

Влияние бенз[а]пиренового загрязнения на ростовые процессы и состав полиаренов растений

© 2015. Е. В. Яковлева, к.б.н., н.с., Д. Н. Габов, к.б.н., н.с.,
В. А. Безносиков, д.с-х.н., зав. лабораторией, Б. М. Кондратенко, к.х.н., зам. директора,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Загрязнение субстрата бенз[а]пиреном (БП) приводило к уменьшению всхожести семян ячменя обыкновенного. Выявлена тенденция к линейному снижению высоты и биомассы надземной части ячменя при повышении доз БП. Изменение биомассы корней нелинейно. Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии в растениях модельного эксперимента идентифицировано 14 структур полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). В растениях контрольного варианта обнаружены значительные количества легких полиаренов. Изменение содержания полиаренов в растениях при загрязнении субстрата было обусловлено дозами БП. Внесение загрязнителя в дозах 10–20 нг/г приводило к повышению содержания полиаренов в растениях. При дозе 30 нг/г включались механизмы разложения полиаренов, отмечали снижение содержания ПАУ. Более высокие дозы нарушали защитные механизмы растений, как следствие, происходило повышение содержания полиаренов в растениях на фоне резкого снижения их биомассы. Наибольшее содержание лёгких полиаренов характерно для надземной части растения, тяжёлые полиарены концентрировались в корнях.

The purpose of the present work was accessing the influence of benz[a]pyrene added into substrate on composition of polyarenes in plant and on growth and development of common barley (*Hordeum vulgare*) in in vitro conditions. We found that contamination of substrate with benz[a]pyrene (BP) decreased seed germination of *Hordeum vulgare* L. Larger BP doses produced the trend for a linear decrease in height and biomass of the aboveground part of *Hordeum vulgare*. The change of root biomass is not linear. Using the method of highly-efficient liquid chromatography, we identified 14 structures of polyaromatic hydrocarbons (PAHs). Significant amounts of light polyarenes were found in the control plants. Concentration of polyarenes in the plants grown on polluted substrate varied depending on benz[a]pyrene doses. The pollutant in doses of 10–20 ng/g increased content of polyarenes in the plants. The dose of 30 ng/g started the mechanisms of polyarene decomposition and so concentration decreased. Higher doses disturbed the protection mechanisms of plants and so increased content of polyarenes in plants and decreased biomass. Light polyarenes preferably accumulated in aboveground plant part whereby heavy polyarenes – in roots.

Ключевые слова: растения, биомасса, бенз[а]пирен, загрязнение, полициклические ароматические углеводороды, синтез, накопление

Keywords: plants, biomass, benz[a]pyrene, pollution, polycyclic aromatic hydrocarbons, synthesis, accumulation

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – соединения, проявляющие по отношению к живым организмам канцерогенные, мутагенные, токсичные свойства. В качестве показателя присутствия канцерогенных ПАУ в природных объектах чаще всего определяют незамещённый индивидуальный углеводород – бенз[а]пирен (БП) [1]. Этот углеводород – очень сильный канцероген первого класса опасности, относится к самым опасным мутагенам. В России обязательному контролю в почве подлежит лишь БП. Предельно допустимая концентрация (ПДК) БП для почвы – 20 нг/г (ГН 2.1.7.2041-06), для растений ПДК по ПАУ не установлены. Генотоксические канцерогены не имеют порогового уровня,

то есть их присутствие в любом определяемом количестве опасно для живого организма.

Сведения о загрязнении почвы БП приводят к необходимости оценить вероятность поглощения БП растениями и исследовать реакцию растительного организма на его воздействие, что позволит в перспективе использовать растения как индикаторы загрязнения среды ПАУ [2].

