

# Полиароматические углеводороды

## (ПАУ)

Полициклические ароматические, или полиароматические углеводороды (ПАУ) представляют собой обширную группу ароматических соединений углеводородной природы, построенных из двух и более шестичленных бензольных циклов. Наиболее типичные представители этой группы представлены на рисунке.

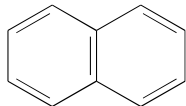
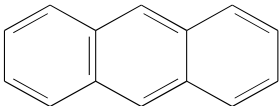
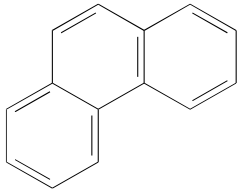
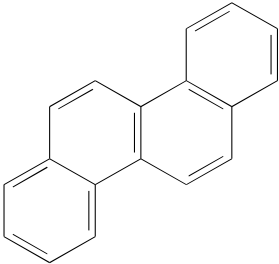
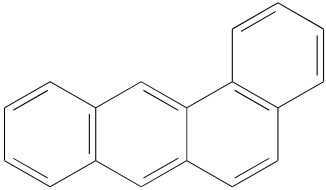
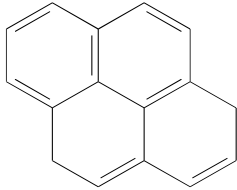
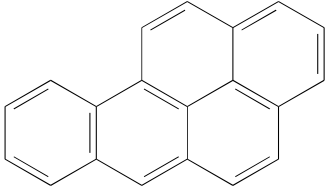
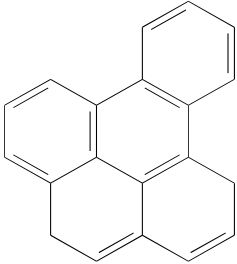
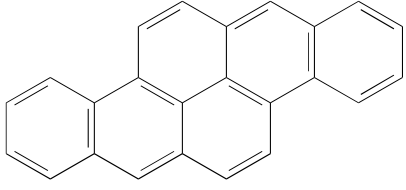
 Нафталин	 Антрацен	 Фенантрен
 Хризен	 Бензантрацен	 Пирен
 Бенз(а)пирен	 Бенз(е)пирен	 Дибенз(а,1)пирен

Рисунок 1. Структурные формулы некоторых ПАУ.

Очевидно, что ПАУ по разнообразию строения молекул значительно уступают и микотоксинам ([МКТ](#)) и стойким

органическим загрязнителям (**СОЗ**).

Наряду с этим ПАУ в своей массе высоко липофильные вещества со значениями  $\text{Log } P_{ow} > 3$  и обладают способностью к биоаккумуляции и биомагнификации, т. е. ПАУ, которые не подверглись метаболическим превращениям из-за перегрузки системы детоксикации печени могут накапливаться в жировых депо, оказывать длительное токсическое воздействие на организм и подниматься вверх по пищевым цепям. Человек, хищные млекопитающие и птицы находятся на их вершинах.

При загрязнении кормов ПАУ они способны инициировать опухолевые процессы. Конечно трудно предположить, что у бройлеров или поросят разовьются злокачественные новообразования за срок их выращивания, но у несушек и в родительском стаде птицы и других животных, особенно в мясном и молочном секторах, вероятность таких процессов возрастает параллельно степени загрязнения кормов этими опасными соединениями и длительностью их поедания.

Но даже, если исключить вероятность возникновения злокачественных новообразований у обитателей животноводческой фермы, нельзя не учитывать другие отрицательные последствия загрязнения кормов ПАУ, которые выражаются в снижении аппетита и продуктивности, ухудшении конверсии корма и приводят к нарушениям в работе пищеварительной, иммунной и эндокринной систем. Кроме того, многие ПАУ обладают мутагенным и тератогенным действием, что может отрицательно сказываться на качестве и жизнеспособности потомства.

