

Генотоксические эффекты в растениях *Tradescantia (clon 02)*, индуцированные бенз[а]пиреном

Е. В. ЯКОВЛЕВА, В. А. БЕЗНОСИКОВ, Б. М. КОНДРАТЕНКО, А. А. ХОМИЧЕНКО

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28
E-mail:kaleeva@ib komisc.ru

АННОТАЦИЯ

Проведены исследования генотоксичности бенз[а]пирена, внесенного в почву, для растений *Tradescantia (clon 02)*. Выявлены различные уровни адаптации *Tradescantia (clon 02)* к загрязнению почвы бенз[а]пиреном. Установлено, что продукты метаболизма бенз[а]пирена оказывают на растения ауксиновое действие, влияя на рост биомассы корней и размер клеток.

Ключевые слова: бенз[а]пирен, загрязнение, генотоксичность, почва, растения, адаптация.

Проблема генетической безопасности приобретает все большую значимость в связи с усиливающимся загрязнением окружающей среды и возрастающей частотой онкологических заболеваний. Спектр химических веществ и физических факторов, влияющих на человека и другие организмы, с каждым годом увеличивается. Сюда входят и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), индикатором которых принят бенз[а]пирен. В силу высокой биологической активности канцеро-, мута- и тератогенного действия он относится к суперэкогенотоксикантам 1-го класса опасности и подлежит обязательному контролю в объектах окружающей среды. ПАУ являются приоритетными загрязнителями в списке как Европейского сообщества (ЕС), так и Агентства по охране окружающей среды США (EPA) [1]. В результате наличия различных источников происхождения ПАУ, приводящих к загрязнению системы почва – растение полиаренами, существует угроза для генетической безопасности большей части населения.

В исследовании генотоксичности *Tradescantia (clon 02)* занимает ведущее место [2–5]. Так, в течение трех лет Т. И. Евсеева и В. Г. Зайнуллин [5] проводили исследования генотоксичности у *Tradescantia (clon 02)* под влиянием снежного покрова г. Сыктывкара. В. С. Погосян с соавт. [4] изучали влияние загрязненности атмосферы выбросами промышленных предприятий и автотранспорта на частоту соматических мутаций у традесканции. В пунктах, где сосредоточен ряд химических предприятий и повышена интенсивность движения автотранспорта, частота мутаций у традесканции превышает контроль в 4,0–8,5 раз.

На сегодняшний день *Tradescantia (clon 02)* – почти единственная тест-система, пригодная для обнаружения мутагенности атмосферных загрязнителей *in situ* и рекомендованная в качестве экспресс-метода на первом этапе в системе генетического мониторинга загрязнений окружающей среды [6, 7]. Видимым маркером, используемым в данном тест-объекте, является фенотипическое изменение в пигментации от голубого к розовому в клетках волосков тычиночных нитей (ВТН) [8]. Учет соматических мутаций в ВТН признан простым и точным, поэтому привлекательным

Яковлева Евгения Вячеславовна
Безносилов Василий Александрович
Кондратенко Борис Михайлович
Хомиченко Алексей Александрович

методом изучения мутагенеза при действии широкого набора мутагенных факторов [9, 10].

Tradescantia (clon 02) относится к семейству Commelinaceae R. Br. и наиболее часто применяется в целях оценки мутагенных воздействий, химических и физических факторов [11–15], это гибрид между *T. occidentales* Britton ex. Rydb. и *T. ohiensis* Raf. [2, 3, 16], полученный из природной популяции, гетерозиготный по окраске цветка [17].

В ряде исследований по радиационному и химическому мутагенезу установлено, что соматические клетки волосков тычиночных нитей традесканции близки по чувствительности к клеткам животных организмов в отношении потери репродуктивной способности, а по критерию “частота соматических мутаций” даже превосходят их [11–13]. Возможность применения данного тест-объекта и точность данных о загрязнении окружающей среды, получаемых с его помощью, официально подтверждены многими ведущими лабораториями мира [14].