Данные литературы позволяют констатировать, что растительные организмы могут поглощать, накапливать и синтезировать ПАУ. У высших растений и водорослей, наряду со способностью к внутриклеточному расщеплению ПАУ, в большинстве случаев наблюдается тенденция к аккумуляции углеводородов из среды обитания [3, 4]. Доказано, что после усвоения органические соединения могут

перемещаться из корней в другие органы растений и впоследствии подвергаться частично или полному разрушению или трансформироваться в менее токсичные соединения и связываться в тканях растений. Органические вещества депонируются в вакуолях клеток или связываются с нерастворимыми соединениями, такими как лигнин [5].

В литературе имеются данные о способности растений синтезировать ПАУ. Лабораторно подтверждено образование фенантрена из стеролов (холестерол) в результате деструкции алифатических структур. Стероидные структуры, содержащие гидроксильную группу, являются типичными составляющими липидов высших растений. Показана возможность образования хризена в растениях. Хризен в растениях может быть продуктом превращения пентациклических тритерпеноидов с шестичленным E-кольцом, являющихся основными компонентами воска высших растений [2, 6]. При прорастании семян фасоли, гороха, укропа, шпината, люпина, ржи и овса на растворах, в состав которых входит углеродсодержащий субстрат (с меченым углеродом), обнаружен синтез БП [5].

Поведение поллютантов в системе почва–растение складывается из ряда процессов: поглощение корнями растений, ремиссия, миграция (выщелачивание) и деградация в почве. Так, по концептуальной модели зарубежных авторов, поглощение поллютантов корнями растений из почвы представляется как функция растворимости веществ в воде, содержания органического вещества и вида растения [7]. Детальный анализ процесса накопления стойких органических соединений растениями позволил предположить, что коэффициенты накопления (отношение содержания вещества в корнях к его содержанию в почве) являются нелинейной функцией содержания их в почвах, что объясняется, в случае невысоких концентраций, сорбцией их почвой, при высокой – угнетающим действием на растения.

Важный показатель для установления связи между почвой и растениями – растворимость бенз[а]пирена в воде и его способность к переходу из разных субстратов в воду. Исследования показали, что из песка в водные вытяжки бенз[а]пирен переходит в количествах, значительно превышающих его растворимость. Увеличение концентрации бенз[а]пирена, вносимого в песок, приводит к повышению его содержания в органах пшеницы. На суглинистых почвах аккумуляция ПАУ в растениях меньше, чем на супесчаных, что

связано с повышенной сорбционной способностью почв, сформированных на суглинистых породах [5].

Цель работы – определить влияние БП, внесённого в субстрат, на состав полиаренов в растении и оценить его воздействие на рост и развитие ячменя обыкновенного в условиях модельного эксперимента.

Объекты и методы исследования

В модельном эксперименте использовали ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare L.*) сорта Новичок. Сорт Новичок создан методом индивидуального отбора из сложной гибридной популяции второго поколения Адам×Дуэт. Тип куста промежуточный. Окраска листа от зелёной до тёмно-зелёной. Ушки серповидные, окрашены. Стеблевые узлы антоциановые. Средняя высота растения 71 см. Колос двурядный. Отличительная черта сорта – высокая общая и продуктивная кустистость. Продолжительность вегетационного периода около 70 дней [8].

Эксперимент проведён на песчаной культуре в контролируемых условиях. В качестве субстрата использовался предварительно прокалённый боровой песок. Прокаливание проводили в муфельной печи при температуре 700 °С. Повторность в опыте девятикратная. Субстрат набивали в стеклянные сосуды, масса песчаного субстрата в каждом сосуде составляла 700 г. В сосудах устанавливали дренаж. В сосуды в водном растворе вносили питательную смесь солей следующего состава в расчёте на 1 кг песка: NH_4NO_3 – 0,334 г; KNO_3 – 0,166 г; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – 0,70 г; $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – 0,25 г; KCl – 0,614 г; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,50 г; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,50 г (смесь Д. Н. Прянишникова). Данная питательная смесь считается наилучшей для пшеницы, ячменя, гречихи и ряда других культур. БП вносили в дозах: 10, 20, 30 и 40 нг/г субстрата. Контрольный вариант – без внесения БП. Содержание полиаренов в исходном песчаном субстрате было меньше нижней границы диапазона определяемого содержания. БП в субстрат вносили в виде водного раствора соответствующей концентрации, приготовленного из сухого вещества, предварительно растворённого в ацетонитриле. В загрязнённый субстрат высаживали предварительно пророщенные в течение 5 суток семена ячменя обыкновенного, по 7 семян на повторность. Полив проводили регулярно дистиллированной водой. Эксперимент проводили в теплице Института

