

УДК 504.064.36:574

И. В. БУЛЬСКАЯ, А. П. КОЛБАС, Д. С. ДЫЛЮК

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ТОКСИЧНОСТИ ГОРОДСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОКОВ
(НА ПРИМЕРЕ г. БРЕСТА)**

*Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Беларусь,
e-mail: inabulskaya@gmail.com*

В данной работе представлены результаты фитотестирования методом проращивания семян водных проб поверхностного стока с территории г. Бреста, взятых в разные сезоны. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени загрязненности зимнего поверхностного стока ионами техногенного происхождения, а также о широком разнообразии вариантов ответов биологических объектов. Анализ индикативности растений по различным параметрам позволил выделить наиболее перспективные тест-объекты для рутинного мониторинга вод со смешанным загрязнением.

Ключевые слова: фитотестирование, поверхностный сток, комплексное загрязнение.

I. V. BULSKAYA, A. P. KOLBAS, D. S. DYLYUK

**RESEARCH OF PLANT TEST OBJECTS TO ASSESS THE TOXICITY OF URBAN RUNOFF
(ON THE EXAMPLE OF BREST)**

Brest State University named after A. S. Pushkin, Brest, Belarus, e-mail: inabulskaya@gmail.com

This paper presents the results of phytoassay of surface runoff from the territory of the city of Brest sampled in different seasons. Eight species of plants were tested as candidates for biomonitoring. The results indicate, first, a high degree of contamination of surface runoff of winter period due to the high content of salts having technogenic origin, secondly, the wide variety of types of responses in biological objects.

Keywords: phytotest, surface runoff, complex pollution.

Введение. Состояние поверхностных вод, рек и водоемов в Республике Беларусь подлежит постоянному мониторингу. Осуществляется строгий контроль за качеством отводимых в реки и водоемы промышленных и коммунальных сточных вод, однако некоторые аспекты функционирования городских территорий остаются вне устоявшейся системы контроля за состоянием окружающей среды. Примером может служить поверхностный сток (ПС) с городских территорий, отводимый в водные экосистемы. Подверженность таких водных объектов загрязнению является серьезным фактором ухудшения санитарно-эпидемиологической обстановки в городах. Поэтому мониторинг ПС и предотвращение загрязнения водных объектов на урбанизированных территориях, а также восстановление антропогенно нарушенных водных объектов становится одной из важнейших задач научно обоснованного обустройства населенных пунктов [1].

Результаты многочисленных исследований показывают, что загрязненность ПС может быть значительной, а спектр обнаруживаемых веществ весьма широк. Наибольшие риски представляют нитрат-, хлорид- и фосфат-ионы, а также катион аммония [2]. Причем многие авторы отмечают значительное варьирование содержания данных контаминантов в зависимости от сезона года [3]. Оценка химического состава ПС дает общее представление о степени его загрязненности, но не позволяет оценить степень его влияния на живые организмы. В связи с этим все более широкое распространение получают методы биологического контроля, в частности метод фитотести-

рования (биотестирование с использованием растений), который дает возможность с высокой вероятностью и значительной степенью воспроизводимости результатов оценить токсичность субстратов при наименьших затратах, а также помогает оценить биодоступность компонентов. Методами фитотестирования может быть произведена оценка состояния следующих субстратов: почв, почвенных вытяжек, природных и сточных вод [4]. Удобными тест-объектами для фитотестирования являются высшие растения со следующими характеристиками: а) короткий жизненный цикл; б) относительная дешевизна; в) возможность проводить исследования как *in situ*, так *ex situ*; г) высокая степень воспроизводимости результатов.

Цель данной работы – выявить наиболее индикативные растительные тест-объекты, которые могут быть использованы для фитотестирования поверхностных сточных вод урбоэкосистем методом проращивания семян.

Материалы и методы исследования. Задачи исследования: 1) биотестирование образцов вод, отобранных в зимний и летний сезоны с использованием 8 растений-кандидатов; 2) отбор наиболее индикативных таксонов растений и их параметров, перспективных для мониторинга загрязнения ПС в городских экосистемах.

