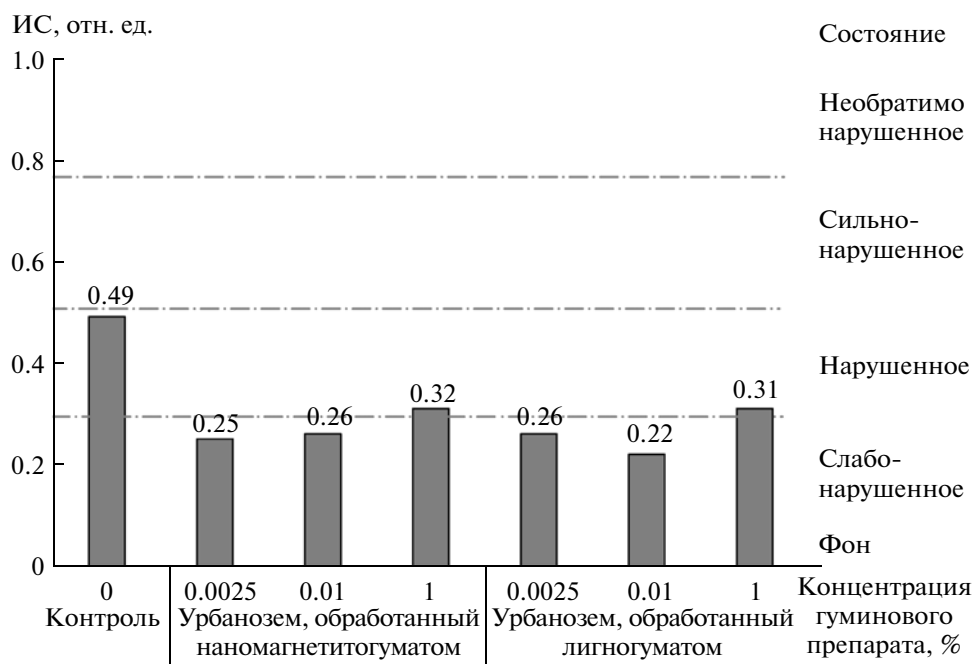


Рис. 6. Интегральный индекс, рассчитанный методом триад, и состояние урбаноземов после обработки гуминовыми препаратами.

Характеристику состояния почв описывали согласно отечественному опыту ранжирования значений показателей качества по пяти категориям (I–V) [2, 20] качества почв, выделив следующие диапазоны значений интегрального индекса состояний:

ИС = 0 – фоновое; $0 \leq \text{ИС} \leq 0.30$ – слабонарушенное; $0.30 < \text{ИС} \leq 0.50$ – нарушенное; $0.50 < \text{ИС} \leq 0.79$ – сильнонарушенное; $0.79 < \text{ИС} \leq 1$ – необратимо нарушенное. Результаты расчетов на основе полученных экспериментальных данных приведены на рис. 5 и 6.

Обобщая полученные данные по влиянию гуминовых препаратов на состояние почвенной биоты, рост растений и реакции биотестов, можно отметить, что положительное действие наиболее выражено при концентрациях ГП 0.0025 и 0.01%. При внесении этих концентраций показатели ИСб и ИСт заметно уменьшились относительно контроля и приблизились к фоновым значениям. Поскольку ГП не оказали значимого влияния на содержание подвижных форм ТМ (свинца, хрома, кадмия, никеля), то это может свидетельствовать о том, что основным фактором, определяющим ремедиационный эффект наномагнетитогумата и лигногумата, является собственная биологическая активность, а не их способность связывать токсиканты. Сходные факты описаны ранее и в других исследованиях. Чуков с соавт. [18, 19] показали снижение токсичности ионов меди и никеля для кукурузы и хлореллы при внесении гуминовых кислот, причем

суммарная сорбционная емкость внесенных ГК была в 5–6 раз меньше концентрации катионов, что привело к заключению, что биопротекторный механизм ГК скорее связан с прямой физиологической стимуляцией адаптационных процессов, чем с непосредственным поглощением ионов тяжелых металлов.

Таким образом, соотнося полученные методом триад интегральные результаты оценки химических, биологических и токсикологических свойств почвенных образцов со шкалой оценки качества почв [2, 22], можно говорить о том, что экологическое состояние почв после обработки образцов невысокими концентрациями гуминовых препаратов изменилось: почвы из категории “нарушенных” перешли в категорию “слабонарушенных”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брыкалов А.В., Гладков О.А., Романенка Е.С., Иванова Р.Г. Лигногумат: миф и реальность. Ставрополь: СтГАУ, 2005. 108 с.
2. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
3. Гапоненко В.В. Роль гуминовых веществ в восстановлении антропогенно измененных почв на территории мегаполиса. Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 2004, 24 с.
4. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экологические функции почвы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 137 с.