ПАУ повсеместно распространены в окружающей среде, поскольку образуются во всех процессах низкотемпературного горения или термического разложения органических материалов, особенно их много в продуктах неполного сгорания. Дым и копоть состоят из частиц, содержащих ПАУ в высоких концентрациях. Среди основных источников ПАУ называют выхлопные газы автотранспорта, получение кокса из каменного угля, металлургические процессы, природные и антропогенные пожары, горение каменного угля, древесины, табака, нефти и нефтепродуктов, функционирование тепловых электростанций, мусоросжигательных заводов и др. В больших

количества ПАУ образуются при некоторых способах тепловой обработки пищи (гриль, барбекю, жарка), а также при копчении продуктов в домашних и промышленных условиях. Все эти источники приводят к тому, что ежегодное поступление ПАУ в ландшафты мира исчисляется десятками тысяч тонн, и по данным экологического мониторинга мы проживаем в условиях, когда нормы содержания бенз(а)пирена (индикаторный ПАУ) превышены во много раз. В среднем, уровень загрязнения воздуха в городах выше ПДК в 5—12 раз, в почвах — в 3-7 раз, в продуктах питания — от 1,5 до 11 раз.

В постановлении Комиссии ЕС №208/2005 от 04.02.05 принято решение о том, что бенз(а)пирен можно использовать как показатель наличия в пищевых продуктах других канцерогенных ПАУ, таких как бенз(а)антрацен, бенз(в)флуорантен, бенз(j)флуорантен, бенз(k)флуорантен, бенз(g,h,i)перилен, хризен, циклопента(c,d)пирен, дибенз(a,i)пирен, дибенз(a,l)пирен, индено(1,2,3-c,d)пирен и 5-метилхризен. В будущем Комиссией ЕС предполагается накопление экспериментальных данных о содержании и соотношении ПАУ в пищевых продуктах с тем, чтобы рассмотреть вопрос корректности выбора бенз(а)пирена как показателя наличия канцерогенных ПАУ.

Количество бенз(а)пирена в городской атмосфере можно проиллюстрировать на простом примере. Известно, что выхлопные газы автомобильного двигателя внутреннего сгорания кроме всего прочего содержат от 10 до 20 мкг бенз(а)пирена на 1 м<sup>3</sup>. Для расчётов возьмём самый массовый бензиновый двигатель объёмом 1,6 л. Простая калькуляция показывает, что только за 1 час работы при 3000 об/мин такой двигатель выбрасывает в атмосферу около 5 мг этого канцерогена. Жители крупных городов за год вдыхают такое же количество бензпирена, как и курильщик, который выкуривает в день 50 сигарет.

Ещё одним источником ПАУ, связанным с автомобилем, является пара шины-асфальт. В состав резины, из которой производятся шины в обязательном порядке включается сажа (технический углерод), содержащая ПАУ в высоких концентрациях. В состав асфальта входит от 5% до 10% нефтяного битума, в котором содержание ПАУ может достигать

2-5%. При взаимодействии шин с асфальтом, особенно на большой скорости движения, происходит их взаимное истирание. Образуется мелкая пыль, содержащая ПАУ, которая может переноситься ветром на большие расстояния.

По этим причинам животноводческие комплексы, которые находятся вблизи оживлённых транспортных магистралей подвергаются дополнительному риску. В качестве ещё одного значительного источника ПАУ можно рассматривать аэродромы и аэропорты. В их окрестностях почвы и растения содержат ПАУ в повышенных концентрациях. Это обстоятельство следует учитывать при размещении сельскохозяйственных предприятий в таких местах.

В доисторические времена основными источниками ПАУ были природные пожары и извержения вулканов. В те времена, вероятно, загрязнение окружающей среды ПАУ не шло ни в какое сравнение с современным, но всё же животные постоянно сталкивались с этими веществами и они — «старые знакомые» для системы метаболизма ксенобиотиков печени теплокровных.

Метаболизм ПАУ в печени хорошо изучен и проходит по так называемому эпоксид-диольному пути, который упрощённо выглядит следующим образом. На первой стадии монооксигеназы системы цитохрома Р-450 окисляют одну из связей в молекуле ПАУ с образованием эпоксида. На второй стадии эпоксиды или изомеризуются в фенолы, или гидролизуются ферментом эпоксидгидролазой до соответствующего дигидродиола. На третьей — дигидродиолы и фенолы конъюгируются с помощью трансфераз с полярными молекулами. Полученные конъюгаты лучше растворяются в воде, чем исходная молекула ПАУ и через почки выводятся из организма с мочой.