биологии Коми НЦ УрО РАН в течение месяца. Учёт количества всходов проводили на пятый день опыта. Перед окончанием опыта измеряли высоту надземной части растений, затем растения извлекали из субстрата. Учёт сырой биомассы проводили отдельно для корней и надземной части.

По окончании эксперимента проведён химический анализ растений на содержание ПАУ. В основу определения ПАУ в растениях положена методика выделения углеводородных компонентов из растений [9]. Качественное и количественное определение содержания ПАУ в песке осуществляли методом обращённо-фазовой ВЭЖХ в градиентном режиме и спектрофлуориметрическим детектированием на хроматографе «Люмахром» («Люмэкс», Россия).

Статистическую обработку для оценки достоверности расхождений средних данных проводили при помощи t-критерия Стьюдента, для $P = 0,95$.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ результатов опыта показал, что внесение БП в субстрат оказывает значительное влияние на ростовые процессы растений. Загрязнение субстрата БП в разных дозах приводило к уменьшению всхожести семян, оказывало значительное влияние на интенсивность роста и биомассу ячменя обыкновенного.

Максимальная всхожесть ячменя (98%) отмечена в контрольном варианте. При загрязнении субстрата БП в малых дозах (10 и 20 нг/г) всхожесть резко снижалась до 60%. БП сильный экотоксикант, который оказывает негативное влияние на рост растений при низких дозах. Полученные нами результаты придают объективный статус критическим показателям воздействия поллютантов и вводимым экологическим нормативам (ПДК). Более высокие дозы загрязнителя 30, 40 нг/г приводили к снижению уровня всхожести до 80–85%. Возможно, повышение всхожести связано с явлением, когда БП оседает на поверхности семян, в связи с чем ограничивается число участков, в которых происходит его поглощение [5].

Зависимость роста ячменя от доз БП носила линейный характер (рис. 1). Средняя высота растений закономерно снижалась с повышением доз БП, внесённого в субстрат. Согласно [4], содержание ПАУ 3 г/кг почвы вызывало угнетение роста растений. В нашей

работе угнетение роста растений выявлено уже при более низких содержаниях полиаренов. Ингибирование роста растений во многом вызвано токсичным действием БП.

Следует отметить, что в ходе опыта был выявлен большой разброс данных по высоте растений (рис. 2). Однако в целом для контрольного варианта свойственно наличие большего числа высокорослых растений, чем для других вариантов опыта. При дозе БП 40 нг/г растений, высотой более 40 см не отмечено, преобладали растения высотой в диапазоне 10–30 см, 10% растений имели высоту менее 10 см.

Загрязнение субстрата БП приводило к снижению биомассы как всего растения в целом, так и его отдельных органов (рис. 3), по сравнению с контрольным вариантом. По-

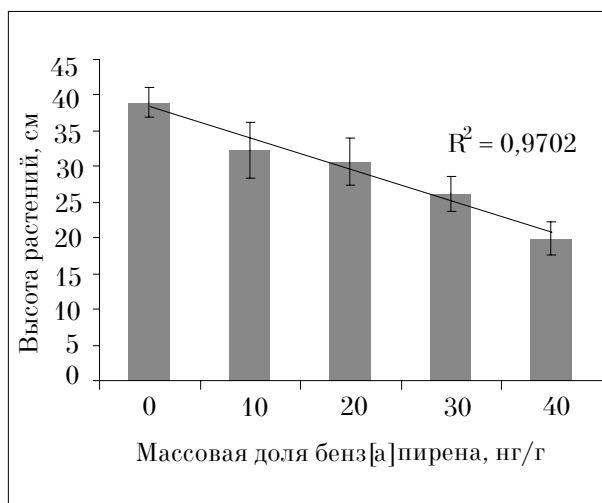


Рис. 1. Зависимость высоты растений от уровня загрязнения субстрата бенз[а]пиреном, см