Физико-химический анализ вод. Были использованы пробы ПС с территории г. Бреста, отобранные в месте выхода ливневого коллектора к р. Мухавец в зимний и летний периоды (далее: зимний поверхностный сток – ЗПС, летний поверхностный сток – ЛПС). Контрольным образцом послужила дистиллированная вода. Все физико-химические параметры проб ПС представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Состав поверхностного стока

Проба ПС	рН	Содержание компонента, мг/дм ³											
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Нефтепродукты	Zn	Cu	Fe	Ni	Co	Mn	Cd
ЗПС	7,92	4097,59	4,502	0,735	4,51	0,04	0,41	0,027	0,074	0,009	0,028	0,179	0,002
ЛПС	7,54	65,43	4,111	1,751	0,207	1,95	0,225	0,047	0,079	0,009	0,000	0,086	0,000

Параметры растений. В качестве тест-объектов были использованы семена представителей трех семейств: 1) Poaceae – ежа сборная (*Dactylis glomerata* L., далее – ЕС), фестулолиум (*Festulolium*, ФЛ), сорго зерновое (*Sorghum bicolor* L. Moench., СЗ), тимopheевка луговая (*Phleum pratense* L., ТЛ), овсяница тростниковая (*Festuca arundinacea* L., ОТ); 2) Fabaceae – люпин узколистный (*Lupinus angustifolius* L., ЛУ), клевер луговой (*Trifolium pratense* L., КЛ); 3) Brassicaceae – кресс-салат (*Lepidium sativum* L., КС). Применялись семена видов растений, апробированных при биотестировании в предыдущих работах [4], а также используемых в создании ландшафтных экспозиций на территории г. Бреста.

Для проведения фитотеста использовали чашки Петри. Все варианты опыта (с ЗПС, ЛПС и контролем) были заложены в 4 повторностях. По истечении 5 сут определяли всхожесть, энергию прорастания семян, измеряли длину корней и стеблей проростков [5, 6].

Статистический анализ. Статистический анализ проведен с использованием программы R, версия 3.2.1 (Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия). Выполнены анализ главных компонент (PCA) для параметров ПС и растений, Стьюдент-тест для выявления различий между средними (уровень достоверности был принят $p < 0,05$), составлена матрица корреляционных коэффициентов для тест-параметров по методу Пирсона.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1, 2 показано изменение тест-параметров у исследованных видов растений в ЛПС и ЗПС относительно контроля. Как видно из рисунков, среда ЗПС вызывает ингибирование роста и развития у большинства тест-культур. В вариантах ЛПС для ряда видов (ОТ, ТЛ, ФЛ) наблюдается гормезис – стимулирующее действие малых концентраций контаминантов, что отмечалось и в предыдущих исследованиях [7, 8].

При анализе видоспецифичности ответов растений выявлено, что наиболее чувствительными видами в условиях опыта являются ЕС и КЛ. У них зафиксировано по 4 статистически достоверно отличных как от контроля, так и между сезонами параметра. Средней индикативностью обладали ЛУ, ОТ, ФЛ, и ТЛ. Наименьшей индикативностью характеризовались КС и СЗ, что подтверждает

предположение о их значительной солеустойчивости [9, 10]. Подобная обратная зависимость чувствительности и устойчивости у растений описана ранее [7].

Параметры растений проявили различную индикативность. Наиболее чувствительными параметрами являлись энергия прорастания и длина корней, на 3-м месте была длина стеблей, на 4-м – всхожесть. Следует отметить, что параметры с большей индикативностью отличались также большей амплитудой колебания значений (рис. 1, 2).

Энергия прорастания, являющаяся комплексным параметром, учитывает не только количественную составляющую (число проростков), но и качественную (степень развития проростков), поэтому данный параметр наиболее чувствителен из исследованных.

Высокая индикативность подземных органов, отмечаемая ранее, объясняется аккумуляцией многих ионов преимущественно в корнях [11].

Несмотря на большой контакт с субстратом, корневые системы довольно пластичны. Поэтому окислительный стресс, вызванный избытком солей, может ингибировать рост первичных корней и стимулировать образование боковых корней из-за изменения минерального профиля, гормо-