Цель работы – выявить механизмы токсического действия разных доз бенз[а]пирена, внесенного в почву, на растения *Tradescantia (clon 02)*.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В модельных лабораторных опытах использовали пахотный слой ($A_{\text{пах}} 0 \div 20$ см) окультуренной подзолистой почвы, сформированной на пылеватом покровном суглинке. Почву пахотного горизонта набивали в стеклянные сосуды, масса почвы в каждом сосуде составляла 400 г. Бенз[а]пирен в почву вносили в виде водного раствора соответствующей концентрации, приготовленного разбавлением исходного государственного стандартного образца (ГСО) с содержанием бенз[а]пирена 200 мг/см³ (ГСО № 7515/98). Количество внесенного бенз[а]пирена соответствовало его содержанию в сосудах 10, 20, 30 и 40 нг/г почвы. Контрольный вариант – без внесения бенз[а]пирена. Повторность в опытах 6-кратная. Культура – *Tradescantia (clon 02)*. Опыты проводили в лабораторных условиях при комнатной температуре (20–25 °С) и освещенности. Влажность почвы в сосудах поддерживали дистиллированной водой на уровне 60 % от максимального значения влагоемкости.

По мере появления цветков с 4-го по 50-й день после внесения бенз[а]пирена волоски тычиночных нитей (ВТН) традесканции ежедневно исследовали на частоту соматических мутаций по критерию изменения доминантной голубой окраски на рецессивную розовую. Наряду с этим вели учет морфологических аномалий (МА): количества гигантских (ГК) и карликовых клеток (КК), разветвлений (НМ) и изгибов волосков. Белые мутантные события (БМС) и угнетение клеточного деления (УКД) учитывали отдельно.

Перед анализом тычиночные нити тщательно отделяли от основания пинцетом и помещали в каплю растительного масла на предметном стекле, затем волоски аккуратно распрямляли, препараты исследовали под микроскопом при увеличении 15×8 .

Частоту розовых мутантных событий (РМС), МА и БМС подсчитывали как отношение числа мутантных клеток к общему количеству клеток в волоске тычиночной нити. Одиночные клетки или группу мутантных клеток, отделенных одной или более нормальными клетками, рассматривали как результат двух мутантных событий. Показатель “угнетение клеточного деления” рассчитывали как долю невыживших волосков (менее чем 12 клеток) от общего количества проанализированных волосков. Всего в лабораторном эксперименте проанализировано 39 442 ВТН.

Растения выращивали в течение 1,5 мес., затем срезали и учитывали общую биомассу растений и отдельно корней и листьев. Расчет выноса ПАУ соответствующими органами растений и в целом растений проводили на воздушно-сухую массу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе модельного эксперимента обнаружен ряд морфологических отклонений у *Tradescantia (clon 02)*, выращенной на почве при внесении различных доз бенз[а]пирена (табл. 1).

По сумме морфологических отклонений в цветках *Tradescantia (clon 02)* выявлены статистически достоверные устойчивые изменения в зависимости от дозы бенз[а]пирена, внесенного в почву. В контрольном варианте морфологические отклонения обнаружены у

Т а б л и ц а 1
Частота проявления морфологических отклонений цветков *Tradescantia (clon 02)*, %

Массовая доля бенз[а]пирена, нг/г почвы	Количество цветков, шт.	Нераскрывшиеся бутоны	Изогнутые тычинки	Редукция тычинок	Сросшиеся чашелистики	Сросшиеся лепестки	Σ морфологических отклонений	Σ морфологических отклонений	
								\bar{X}	$S\bar{x}$
0	77	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,12	0,09	0,12
10	31	0,21	0,21	0,10	0	—	0,52	0,40	0,52
20	47	0,23	0,23	0,05	0,14	0,08	0,68	0,36	0,68
30	43	0,32	0,43	0,11	0,11	0,08	1,14	0,50	1,14
40	33	0,73	0,37	0,09	0,37	0,17	1,74	0,80	1,74

0,12 % исследуемых цветков. По мере увеличения дозы бенз[а]пирена частота проявления морфологических отклонений увеличилась и достигала 1,74 % при дозе 40 нг/г. Наблюдался рост частоты появления цветков с нераскрывшимися бутонами, сросшимися чашелистиками и лепестками. В контрольном варианте и при загрязнении почв в дозе 10 нг/г сросшихся лепестков не обнаружено. Аналогичным образом возрастала частота МА в волосках тычиночных нитей *Tradescantia (clon 02)* с увеличением дозы бенз[а]пирена, внесенного в почву (табл. 2).