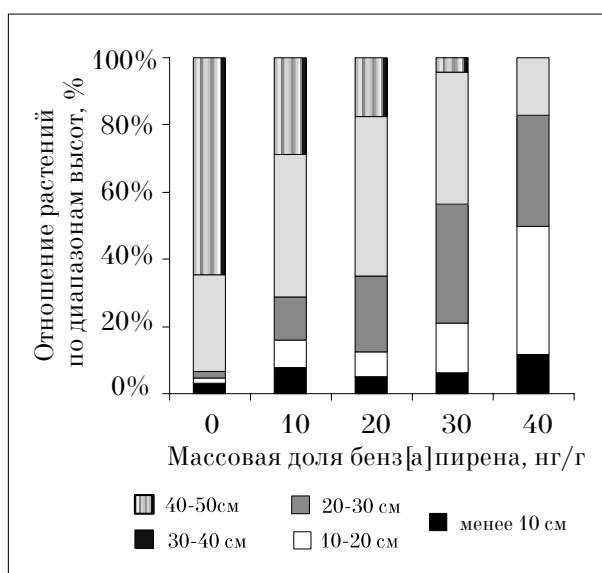


Рис. 2. Диапазоны варьирования высоты растений при загрязнении субстрата бенз[а]пиреном, %

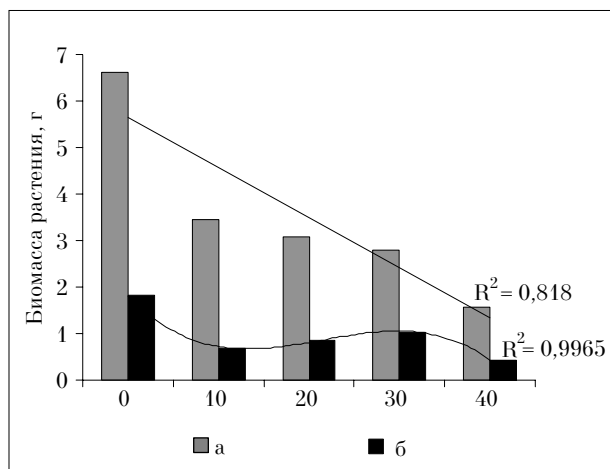


Рис. 3. Зависимость биомассы растения от степени загрязнения субстрата бенз[а]пиреном, где а – биомасса надземной части, б – биомасса корней.

лученные нами данные согласуются с исследованиями, проведёнными для трёх видов растений: кукуруза, рожь и белый клевер на почвах, загрязнённых фенантреном и пиреном [10].

Следует отметить, что биомасса надземной части ячменя при загрязнении снижалась линейно, корней – подчинялась нелинейной зависимости с максимальным значением при дозах 20–30 нг/г БП в субстрате. Наиболее резкое и статистически значимое снижение биомассы выявлено при дозах 10 и 40 нг/г БП в субстрате. При загрязнении субстрата в минимальной дозе растение реагирует на стресс общим снижением биомассы. Дальнейшее увеличение доз БП ведёт к росту корневой системы.

Возможно, такое изменение биомассы корней связано с функциональной ролью БП в растении. БП после карбоксилирования в растении мог проявлять ауксиновое действие, или интенсифицировать процессы образования ауксина в надземной части растения. Ауксин даже в микроколичествах регулирует рост растений. Основное действие ауксина направлено на стимулирование роста корневой системы, которое мы и наблюдали в ходе опыта. Аналогичная реакция на загрязнение почвы БП была получена для корней *Allium sera* [5]. Дальнейшее повышение содержания ауксина вызывает торможение роста. Это может быть связано с тем, что ауксин стимулирует синтез другого фитогормона – этилена, ингибирующего рост растений. Данные, полученные в опыте, тесно согласуются с ранее проведёнными исследованиями по выращиванию *Tradescantia* (clon 02) на почве, загрязнённой БП [11].