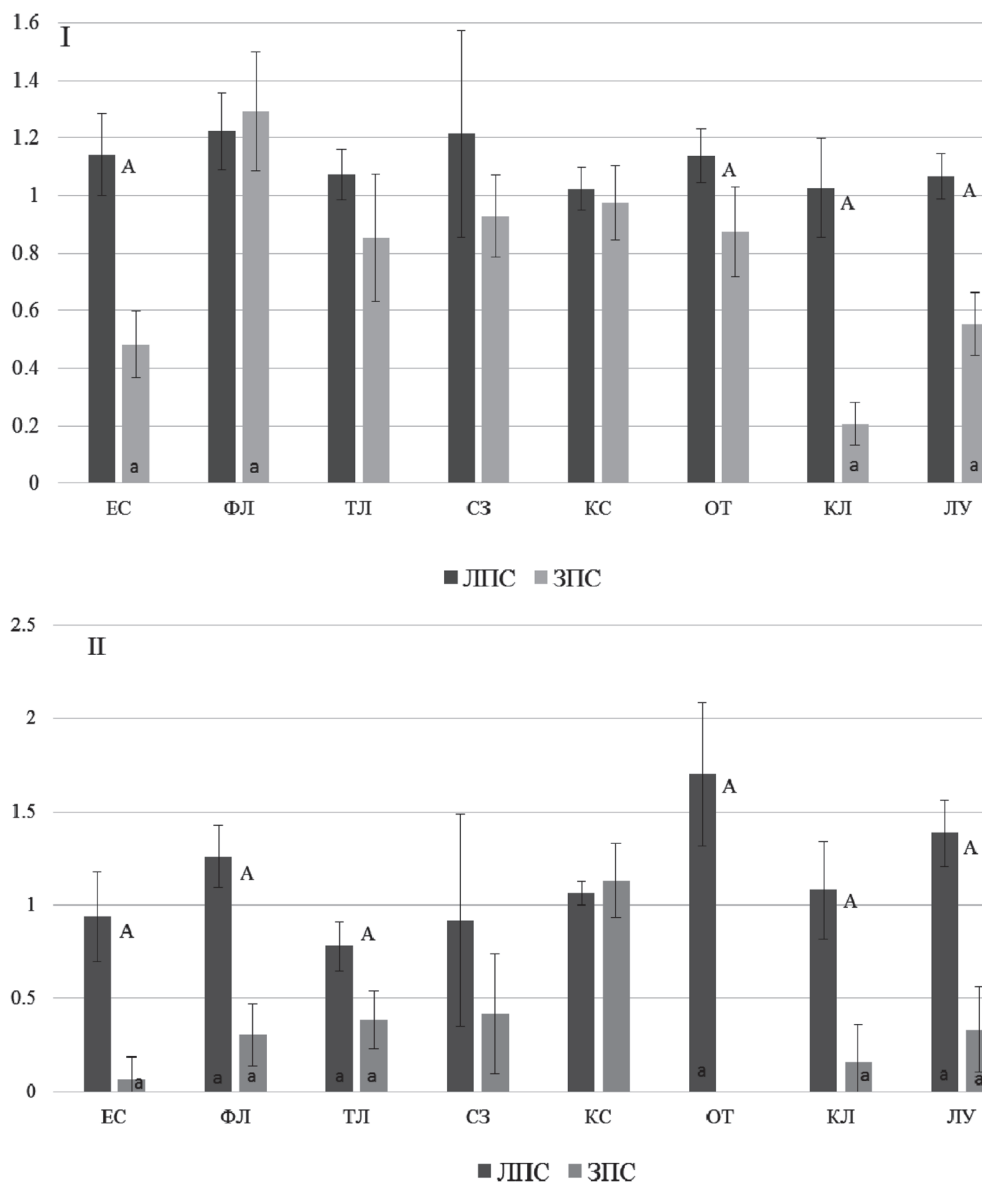


Рис. 1. Изменение тест-параметров относительно контроля у видов-кандидатов (I – всхожесть семян, II – энергия прорастания, 1 – значение параметра в контроле).

Здесь и на рис. 2 различия статистически достоверны:

A – между параметрами в ЛПС и ЗПС, a – между параметрами ПС и контролем

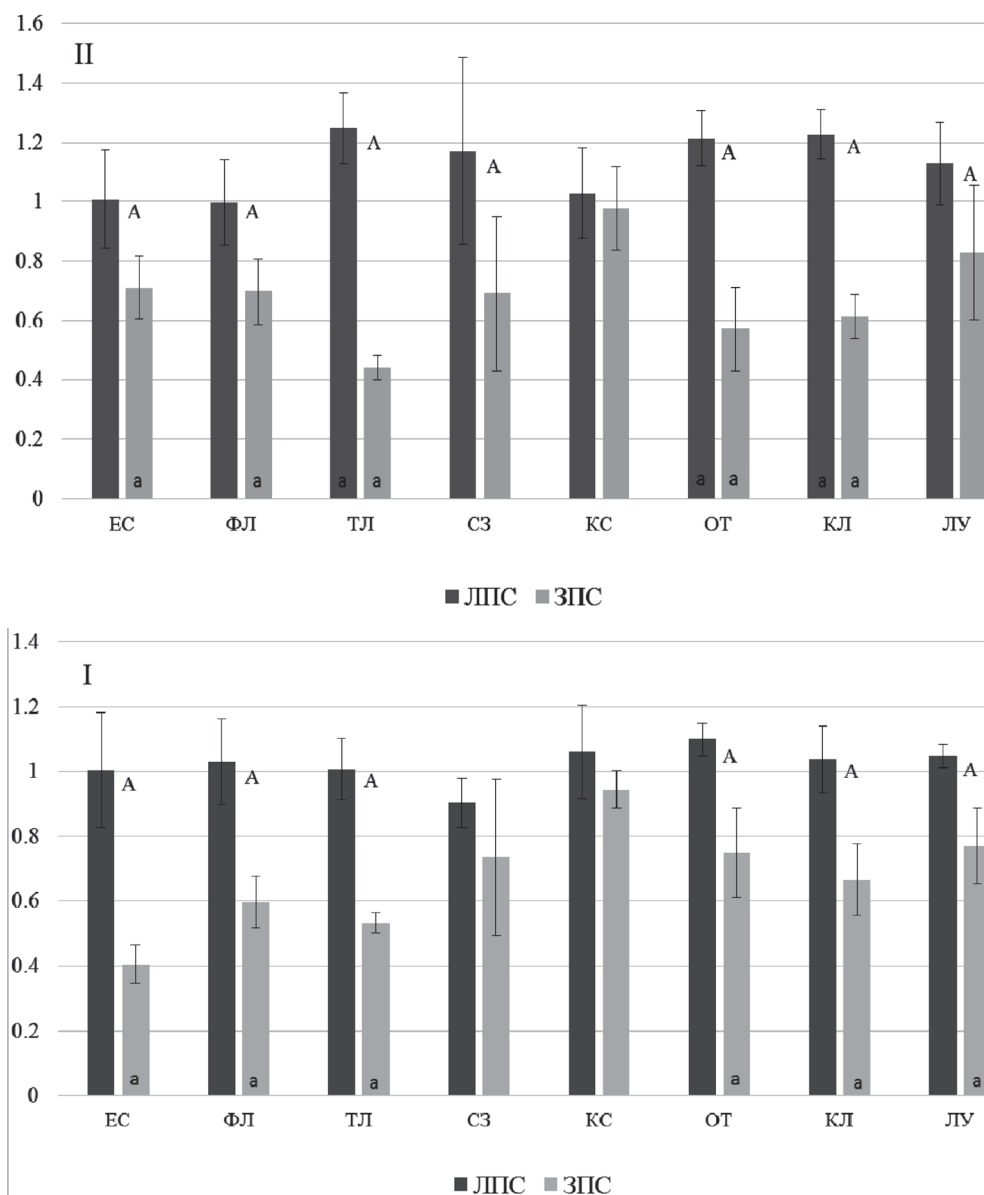


Рис. 2. Изменение тест-параметров относительно контроля у видов-кандидатов (I – средняя длина корня, II – средняя длина стебля, 1 – значение параметра в контроле)

нального статуса, митотической активности, проницаемости клеточной мембраны, концентрации H_2O_2 и степени лигнификации [12].

Анализ главных компонент для большинства тест-параметров протестированных таксонов (кроме КС) выявил обратную зависимость от Cl^- , PO_4^{3-} , Co и Cd, в меньшей степени – от Zn и Mn (рис. 3). У этих компонентов максимальное число обратных достоверных корреляций (табл. 2). Так, содержание Cl^- показало значимую обратную связь с энергией прорастания (у 6 видов), всхожестью (у ЕС, ОТ, КЛ, ЛУ), длиной корней (у 7 видов) и длиной стеблей проростков (у 5 видов). Для PO_4^{3-} значимые обратные зависимости выявлены для энергии прорастания семян (у 6 видов), всхожести (у ЕС, ОТ, КЛ, ЛУ), длины корней (у 7 видов) и стеблей (у 6 видов). Для Co и Cd отрицательная связь выявлена с энергией прорастания (у 6 видов), всхожестью (у ЕС, ОТ, КЛ, ЛУ), длиной корней (у 7 видов) и длиной стеблей (у 5 видов). Для Zn и Mn значимые обратные связи выявлены с энергией прорастания (у ЕС, ФЛ, ТЛ, ОТ, КЛ и ЛУ – только для Mn), всхожестью семян (у 5 видов), длиной корней (у 7 видов) и стеблей (у 5 видов). Полученные результаты свидетельствуют об отрицательном действии повышенного содержания этих компонентов ПС на развитие растений на ранних этапах жизненного цикла. Cl^- и PO_4^{3-} являются главнейшими стресс-

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты корреляции (по Пирсону) между тест-параметрами растений и компонентами ПС