Рост частоты проявления МА определялся повышением частоты проявления изгибов в ВТН *Tradescantia (clon 02)* с ростом уровня загрязнения. В целом дозовая зависимость частоты проявления морфологических отклонений у цветков и ВТН *Tradescantia (clon 02)* носила логарифмический характер и являлась начальной стадией классической S-образной кривой. Закономерности распределения бенз[а]пирена в растениях и кривые проявления морфологических отклонений у цветков и ВТН идентичны, что говорит о тератогенном действии бенз[а]пирена. Увеличение частоты проявления морфологических отклонений в цветках и тычинках *Tradescantia (clon 02)* с ростом содержания бенз[а]пирена в растении свидетельствовало о том, что механизмы адаптации растения не проявлялись на морфологическом уровне при данных дозах загрязнителя.

Гигантские и карликовые клетки по-иному реагировали на разные дозы бенз[а]пирена. ГК и КК, как и изгибы, — проявление МА, однако они связаны с изменениями размера, а не расположения клеток. Частота проявления карликовых клеток при загрязнении была достоверно выше контрольных значений и практически не изменялась при разных концентрациях загрязнителя.

При загрязнении 20 нг/г наблюдался пик частоты проявления ГК. Кривая зависимости частоты проявления ГК ($r = 0,93$) была аналогична кривой изменения биомассы растения (рис. 1). Биомасса традесканции при различных уровнях загрязнения почвы бенз[а]пиреном подчинялась нелинейной зависимости, которая хорошо описывалась уравнением второй степени ($R^2 = 0,95$). Пик роста биомассы растений приходился на уровни за-

изменяется аналогично биомассе растения, что подтверждает ауксиновое действие бенз[а]пирена, следствием которого становится растяжение клеток.

В ходе биологического окисления ароматических углеводов инициируются свободно-радикальные процессы в клетках, образуются ареноксины, формирующие ковалентные связи с нуклеофильными фрагментами клеток (белков, нуклеиновых кислот и др.), активирующие перекисное окисление липидов биологических мембран. В итоге инициируется мутагенное, канцерогенное, цитотоксическое действие полиаренов [21, 22].

В ходе исследования ВТН обнаружена тенденция к увеличению БМС и УЖД у *Tradescantia (clon 02)* с ростом уровня загрязнения бенз[а]пиреном (рис. 2). БМС и УЖД являются морфологическими отклонениями, их проявление может определяться целым рядом механизмов (нарушением клеточного цикла, гормональными перестройками и т. д.).

Анализ частоты угнетения клеточного деления показал достоверное увеличение количества угнетенных волосков с ростом уровня загрязнения. Превышение частоты нарушений в актах клеточного угнетения было почти в 2 раза выше для всех значений доз

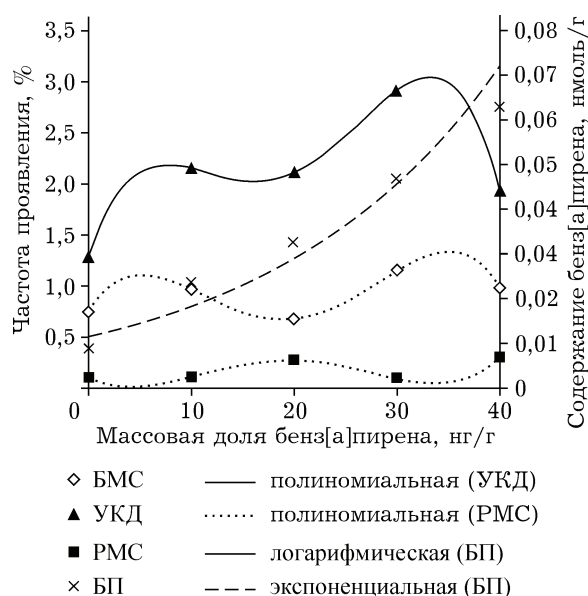


Рис. 2. Частота проявления РМС, БМС и УЖД в ВТН цветков *Tradescantia (clon 02)* в зависимости от содержания бенз[а]пирена в почве и растении, где БП – содержание бенз[а]пирена в растении, нмоль/г