5. Захарова Н.Г., Юрищева А.А., Джардималиева Г.И., Помогайло С.И., Горбунова Н.В., Голубева Н.Д., Помогайло А.Д., Кыдралиева К.А. Синтез и свойства магнитных наночастиц, стабилизированных в полимерных матрицах // Технологии живых систем. 2012. Т. 9. № 7. С. 48–54.
6. Каниськин М.А., Изосимов А.А., Терехова В.А., Якименко О.С., Пукальчик М.А. Влияние гуминовых препаратов на биоактивность почвогрунта с фосфогипсом // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 1. С. 87–95.
7. Куликова Н.А. Защитное действие гуминовых веществ по отношению к растениям в водной и почвенной средах в условиях абиотических стрессов. Автореф. дис. ... докт. биол. н. М., 2008. 48 с.
8. Кыдралиева К.А. Эффекты комплексобразования ионов металлов в процессах ингибирования активности некоторых протеолитических ферментов гуминовыми кислотами. Автореф. дис. ... канд. хим. н. Бишкек, 1992. 24 с.
9. Овчинникова М.Ф. Признаки деградации гумуса дерново-подзолистых почв при действии разных факторов // Агроэкологические проблемы состояния почв Нечерноземной зоны и пути их решения. М., 2009. С. 25–34.
10. Орлов Д.С. Свойства и функции гуминовых веществ // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 16–27.
11. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
12. Перминова И.В., Жилин Д.М. Гуминовые вещества в контексте зеленой химии // Зеленая химия в России / Под ред. В.В. Лунина, П. Тундо, Е.С. Локтевой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. С. 146–162.
13. Почва, город, экология / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд “За экологическую грамотность”, 1997. 320 с.
14. Пукальчик М.А., Терехова В.А. Экотоксикологическая оценка городских почв и детоксицирующего эффекта нанокмпозиционного препарата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2012. № 4. С. 26–31.
15. Степанов А.А., Косьяненко Г.Н. Применение природных гуматов для ремедиации загрязненных городских почв в целях стимулирования роста растений // Почвенно-земельные ресурсы: оценка, устойчивое использование, геоинформационное обеспечение. Минск: Изд. центр БГУ, 2012. 366 с.
16. Строганова М.Н., Прокофьева Т.В., Прохоров А.Н., Лысак Л.В., Сизов А.П., Яковлев А.С. Экологическое состояние городских почв и стоимостная оценка земель // Почвоведение. 2003. № 7. С. 867–875.
17. Управление качеством городских почв / Под ред. С.А. Шобы, А.С. Яковлева. М.: МАКС Пресс, 2010. 96 с.
18. Чуков С.Н. Структурно-функциональные параметры органического вещества почв в условиях антропогенного воздействия. СПб: СПбГУ, 2001. 216 с.
19. Чуков С.Н., Талашкина В.Д., Надпорожская М.А. Физиологическая активность ростовых стимуляторов и гуминовых кислот почв // Почвоведение. 1995. № 2. С. 169–174.
20. Экологические функции городских почв / Под ред. А.С. Курбатова, В.Н. Башкин. Смоленск, 2004. 232 с.
21. Юрищева А.А., Фетисов Г.П., Джардималиева Г.И., Помогайло С.И., Голубева Н.Д., Кыдралиева К.А., Помогайло А.Д. Технология получения магнитоактивных композиционных материалов механохимическим синтезом для экологических целей // Технология металлов. 2011. № 8. С. 27–30.
22. Яковлев А.С., Макаров О.А. Экологическая оценка, экологическое нормирование и рекультивация земель: основные термины и определения // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2006. № 3(87). С. 64–70.
23. Anan'eva N.D., Blagodatskaya E.V., Demkina T.S. Estimating the resistance of soil microbial complexes to natural and anthropogenic impacts // Eurasian Soil Science. 2002. V. 35. № 5. С. 514–521.
24. Anderson J.P.E. Soil respiration // Methods of soil analyses / Eds: A.L. Page, R.H. Millar, D.H. Keeney. Madison, Wisc. 1982. P. 831–871.
25. Anderson T.-H., Domsh K.H. The metabolic quotient for CO₂ (q_{CO_2}) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition on the microbial biomass of forest soil // Soil Biol. Biochem. 1993. № 25. P. 393–395.
26. Dagnino A., Sforzini S., Dondero F., Fenoglio S., Bona E., Jensen J., Viarengo A. A “Weight-of-Evidence” approach for the integration of environmental “Triad” data to assess ecological risk and biological vulnerability // Integr. Environ. Assess. Manag. 2008. № 4. P. 314–326.
27. Koivula N. Temporal perspective of humification of organic matter, 2004. 62 p. URL: <https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13148/9513917703.pdf?sequence=1&jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13148/9513917703.pdf?sequence=1> (дата обращения 12.11.2013).
28. Perminova I. Humic substances assisted synthesis of nanoparticles in the nature and in the lab // Functions of Natural Organic Matter in Changing Environments. Proceeding of IHSS 16. Springer-Verlag GmbH China, 2012. P. 414–416.
29. Ponder S.M., Darab J.G., Mallouk T.E. Remediation of Cr(VI) and Pb(II) aqueous solutions using supported, nanoscale zero-valent iron // Environ. Sci. Technol. 2000. № 34. P. 2564–2569.
30. Terekhova V.A. Soil bioassay: Problems and approaches // Eurasian Soil Science. 2011. V. 44. № 2. P. 173–179. DOI: 0.1134/S1064229311020141.
31. Terekhova V.A., Pukalchik M.A., Yakovlev A.S. The triad approach to ecological assessment of urban soils // Eurasian Soil Science. 2014. V. 47. № 9. P. 952–958. DOI: 10.1134/S1064229314090129.
32. Tsyganova E.N., Zvyagintsev D.G., Lysak L.V., Stepanov A.L. The effect of a bacterial-humus preparation on the biological activity of soils // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. № 7. P. 788–792. DOI: 10.1134/S1064229313070107.
33. Yakimenko O.S., Terekhova V.A. Humic preparations and the assessment of their biological activity for certification purposes // Eurasian Soil Science. 2011. V. 44. № 11. P. 1222–1230. DOI: 10.1134/S1064229311090183.