Таксон/ параметр	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Нефтепродукты	Zn	Cu	Fe	Ni	Co	Mn	Cd
ЕС/ЭП	-0,93***	-0,57	0,03	-0,93***	0,40	-0,81**	-0,13	-0,47	-0,54	-0,93***	-0,84***	-0,93***
ЕС/ВСХ	-0,92***	-0,36	0,28	-0,91***	0,61**	-0,66**	0,12	-0,24	-0,33	-0,92***	-0,71**	-0,92***
ЕС/ДК	-0,90***	-0,51	0,09	-0,90***	0,44	-0,75**	-0,07	-0,40	-0,48	-0,90***	-0,79**	-0,90***
ЕС/ДС	-0,75**	-0,41	0,09	-0,75**	0,38	-0,62**	-0,04	-0,32	-0,39	-0,75***	-0,65**	-0,75**
ФЛ/ЭП	-0,92***	-0,31	0,34	-0,91***	0,67*	-0,63*	0,18	-0,19	-0,28	-0,92***	-0,69*	-0,92***
ФЛ/ВСХ	0,44	0,62*	0,42	0,45	0,19	0,61**	0,49	0,60	0,62**	0,43	0,60**	0,43
ФЛ/ДК	-0,89***	-0,46	0,14	-0,89***	0,48	-0,71***	-0,02	-0,35	-0,43	-0,89***	-0,75***	-0,89***
ФЛ/ДС	-0,79**	-0,45	0,07	-0,79**	0,38	-0,66**	-0,07	-0,36	-0,42	-0,79***	-0,69**	-0,79**
ТЛ/ЭП	-0,85***	-0,75**	-0,24	-0,86***	0,13	-0,89***	-0,39	-0,67*	-0,72**	-0,85***	-0,90***	-0,85***
ТЛ/ВСХ	-0,50	-0,14	0,22	-0,50	0,40	-0,33	0,13	-0,07	-0,12	-0,50	-0,36	-0,50
ТЛ/ДК	-0,97***	-0,54*	0,10	-0,97***	0,48	-0,81**	-0,07	-0,43	-0,51**	-0,97***	-0,85***	-0,97**
ТЛ/ДС	-0,93***	-0,29	0,38	-0,92***	0,71**	-0,62**	0,21	-0,16	-0,25	-0,93***	-0,68**	-0,93***
СЗ/ЭП	-0,50	-0,34	-0,02	-0,50	0,18	-0,45	-0,11	-0,28	-0,32	-0,50	-0,47	-0,50
СЗ/ВСХ	-0,28	0,08	0,32	-0,27	0,40	-0,08	0,27	0,14	0,10	-0,29	-0,11	-0,29
СЗ/ДК	-0,60**	-0,53	-0,18	-0,61**	0,09	-0,63**	-0,28	-0,48	-0,52	-0,60**	-0,64**	-0,60**
СЗ/ДС	-0,61**	-0,16	0,29	-0,61**	0,50	-0,39	0,18	-0,07	-0,13	-0,62**	-0,43	-0,62**
КС/ЭП	0,33	0,34	0,16	0,33	0,01	0,37	0,21	0,31	0,33	0,32	0,37	0,32
КС/ВСХ	-0,20	-0,02	0,13	-0,19	0,20	-0,10	0,10	0,01	-0,01	-0,20	-0,12	-0,20
КС/ДК	-0,38	-0,02	0,27	-0,38	0,39	-0,19	0,20	0,04	-0,01	-0,39	-0,23	-0,39
КС/ДС	-0,16	-0,01	0,12	-0,16	0,17	-0,08	0,09	0,02	0,00	-0,16	-0,09	-0,16
ОТ/ЭП	-0,96***	-0,96***	0,96***	-0,96***	0,96***	-0,96***	0,96***	0,96***	-0,96***	-0,96***	-0,96***	-0,96***
ОТ/ВСХ	-0,76**	-0,76**	0,76**	-0,76**	0,76**	-0,76**	0,76**	0,76**	-0,76**	-0,76**	-0,76**	-0,76**
ОТ/ДК	-0,89***	-0,89***	0,89***	-0,89***	0,89***	-0,89***	0,89***	0,89***	-0,89***	-0,89***	-0,89***	-0,89***
ОТ/ДС	-0,95***	-0,95***	0,95***	-0,95***	0,95***	-0,95***	0,95***	0,95***	-0,95***	-0,95***	-0,95***	-0,95***
КЛ/ЭП	-0,90***	-0,45	0,15	-0,90***	0,50	-0,72**	0,00	-0,35	-0,42	-0,90***	-0,76***	-0,90***
КЛ/ВСХ	-0,96***	-0,96***	0,96***	-0,96***	0,96***	-0,96***	0,96***	0,96***	-0,96***	-0,96***	-0,96***	-0,96***
КЛ/ДК	-0,89***	-0,89***	0,89***	-0,89***	0,89***	-0,89***	0,89***	0,89***	-0,89***	-0,89***	-0,89***	-0,89***
КЛ/ДС	-0,98***	-0,98***	0,98***	-0,98***	0,98***	-0,98***	0,98***	0,98***	-0,98***	-0,98***	-0,98***	-0,98***
ЛУ/ЭП	-0,85***	-0,21	0,41	-0,84***	0,71*	-0,54	0,26	-0,09	-0,18	-0,86***	-0,59*	-0,86***
ЛУ/ВСХ	-0,92***	-0,43	0,19	-0,92***	0,54	-0,71**	0,03	-0,32	-0,40	-0,93***	-0,76**	-0,93***
ЛУ/ДК	-0,84***	-0,36	0,21	-0,83***	0,53	-0,63*	0,07	-0,26	-0,33	-0,84***	-0,67*	-0,84***
ЛУ/ДС	-0,53	-0,09	0,30	-0,53	0,48	-0,31	0,21	-0,02	-0,07	-0,54	-0,35	-0,54