бенз[а]пирена по сравнению с контролем. Угнетение клеточного деления объясняется задержкой хода митоза, что свидетельствует о выраженном токсическом действии бенз[а]пирена на растения. Снижение скорости деления и растяжения клеток под действием бенз[а]пирена может происходить за счет разных механизмов: прямого связывания с ДНК, удлинения митотического цикла, нарушения формирования микротрубочек, снижения пластичности клеточных оболочек, уменьшения пула глутатиона [21, 23].

Аналогично УЖД изменялась частота проявления БМС. Показатель белых мутантных событий варьировал от 0,68 до 0,98 %, причем в вариантах при дозах бенз[а]пирена 30, 40 нг/г этот показатель был достоверно выше контроля (при $P = 0,95$). При дозе 20 нг/г бенз[а]пирена в почве наблюдался спад частоты угнетения клеточного деления и проявления белых мутантных событий. Возможно, при таком уровне загрязнения растение приобретает резистентность относительно данных эффектов и проявляются механизмы репарации клеток.

В эксперименте наибольшей токсичностью относительно БМС и УЖД характеризуется вариант при внесении бенз[а]пирена в почву в дозе 30 нг/г почвы. Растение теряет способность к адаптации, и дальнейшее снижение частоты проявления БМС и УЖД является следствием снижения биомассы в целом и количества цветков в частности.

Повышение числа розовых мутантных событий свидетельствует о мутагенном действии бенз[а]пирена на растение, оно обусловлено гетерозиготностью растений по окраске цветка. В норме тычинки имеют доминантную голубую окраску, которая детерминирована генетическим фактором (Д+), отвечающим за выработку пигмента демфинидина [5]. РМС являются истинными генетическими нарушениями и возникают при элиминации доминантного гена голубой окраски.

Частота розовых мутантных событий изменялась от 0,11 до 0,30 %. В вариантах при массовой доле бенз[а]пирена 20 и 40 нг/г уровень этих нарушений оказался максимальным, что полностью противоположно изменениям в частоте проявления БМС и УЖД. Частота проявления РМС – наиболее чувствительный показатель реакции растения на

стрессовое воздействие. На основании проведенных исследований выявлены три интервала дозовой зависимости накопления бенз[а]пирена растением и частоты проявления соматических мутаций в волосках тычиночных нитей *Tradescantia (clon 02)*.

В первом интервале кривой – интервале малых доз бенз[а]пирена в почве (0–20 нг/г) – наблюдался закономерный рост содержания бенз[а]пирена в растении и частоты проявления РМС. Растение находилось в фазе тревоги и проявляло первичную реакцию на стресс – росли биомасса растения и общее содержание ПАУ в растении, в составе ПАУ растений преобладали легкие структуры (фенантрен).

Во втором интервале – области средних доз (20–30 нг/г) – наблюдался резкий спад проявления РМС на фоне дальнейшего роста содержания бенз[а]пирена в растении. Снижение частоты проявления РМС при данной дозе бенз[а]пирена может быть объяснено либо включением у растения механизмов репарации, либо явлениями апоптоза клеток, который может проявляться в виде УКД. При этом биомасса растения почти не менялась, общее содержание ПАУ в растении снижалось, возрастала доля тяжелых полиаренов во всей сумме ПАУ растений.