Состав ПАУ в ячмене обыкновенном в конце эксперимента был представлен 14 соединениями: нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз[а]-антрацен, хризен, бенз[б]флуорантен, бенз[к]-флуорантен, БП, дибенз[а, h]антрацен, бенз[ghi]-перилен. Следует отметить, что в растениях контрольного варианта присутствовали все вышеперечисленные ПАУ за исключением бенз[ghi]-перилена (рис. 4). Полученные данные свидетельствуют о синтезе ПАУ в растениях, которые представлены, главным образом, лёгкими полиаренами, из них 92 % приходится на флуорен, фенантрен и нафталин. Физиологически активные соединения (витамины, гормоны и др.) в растениях имеют в структуре молекулы 2-3-ядерные структуры нафталинового и фенантренового типа. Повышенное содержание лёгких полиаренов в растениях показано и другими исследователями [12].

При загрязнении субстрата 10–20 нг/г общее содержание ПАУ в растении возрастало в 2 раза (рис. 5), наибольшие кратности превышения контрольных значений наблюдали для БП 6-7 раз и нафталина 3–6 раз.

При повышении уровня загрязнения до 30 нг/г происходит резкое снижение содержания ПАУ в растениях, при этом снижение биомассы растений незначительно. Возможно, такое изменение в содержании ПАУ обусловлено включением защитных механизмов

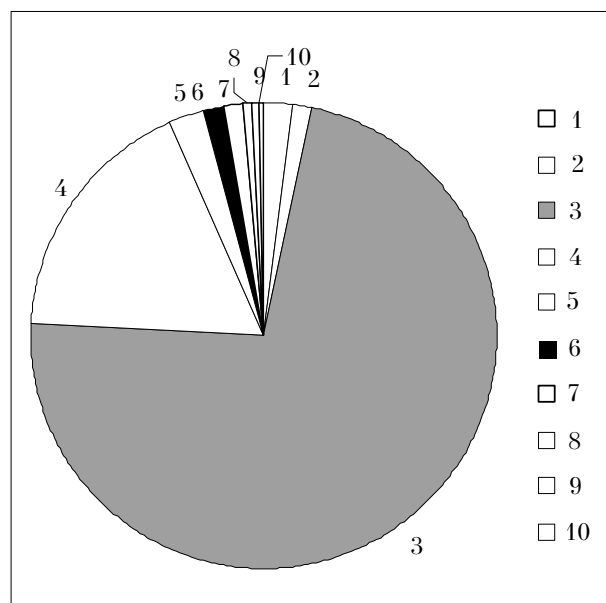


Рис. 4. Массовая доля ПАУ в растениях контрольного варианта: 1 – нафталин, 2 – аценафтен, 3 – флуорен, 4 – фенантрен, 5 – антрацен, 6 – флуорантен, 7 – пирен, 8 – бенз[а]антрацен, 9 – хризен, 10 – сумма тяжелых ПАУ, %

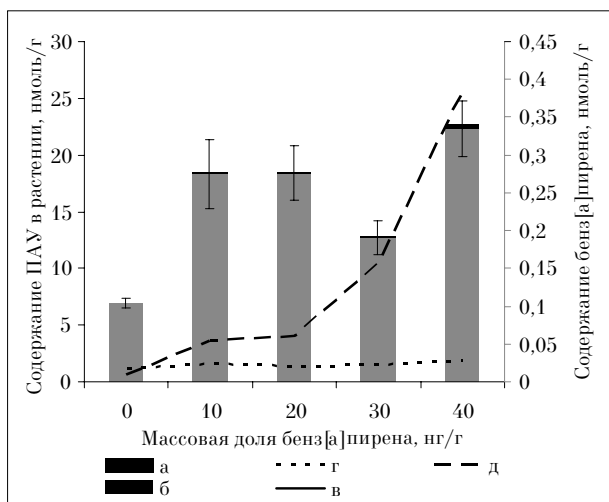


Рис. 5. Содержание ПАУ в растениях, где а – содержание тяжелых ПАУ, б – содержание легких ПАУ, в – содержание флуорена, г – содержание фенантрена, д – содержание бенз[а]пирена, нмоль/г