Примечание. ЭП – энергия прорастания, ВСХ – всхожесть, ДК – средняя длина корня, ДС – средняя длина стебля. Уровни достоверности: * – $p = 0,05-0,01$; ** – $p = 0,01-0,001$; *** – $p < 0,001$.

факторами в ЗПС, о чем свидетельствует максимальное количество обратных достоверных корреляций. В накопление этих поллютантов в ЗПС значительный вклад вносят антигололедные реагенты [13].

Анализ главных компонент выявил положительную связь между содержанием NH₄⁺, НП, Cu и тест-параметрами (рис. 3). Анализ корреляций выявил также положительную связь содержания этих примесей с тест-параметрами, однако число достоверных корреляций невелико: для NH₄⁺ и Cu достоверные связи выявлены с энергией прорастания (ОТ), всхожестью семян, длиной корней и стеблей проростков (ОТ, КЛ); для НП – с энергией прорастания (ФЛ, ОТ, КЛ, ЛУ), всхожестью (ЕС, ОТ, КЛ), длиной корней (ОТ, КЛ) и стеблей (ТЛ, ОТ, КЛ). Эти компоненты могут играть важную роль в проявлении горемезиса.

Благоприятное влияние НП (нефтяного ростового вещества) на рост и развитие проростков [14], стимулирующую роль ионов меди в определенных концентрациях [8, 11] и соединений азота [15] отмечали ранее и другие авторы.

Повышенное содержание Cl⁻ в среде является отрицательным фактором. Реакция растительных организмов на засоление неспецифична. Виды растений проявляют разную степень чувствительности к солевому стрессу, но общим является снижение ростовых процессов и темпов нарастания биомассы. Это связано с торможением синтеза белков и нуклеиновых кислот под влиянием