В третьем диапазоне – области высоких доз бенз[а]пирена (30–40 нг/г) – наблюдался резкий рост РМС, сопряженный с резким увеличением содержания бенз[а]пирена в растении. Такое явление можно объяснить нарушением механизмов адаптации растений к стрессовому фактору. Рост частоты проявления РМС при загрязнении почвы бенз[а]пиреном в дозе 40 нг/г сопровождался снижением биомассы растения, что в дальнейшем могло привести к гибели *Tradescantia (clon 02)*. С уменьшением биомассы снижалось содержание ПАУ в растении. Доля тяжелых ПАУ во всей сумме ПАУ растений становилась более значимой. В целом реакция растений на загрязнение почвы бенз[а]пиреном подчинялась известной криволинейной зависимости, характерной для всех биологических систем, и хорошо согласовывалась с теорией стресса Селье [24]. Стрессовым фактором в данном случае являлось наличие в почве сильного токсиканта – бенз[а]пирена.

Таким образом, можно выделить 3 типа реакции *Tradescantia (clon 02)* на присутствие

бенз[а]пирена. Реакция на внешнем морфологическом уровне выражена в основном в виде возрастающей кривой, аналогичной кривой роста содержания бенз[а]пирена в растении. Реакция на уровне клетки (ГК) выражена кривой с пиком при дозе 20 нг/г, аналогично кривой изменения биомассы растения ($r = 0,90$ при $n = 6$, $P = 0,95$) – последствия ауксиноподобного действия бенз[а]пирена. На этих уровнях адаптация растений к высоким дозам бенз[а]пирена в почве не проявляется. Кривые частоты проявления РМС, БМС и УКД нелинейны, БМС и УКД полностью противоположны кривой проявления частоты РМС. Реакция растения в данном случае отстает, так как показатели БМС и УКД менее чувствительны, чем РМС. С другой стороны, повышение уровня УКД при снижении уровня РМС может быть объяснено явлением апоптоза клеток. Сходные результаты получены М. В. Аниськиной [23] для *Tradescantia (clon 02)*, выращенной на почве, загрязненной нефтью.

Одна из теорий, позволяющих объяснить токсическое влияние избыточных концентраций бенз[а]пирена, – учение о стрессе. Действие избыточных концентраций загрязнителей вызывает ответную реакцию растения в виде окислительного стресса. В результате стресса продукция активных форм кислорода (АКФ) в растительной клетке увеличивается в такой степени, что нарушаются защитные механизмы, вызывая феномен “окислительного взрыва”. В больших концентрациях АКФ вызывают различные окислительные изменения в клетке: повреждают нуклеиновые кислоты, белки, останавливают клеточный цикл, вызывают апоптозные изменения. АКФ инициируют реакции перекисного окисления липидов, приводящие к повреждению клеточных мембран. Растительные организмы обладают устойчивостью к окислительным повреждениям. Это обусловлено существованием в растительной клетке эффективной антиоксидантной системы, в которую входят антиоксидательные ферменты и органические антиоксиданты. Антиоксидантными свойствами обладают соединения, снижающие активность радикальных окислительных процессов, – глутатион, аскорбиновая кислота, токоферол, тироксин, стероиды, ферритины, каротиноиды, ретинол, полиамины, убихиноны [21, 24–26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований выявлена дозовая зависимость частоты проявления морфологических отклонений цветков и ВТН *Tradescantia (clon 02)*, уровня физиологических нарушений в клетках ВТН, частоты возникающих мутаций от различных доз внесенного бенз[а]пирена. Установлено, что бенз[а]пирен в исследуемых концентрациях отличался выраженным эффектом токсичности для растений. Отклик растений на различные дозы бенз[а]пирена был неоднородным и выражался в проявлении в большей мере тех или иных мутагенных, тератогенных и генотоксических эффектов. Частота проявления морфологических отклонений и МА у *Tradescantia (clon 02)* возрастала с ростом уровня загрязнения. Выявлено ауксиноподобное действие бенз[а]пирена на растения, выражающееся в росте биомассы корней и увеличении частоты проявления гигантских клеток в ВТН *Tradescantia (clon 02)* до уровня загрязнения почв бенз[а]пиреном 20 нг/г и их последующем уменьшении. Пик проявления БМС и УКД отмечался при дозах бенз[а]пирена 30 нг/г.

Наиболее чувствительным показателем реакции растений на стресс в виде внесенного в почву бенз[а]пирена была частота проявления РМС в волосках тычиночных нитей *Tradescantia (clon 02)*, которая отражала все этапы адаптации растения: первичный стресс, активную адаптацию, нарушение процессов адаптации с последующей гибелью организма.