Но на этом, проверенном миллионами лет, пути детоксикации иногда случаются сюрпризы. Связаны они с тем, что молекулы некоторых ПАУ, например бенз(а)пирена, дибенантрацена, хризена (и ещё около 15 прочих) содержат выступающую часть одного из бензольных циклов и содержат впадину, т. н. «Bay-region». Окисление латерального бензольного цикла возле этой области проходит не один, а два раза и

образуется весьма реакционно-способные соединения — диол-эпоксиды. Эти продукты, как считают, приводят к нарушениям в структуре ДНК и обуславливают канцерогенные свойства некоторых ПАУ. Среди них одно из ведущих мест занимает 3,4-бензпирен, или бенз(а)пирен.

Поэтому при оценке качества кормов для животных кроме МКТ и СОЗ в них необходимо строго контролировать содержание бенз(а)пирена (индикаторный ПАУ) и в случаях его наличия в опасных концентрациях применять эффективные адсорбенты для его нейтрализации.

Для иллюстрации наличия ПАУ в кормах и их переноса в продукты животноводства можно привести данные о содержании некоторых из них в почве пастбища, траве и в одном из важнейших продуктов животноводства — в коровьем молоке.

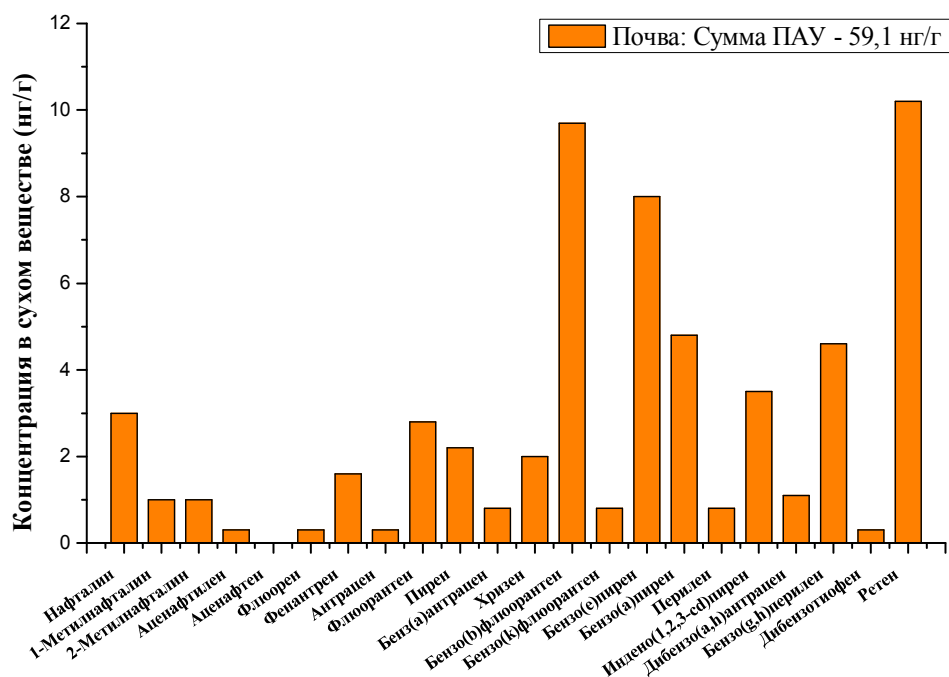


Рисунок 2. Концентрация ПАУ почве пастбища в молочном хозяйстве.