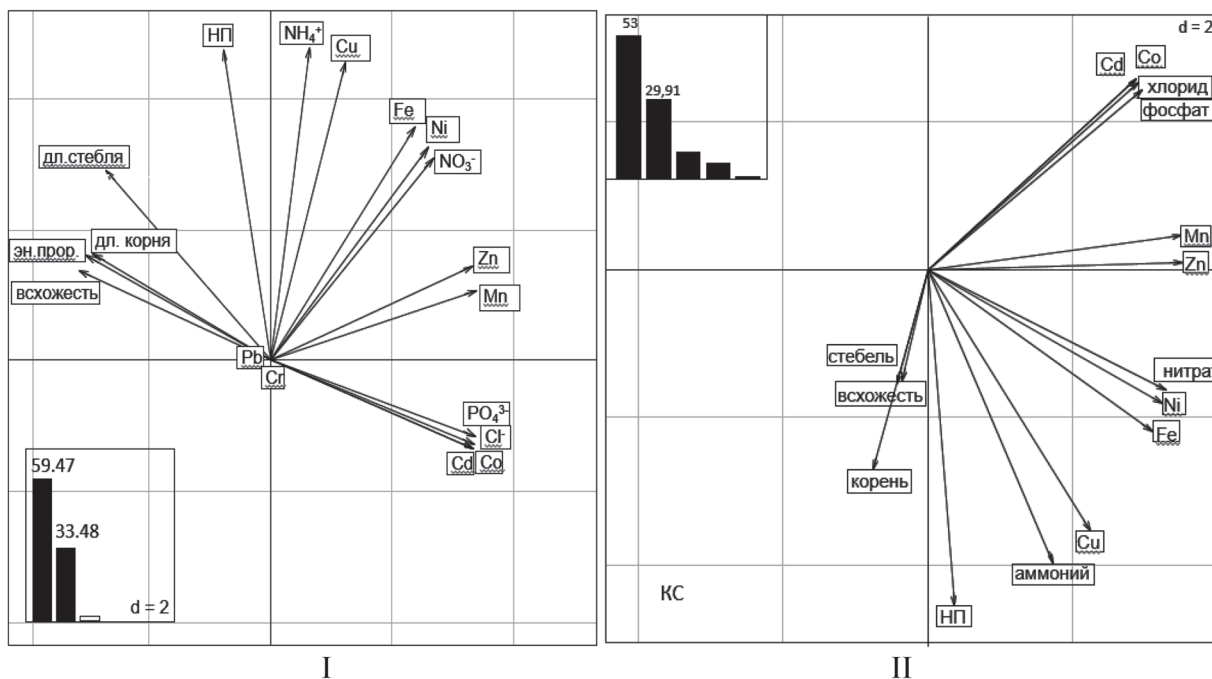


Рис. 3. Анализ главных компонент для некоторых видов-кандидатов (I – клевер луговой, II – кресс-салат)

засоляющих ионов вследствие снижения доступности воды и токсического действия засоляющих ионов на клетки растений [16, 17].

Источниками Zn в ПС являются истирание различных деталей транспортных средств и шин, эрозия оцинкованных поверхностей, использование в маслах цинксодержащих присадок [18]. Отмечено, что повышенное содержание в среде Zn снижает всхожесть семян (например, овса *Avena sativa* L.), подавляет развитие корня, стебля и развитие ризосферных бактерий. Аналогичные эффекты описаны при повышенном содержании Co [19], как и снижение содержания белка и изменение его фракционного состава у бобовых (*Pisum sativum* L.) [20]. В литературе имеются данные о существенной токсичности Zn для водорослей в концентрациях, характерных для ПС (от 0,1 до 10 мг/дм³). Важно, что основная масса Zn содержится в ПС в ионной форме, наиболее доступной для поглощения растениями [21, 22].

Показано, что наличие в среде Cd приводит к значительному снижению всхожести семян, уменьшению биометрических показателей (длины корня и побега), угнетению роста растений, нарушению процессов транспорта ассимилятов, ослаблению минерального питания, нарушению водного и гормонального обмена, снижению активности фотосинтеза и дыхания [23, 24].

Правильный выбор наиболее чувствительного параметра является важной задачей биомониторинга. Исследования показывают, что при загрязнении тяжелыми металлами наиболее чувствительным параметром для семян озимой пшеницы, ярового ячменя, редиса и кабачков является длина корней, наименее чувствительными – энергия прорастания и всхожесть [25]. Для горчицы белой в условиях загрязнения подвижным фосфором длина корней является наиболее чувствительным, а всхожесть – наименее чувствительным параметром [26].

Семена разных видов избирательно реагируют на определенные классы загрязнителей и их смеси. Поэтому наиболее перспективным является использование нескольких видов для фитотестирования. Это позволяет с большей точностью регистрировать минимально действующие концентрации токсикантов в условиях комплексного загрязнения.

Заключение. Полученные оригинальные результаты эксперимента свидетельствуют, что метод проращивания семян может быть использован для биотестирования поверхностного стока и других видов сточных вод со смешанным загрязнением. Наиболее чувствительными видами в условиях опыта были ежа сборная и клевер луговой. Эти виды могут быть рекомендованы в качестве тест-объектов для фитотеста. Наиболее информативными параметрами являлись энергия

прорастания семян и длина корней проростков. Для эффективного выявления действия токсических компонентов в условиях комплексного загрязнения рекомендуется проводить фитотест с использованием не менее двух видов растений и двух-трех тест-параметров.