в растении, ведущих к разрушению полиаренов. ПАУ в растении подвергаются трансформации путём гидроксилирования и дальнейшего образования дигидроксопроизводных и дикарбоновых кислот. В ходе первой фазы окислительно-восстановительного или гидролитического превращения молекула вещества обогащается полярными функциональными группами, что делает её реакционноспособной и более растворимой в воде. Во второй фазе происходят синтетические процессы конъюгации промежуточных продуктов метаболизма с эндогенными молекулами (глицин, глутатитон, глюкоза и др.), в результате чего образуются полярные соединения, которые выводятся из организма с помощью специальных механизмов экскреции. При наивысшей концентрации 40 нг/г происходит нарушение механизмов репарации, проявляющееся в резком снижении биомассы надземных и подземных органов и повышении содержания полиаренов в растении. Одна из теорий, позволяющая объяснить токсическое влияние избыточного содержания БП, – учение о стрессе. Действие избыточного содержания загрязнителей вызывает ответную реакцию растения в виде окислительного стресса. В результате стресса резко увеличивается продукция активных форм кислорода (АКФ) в растительной клетке в такой степени, что преодолеваются защитные механизмы, вызывая феномен «окислительного взрыва». В больших концентрациях АКФ вызывают различные окислительные изменения в клетке: повреждают нуклеино-

вые кислоты, белки, останавливают клеточный цикл, вызывают апоптозные изменения. АКФ инициируют реакции перекисного окисления липидов, приводящие к повреждению цитоплазматических мембран. Растительные организмы обладают устойчивостью к окислительным повреждениям. Это обусловлено существованием в растительной клетке эффективной антиоксидантной системы, в которую входят антиокислительные ферменты и органические антиоксиданты. Антиоксидантными свойствами обладают соединения, снижающие активность радикальных окислительных процессов, – глутатион, аскорбиновая кислота, токоферол, тироксин, стероиды, ферритины, каротиноиды, ретинол, полиамины, убихиноны [11].

Такой характер изменений содержания отмечается для большинства ПАУ: аценафтена, флуорена, флуорантена, пирена, бенз[а]антрацена, хризена, бенз[б]флуорантена. Содержание фенантрена и антрацена практически не изменяется в зависимости от доз БП и остаётся на уровне контрольных значений. Фенантрен – компонент преимущественно природного происхождения. Этот факт был отмечен рядом авторов [2, 6, 11]. Лабораторно подтверждено образование фенантрена из стеролов (холестерол) в результате деструкции алифатических структур. Стероидные структуры, содержащие гидроксильную группу, являются типичными составляющими липидов высших растений. В растениях присутствуют такие производные фенантрена, как абиетиновая и левопимаровая кислоты. Известно, что фенантрен может образоваться из абиетиновой кислоты, которая находится в смоле хвойных деревьев. Известна схема образования фенантрена из абиетиновой кислоты, которая включает последовательную ароматизацию нафтеновых колец и потерю метильных заместителей, конечным продуктом которой является фенантрен [2]. Вероятно, накопление фенантрена и антрацена растениями связано не с поглощением из субстрата, а с внутриклеточным синтезом в растениях.

Следует отметить, что аценафтен, флуорен и бенз[б]флуорантен не были обнаружены в субстрате в конце проведения эксперимента, что также позволяет говорить об их образовании в процессе жизнедеятельности растений.