Таким образом, полученные данные о влиянии бенз[а]пиренового загрязнения почв на частоту мутантных событий в волосках тычиночных нитей *Tradescantia (clon 02)* свидетельствовали о проявлении мутагенных свойств бенз[а]пирена, повышение уровня морфологических аномалий в волосках тычиночных нитей – о тератогенном действии, а увеличение частоты проявления угнетения клеточного деления – о его генотоксичности. Дозовая зависимость накопления ПАУ растением и частоты возникающих в нем мутации имела “классическую” форму S-образной кривой, отражающей разные этапы проявления адаптации. На морфологическом уровне адаптация растения не выражена, проявления адаптации наблюдаются для фи-

зиологических эффектов – белых мутантных событий и угнетения клеточного деления, на генетическом уровне проявляются все этапы адаптации растения, согласующиеся с теорией стресса Селье.

Нелинейность дозовой реакции на параметры токсической нагрузки бенз[а]пирена на систему придает объективный статус критическим показателям воздействия поллютантов и вводимым экологическим нормативам (ПДК). Если бы зависимость доза – эффект имела вид прямой линии или плавной кривой, то такого достоверного критерия не существовало бы, что потребовало бы поиска других подходов к нормированию различных поллютантов или их произвольному установлению. Анализ полученных кривых по дозовой зависимости, продуктивности, накоплению ПАУ в растениях и почвах, частоте возникающих мутаций, проявлению морфологических отклонений у цветков *Tradescantia (clon 02)*, от внесенного в почву бенз[а]пирена полностью подтверждает объективность существующих нормативов ПДК бенз[а]пирена в почве (20 нг/г), которые используются при решении задач экологического нормирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 07-04-00285).

ЛИТЕРАТУРА

1. Jian Y., Wang L., Peter P. F., Yu H. T. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list // *Mutat. Res.* 2004. Vol. 557. P. 99–108.
2. Ma T. H. *Tradescantia* stamen hair mutation bioassay // *Ibid.* 1994. Vol. 310, N 2. P. 211–218.
3. Grant W. F., Salamone M. F. Comparative mutagenicity of chemicals selected for test in the International Program on Chemical Safety collaborative study on plant systems for the detection of environmental mutagens // *Ibid.* 1994. Vol. 310, N 2. P. 156–162.
4. Погосян В. С., Симонян Е. Г., Джигарджян Э. М., Арутюнян Р. М., Погосян В. С. Оценка генотоксического действия антропогенных факторов на растения в городских условиях // *Цитология и генетика.* 1991. Т. 25, № 1. С. 23–29.
5. Евсеева Т. И., Зайнуллин В. Г. Исследование мутагенной активности атмосферного воздуха и снежного покрова г. Сыктывкара по тесту соматических мутаций в волосках тычиночных нитей традесканции (клон 02) // *Экология.* 2000. № 5. С. 343–348.
6. Schairer L. A., Van't Hof J., Hayes C. G., Barton R. M., de Serres F. J. Exploratory monitoring of air pollutants for mutagenic activity with the *Tradescantia*