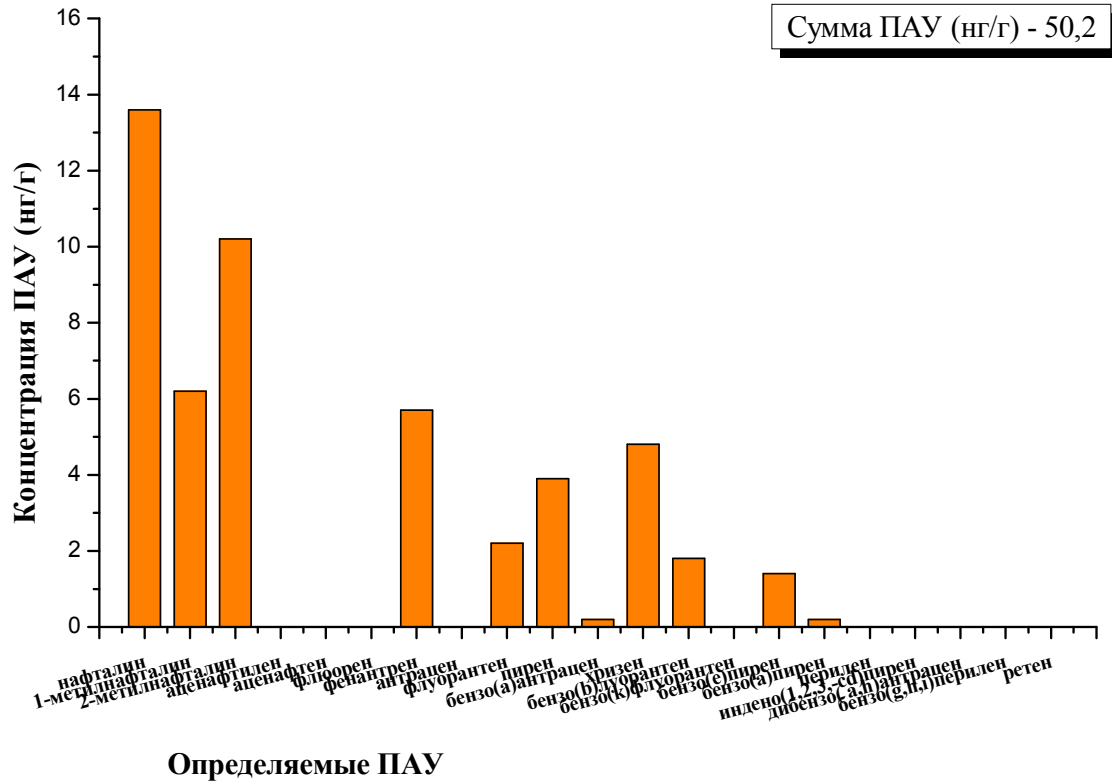


Рисунок 3. Концентрация ПАУ траве пастбища в молочном хозяйстве

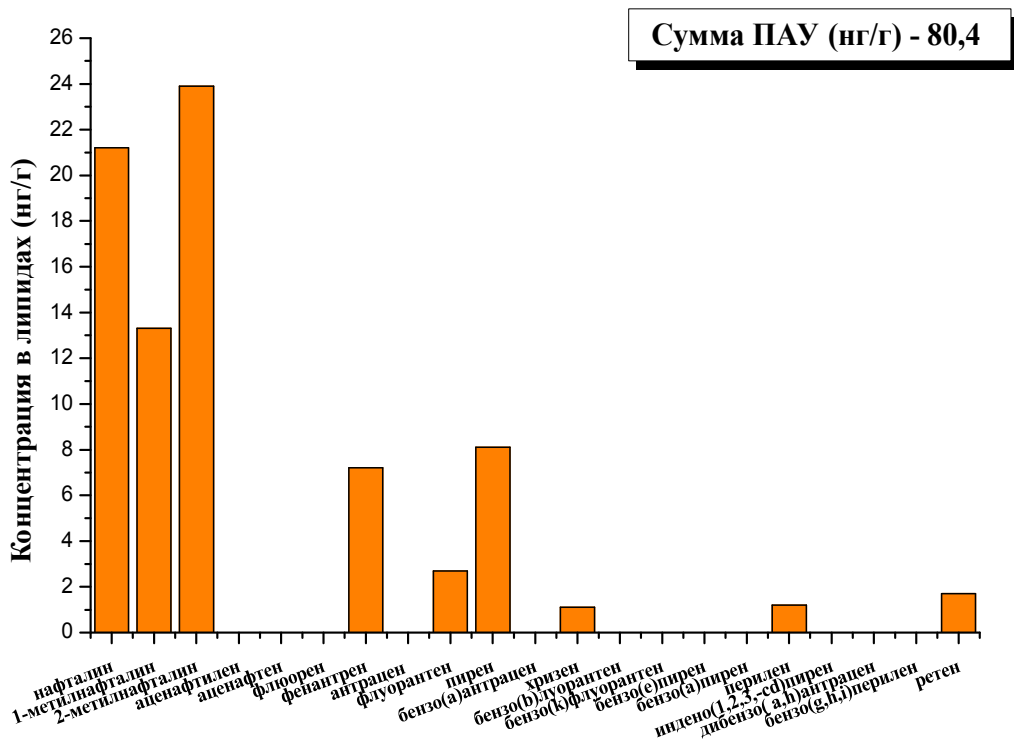


Рисунок 4. Концентрация ПАУ в сборном молоке в молочном хозяйстве.

Можно видеть, что почва и корм на ферме содержат отдельные ПАУ в разных количествах. Это скорее всего связано с тем, что в почве ПАУ накапливаются годами, а трава каждый год вырастает новая. Поэтому номенклатура контаминантов может отличаться. С другой стороны анализ показал, что суммарные концентрации ПАУ в почве и корме отличаются незначительно — 59,1 и 50,2 нг/г, соответственно.

Концентрация ПАУ в молоке существенно выше, чем в почве и корме. Это, вероятно, связано с постепенной биоаккумуляцией ПАУ в жировых депо, частичным метаболизмом отдельных представителей ПАУ с последующим переносом ПАУ, не подвергавшихся биотрансформации, в жировую фракцию молока.

Резюме.

- 1. ПАУ представляют собой вещества углеводородной природы, построенные из конденсированных бензольных циклов.*
- 2. ПАУ образуются при горении любых горючих органических веществ.*
- 3. В настоящее время основными источниками ПАУ являются извержения вулканов, пожары, промышленность, транспорт, другая хозяйственная деятельность человека и некоторые кулинарные традиции.*
- 4. Все ПАУ токсичны, некоторые из них обладают канцерогенными свойствами.*
- 5. Все ПАУ представляют собой липофильные вещества и склонны к биоаккумуляции и переносу в продукты животноводства.*

## **Рекомендуемая литература**

1. Opinion of the Scientific Committee on Food on the risks to human health of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in food // EC, SCF/CS/CNTM/PAH/29 (2002).