Повышение доз БП, внесённого в субстрат, приводило к экспоненциальному росту содержания БП в растениях. Кратности превышения массовой доли БП в растениях над контрольными значениями составляли от 6 до

43 раз при дозах 10 и 40 нг/г соответственно. Повышенное содержание БП в растениях приводило к ингибированию роста растений, которое мы наблюдали в ходе эксперимента.

Таким образом, накопление ПАУ в растениях связано с рядом процессов: накоплением полиаренов из субстрата, процессами разрушения ПАУ в растениях при повышенных дозах БП и внутриклеточным синтезом ПАУ.

Исследования содержания полиаренов в различных органах растений показывают, что трансформация состава ПАУ растений в целом обусловлена изменением содержания полиаренов в наземной части растения за счёт её большей биомассы (рис. 6). Закономерности колебания содержания полиаренов в корневой системе несколько отличны. Снижение содержания полиаренов в корнях наблюдается уже при дозах БП 20 нг/г субстрата, что свидетельствует о более раннем включении защитных механизмов. Такое явление можно объяснить более высоким содержанием БП в корневой системе по сравнению с наземной частью.

С ростом уровня загрязнения субстрата в общей сумме ПАУ в корнях линейно увеличивается доля тяжёлых ПАУ, в основном за счёт БП и в меньшей степени бенз[к]флуорантена. Эти соединения активно поглощались растениями из субстрата. Доля БП при максимальном уровне загрязнения достигает 14% от общей суммы ПАУ в корнях. Содержание тяжёлых ПАУ и БП в наземной части растений изменяется аналогичным обра-

зом, однако их доля составляет не более 1% от общей суммы полиаренов в наземной части. В целом содержание ПАУ в наземной части растений было выше, чем в корневой системе. Превышение происходило за счёт лёгких полиаренов, в основном флуорена, фенантрена и антрацена – соединений, синтезирующихся в самом растении.

Заключение

Проведён эксперимент по выращиванию ячменя обыкновенного (*Hordeum vulgare* L.) сорта Новичок на субстрате, загрязнённом БП. Выявлено, что загрязнение субстрата БП приводило к уменьшению всхожести семян ячменя обыкновенного: при малых дозах до 60%, при более высоких – 80%. Средняя высота растений закономерно снижалась с повышением доз БП, внесённого в субстрат. Изменение биомассы наземной части ячменя обыкновенного при загрязнении БП подчинялось линейной зависимости, корней – нелинейной с максимальным значением при дозах 20–30 нг/г БП в субстрате; что может быть обусловлено ауксиновым действием БП на растения. В растениях модельного эксперимента идентифицировано 14 структур ПАУ: нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз[а]антрацен, хризен, бенз[к]флуорантен, БП, дибенз[а, h]антрацен, бенз[ghi]перилен. В растениях контрольного варианта было обнаружено 13 ПАУ, 99% из которых составляют лёгкие структуры. Наличие полиаренов в растениях контрольного варианта свидетельствует о внутриклеточном синтезе ПАУ. Изменение содержания ПАУ в растениях при разных дозах БП обусловлено реакцией растения на стрессирующее действие БП. Внесение загрязнителя в дозах 10–20 нг/г ведёт к повышению содержания полиаренов в растениях. При дозе 30 нг/г включаются механизмы разложения полиаренов, что приводит к снижению содержания ПАУ. Более высокие дозы нарушают защитные механизмы растений и ведут к повышению содержания полиаренов в растениях на фоне резкого снижения их биомассы. Содержание полиаренов в наземной части растений превышало их содержание в корнях за счёт лёгких полиаренов. Накопление лёгких ПАУ растениями обусловлено в основном их образованием в процессе жизнедеятельности растения, тяжёлые ПАУ накапливаются растениями из субстрата. Повышение содержания БП в корневой системе приводит к более