- stamen hair system // Environ. Health. Persp. 1978. Vol. 27. P. 51–60.
7. Ichikawa S., Sparrow A. H., Thompson K. H. Morphologically abnormal cells, somatic mutations and loss of reproductive integrity in irradiated *Tradescantia* stamen hairs // Rad. Bot. 1969. N 9. P. 195–211.
 8. White A. P., Claxton L. D. Mutagens in contaminated soil: a review // Mutat. Res. 2004. Vol. 557. P. 227–345.
 9. Ichikawa S., Sparrow A. H. Influence of radiation exposure rate on somatic mutation frequency and loss of reproductive integrity in *Tradescantia* stamen hairs // Ibid. 1978. Vol. 52, N 2. P. 195–211.
 10. Nauman C. H., Schairer L. A., Sautkulis R. C., Klug E. E. Influence of hyperthermia on the spontaneous, radiation and chemical induced mutation frequency in *Tradescantia* stamen hairs // Rad. Bot. 1977. N 70. P. 632.
 11. Mericle L. W., Mericle R. P. Genetic nature of somatic mutations for flower color in *Tradescantia*, clone 02 // Ibid. 1967. N 7. P. 449–464.
 12. Underbrink A. G., Schaires L. A., Sparrow A. H. *Tradescantia* Stamen Hairs: A radiobiological test system applicable to chemical mutagenesis // Chemical mutagenesis: Principles and Methods for their detections. 1973. Vol. 3, N 4. P. 159–175.
 13. Dennis J. A. Somatic aberration induction un *Tradescantia* occidentals by neutrons, X- and gamma radiations. II Biological results, r. b. e. and o. e. r. // Int. J. Radiat. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med. 1976. Vol. 29, N 4. P. 323–342.
 14. Ma T. H., Kong M. S. Genotoxicity of contaminated soil and well water detected by plant bioassays // Environ. And Mol. Mutagenes. 1997. Vol. 29, N 28. P. 32.
 15. Евсеева Т. И., Гераськин С. А. Сочетанное действие факторов радиационной и нерадиационной природы на традесканцию. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 156 с.
 16. Ichikawa S., Takahashi C. S. Somatic mutation frequencies in stamen hairs of stable and mutable clones of *Tradescantia* after acute gamma-ray treatments with small doses // Mutat. Res. 1977. Vol. 9, N 3. P. 195–204.
 17. Осипова Р. Г., Шевченко В. А. Использование традесканции (клон 02 и 4430) в исследованиях по радиационному и химическому мутагенезу // Журн. общ. биологии. 1984. Т. 45, № 2. С. 226–332.
 18. Баскаков Ю. А., Шаповалов А. А. Регуляторы роста растений. М.: Знание, 1982. 64 с.
 19. Маштаков С. М., Деева В. П., Вольнец А. П. Физиологическое действие гербицидов на сорта культурных растений. Минск: Наука и техника, 1967. 194 с.
 20. Муромцев Г. С., Чкаников Д. И., Кулаева О. Н., Гамбург К. З. Основы химической регуляции роста и продуктивности растений. М.: Агропромиздат, 1987. 383 с.
 21. Скугорева С. Г., Огородникова С. Ю., Головки Т. К., Ашихмина Т. Я. Фитотоксичность фосфорорганических соединений и ртуты. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 154 с.
 22. Куценко С. А. Основы токсикологии. СПб.: Фолиант, 2002. 720 с.
 23. Аниськина М. В. Мутагенный и токсический эффекты у растений *Tradescantia* (клон 02) и *Arabidopsis thaliana* (L.) *heynh.*, индуцированные нефтью и нефтепродуктами: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2006. 24 с.
 24. Селье Г. Концепция роста. Новое о гормонах и механизмах их действия. Киев: Наук. думка, 1977. 22 с.
 25. Мерзляк М. Н. Активированный кислород и окислительные процессы в мембранах растительной клетки // Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. Физиология растений. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 6. С. 1–168.
 26. Минибаева Ф. В., Гордон Л. Х. Продукция супероксида и активность внеклеточной пероксидазы в растительных тканях при стрессе // Физиология растений. 2003. № 3. С. 459–464.

Genotoxic Effects in *Tradescantia* Plants (Clon 02) Induced by Benz(a)pyrene

E. V. YAKOVLEVA, V. A. BEZNOSIKOV, B. M. KONDRATENOK, A. A. KHOMICHENKO

*Institute of Biology Komi Science Center RAS
167982, Russia, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28
E-mail: kaleeva@ib.komisc.ru*

This work surveys the genetic toxicity of benz(a)pyrene added to soil for *Tradescantia* plants (clon 02). Different adaptation levels of *Tradescantia* (02) to soil pollution with benz(a)pyrene have been estimated. Plant adaptation was not observed at the morphological level, but found for the physiological and genetic (with every adaptation stage) levels. The products of benz(a)pyrene metabolism act as auxin on plants influencing the growth of root biomass and the cell size.

Keywords: benz(a)pyrene, pollution, genetic toxicity, soil, plants, adaptation.