[http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index_en.html)

2. Findings of the EFSA Data Collection on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food // EFSA/DATEX/002 (revision 1) (2008).

3. Chen, B.H., and Lin, Y.S. // Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons during processing of duck meat // J. Agric. Food Chem. (1997) 45, 1394-1403.

4. Background paper. «Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Harmful to the Environment! Toxic! Inevitable?»

<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4395.pdf>

5. Berenblum I., Schoental R. // Metabolism of 3,4-benzopyrene // Science (1955) v.122, p.470.

6. Bentley P., Oesh F., Glatt H. // Dual role of epoxide hydrolase in both activation and inactivation of benzo(a)pyrene // Arch. Toxicol. (1977) v.39, No. 1, p. 65-75.

7. А.И. Сотниченко, В.А. Суханов, А.Н. Саприн // Микросомальный метаболизм 3,4-бензпирена. I. Ускоренное хроматографическое разделение и идентификация метаболитов «в потоке» // Хим.-фарм. журнал, 1985, №12, стр. 1435-1440.

8. А.И. Сотниченко, В.А. Суханов, А.Н. Саприн // Микросомальный метаболизм 3,4-бензпирена. II. Количественное определение 7,8-диокси-7,8-дигидробензпирена // Хим.-фарм. журнал, 1986, №1, стр. 28-32.

9. А.И. Сотниченко, А.Н. Саприн // Микросомальный метаболизм 3,4-бензпирена. III. Ограниченный характер субстратно-позиционной специфичности аренэпоксидазы и её зависимость от свойств окисляемой связи // Хим.фарм. журнал, 1986, №12, стр. 1429-1437.

**А.И.Сотниченко, В.В.Оханов**

**01.01.2020**

**Москва**