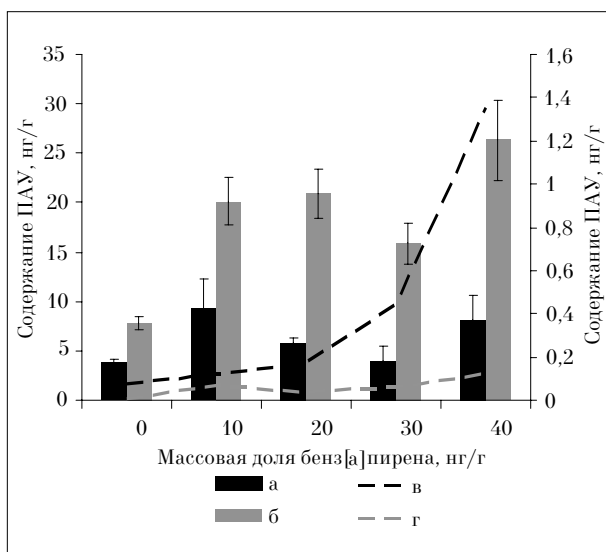


Рис. 6. Содержание ПАУ в органах растения, где а – содержание лёгких ПАУ в корнях, б – содержание лёгких ПАУ в наземной части, в – содержание тяжёлых ПАУ в корнях, г – содержание тяжёлых ПАУ в наземной части, нмоль/г.

ранней реакции корней на стрессовое воздействие и снижению накопления ПАУ в растении уже при дозах 20 нг/г БП.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта научных проектов молодых учёных и аспирантов УрО РАН № 14-4-НП-51, РФФИ № 14-04-31303 мол_а, и проекта УрО РАН № 12-У-4-1003, а также при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 15-2-4-5 (№ гос. рег. 115082010009).

Литература

1. Геннадиев А. Н., Пиковский Ю. И., Флоровская В. Н., Алексеева Т. А., Козин И. С., Оглоблина А. И., Раменская М. Е., Теплицкая Т. А., Шурубор Е. И. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах. М.: Изд-во МГУ. 1996. 196 с.
2. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеопиздат, 1988. 224 с.
3. Gao Y.-Z., Zhu L.-Z. Phytoremediation for phenanthrene and pyrene contaminated soil // J. Environ. Sci. 2005. V. 17. № 1. P. 14–18.
4. Huang X.-D., El-Alawi Y., Penrose D.M., Glick B.R., Greenberg B.M. A multi-process phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils // Environmental Pollution. 2004. V. 130. P. 465–476.
5. Растения и химические канцерогены / Под.ред. Э.И. Слепяна. Л: Наука, 1979. 208 с.
6. Яковлева Е.В., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Габов Д.Н. Закономерности биоаккумуляции полициклических ароматических углеводородов в системе почва-растения биоценозов северной тайги // Почвоведение. 2012. № 3. С. 356–367.
7. Simonich S. L., Hites R. A. Organic pollutant accumulation in vegetation // Environ. Sci. and Tecnology. 1995. V. 29. № 12. P. 2905–2914.
8. Головки Т.К., Родина Н.А., Куренкова С.В., Табаленкова Г.Н. Ячмень на Севере (селекционно-генетические и физиолого-биохимические основы продуктивности). Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 154 с.
9. Яковлева Е.В., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Габов Д.Н. Биоаккумуляция полициклических ароматических углеводородов в системе почва – растение // Агрохимия. 2008. № 9. С. 66–74.
10. Xu S.Y., Chen Y.X., Wu W.X., Wang K.X., Lin Q., Liang X.Q. Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation // Science of the Total Environment. 2006. V. 369. P. 206–215.
11. Яковлева Е.В., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Хомиченко А.А. Генотоксические эффекты в растениях Tradescantia (clon 02) индуцированные бенз[а]-пиреном // Сибирский экологический журнал. 2011. № 6. С. 805–812.
12. Meudec A., Dussauze J., Deslandes E., Poupart N. Evidence for bioaccumulation of PAHs within internal shoot tissues by a halophytic plant artificially exposed to petroleum-polluted sediments // Chemosphere. 2006. V. 65. P. 73–79.