Список использованной литературы

1. Горюнова, С. В. Экологические аспекты исследования состояния урбанизированных водных объектов (на примере одного из прудов г. Москвы) / С. В. Горюнова // Вестн. РУДН. Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2006. – № 1 (13). – С. 28–33.
2. Мониторинг техногенной нагрузки от поверхностных сточных вод на городскую дождевую канализацию / А. Б. Невзорова [и др.] // Вестн. Брестск. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 61–66.
3. Monitoring and flux determination of trace metals in rivers of the Seversky Donets basin (Ukraine) using DGT passive samplers / Y. Vystavna [et al.] // Environmental Earth Sci. – 2012. – N 65.– P. 1715–1725.
4. Лисовицкая, О. В. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения / О. В. Лисовицкая, В. А. Терехова // Докл. по эколог. почвоведению. – М.: МГУ, 2010. – Вып. 13. – С. 18.
5. Методика определения силы роста семян кормовых культур / В. И. Карпин [и др.]. – М.: Издво РГАУ–МСХА, 2012. – 16 с.
6. Методы определения всхожести: ГОСТ 12038-84. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 56 с.
7. Calabrese, E. J. Hormesis and plant biology / E. G. Calabrese, R. B. Blain // Environmental Pollution. – 2009. – N 157. – P. 42–48.
8. Phenotypic seedling responses of a metal-tolerant mutant line of sunflower growing on a Cu-contaminated soil series: potential uses for biomonitoring of Cu exposure and phytoremediation / A. Kolbas [et al.] // Plant and Soil. – 2014. – N 376. – P. 377–397.
9. Чиркова, Т. В. Физиологические основы устойчивости растений: учеб. пособие для студентов биол. факультетов вузов / Т. В. Чиркова. – СПб.: СПбГУ, 2002. – 244 с.
10. Зайцева, Р. И. Характеристика солеустойчивости кормовых культур в начальной фазе вегетации при засолении чернозема хлоридом натрия / Р. И. Зайцева, Л. И. Желнакова, Н. С. Никитина // Бюл. Почвен. ин-та им. В. В. Докучаева. – 2009. – № 63. – С. 25–40.
11. Copper excess triggers phospholipase D activity in wheat roots / F. Navari-Izzo [et al.] // Phytochemistry. – 2006. – N 67. – P. 1232–1242.
12. Lequeux, H. Response to copper excess in *Arabidopsis thaliana*: impact on the root system architecture, hormone distribution, lignin accumulation and mineral profile / H. Lequeux // Plant Physiol. and Biochem. – 2010. – N 48. – P. 673–682.
13. Бульская, И. В. Источники загрязнения поверхностного стока с урбанизированных территорий некоторыми ионами и нефтепродуктами / И. В. Бульская, А. П. Колбас, А. А. Волчек // Эколог. вестн. – 2015. – № 2 (32). – С. 28–33.
14. Седых, В. Н. Влияние отходов бурения и нефти на физиологическое состояние растений / В. Н. Седых, Л. А. Игнатъев // Сибир. эколог. журн. – 2002. – № 1. – С. 47–52.
15. Лисенко, А. Ф. Оптимальные концентрации раствора аммиачной селитры для предпосевной обработки семян люцерны сибирской / А. Ф. Лисенко, И. А. Карузина, Л. Р. Нипа // Тр. Сибир. технол. ин-та. – 1968. – Т. 3. – С. 187–196.
16. Функциональное состояние фотосинтетического аппарата проростков тритикале при хлоридном засолении / А. Р. Гарифзянов [и др.] // Изв. Тульск. гос. ун-та. Естеств. науки. – 2014. – Вып. 1, ч. 1. – С. 280–290.
17. Еремченко, О. З. Содержание пигментов в растениях *Lepidium sativum* в условиях хлоридно-натриевого засоления и ошелачивания / О. З. Еремченко, М. Г. Кусакина, Е. В. Лузина // Вестн. Пермск. ун-та. Биология. – 2014. – Вып. 1. – С. 30–35.
18. Пшенин, В. Н. Актуальные вопросы оценки загрязнения почвенного покрова вблизи автомагистралей / В. Н. Пшенин // Экологизация автомобильного транспорта: тр. Всерос. науч.-практ. семинара. – СПб.: МАНЭБ, 2003. – С. 83–88.
19. Щелкова, Ю. А. Исследование влияния тяжелых металлов на рост растений и микрофлору почвы / Ю. А. Щелкова // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. 25, № 11. – С. 75–79.
20. Бортников, С. В. Влияние кобальта на качественный и количественный состав белка растений *Pisum sativum* / С. В. Бортников // Альманах соврем. науки и образования. – 2009. – № 5 (24). – С. 28–30.
21. Landner, L. Zinc in society and in the environment / L. Landner, L. Lindstrom; Swedish Environmental Res. Group. – 1998. – 160 p.
22. Bioavailability of zinc in runoff water from roofing materials / D. G. Hejjerick [et al.] // Chemosphere. – 2002. – N 47. – P. 1073–1080.
23. Влияние кадмия на состав жирных кислот липидов в побегах карельской березы *in vitro* / Т. Ю. Кузнецова [и др.] // Физиол. раст. – 2008. – Т. 55, № 5. – С. 731–737.
24. Кузнецова, С. А. Влияние кадмия на ростовые процессы и интенсивность фотосинтеза растений пшеницы / С. А. Кузнецова, Д. А. Климачев // Вестн. МГОУ. Естеств. науки. – 2014. – № 5. – С. 20–24.
25. Колесников, С. И. Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения / С. И. Колесников, К. Ш. Казеев, В. Ф. Вальков. – Ростов н/Д: Росиздат, 2006. – 385 с.
26. Экотоксикологическая оценка повышенного содержания фосфора в почвогрунте по тест-реакциям на разных стадиях развития / В. А. Терехова [и др.] // Проблемы агрохимии и экологии. – 2009. – № 3. – С. 21–26.

Поступила в редакцию 11.01.2016