

DOI: 10.22363/2313-2310-2022-30-4-574-583

УДК 504.06

Научная статья / Research article

## Сравнительный анализ избирательности флуоресцентных методов для экологического мониторинга экотоксикантов

О.А. Плотникова  , Е.И. Тихомирова , Г.В. Мельников 

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
г. Саратов, Российская Федерация*

 [plotnikovaoa@sstu.ru](mailto:plotnikovaoa@sstu.ru)

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ избирательности классического и синхронного флуоресцентных методов определения экотоксикантов полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Применялось сорбционное концентрирование ПАУ из водномицеллярных растворов цетилтриметиламмония бромида и регистрация спектров на вязкой матрице. В случае сложных проб окружающей среды область применения флуориметрического анализа может быть расширена с помощью регистрации синхронных спектров флуоресценции, получаемых при одновременном сканировании длин волн возбуждения и испускания с постоянным сдвигом:  $\lambda_{\text{исп}} - \lambda_{\text{возб}} = \Delta\lambda = \text{const}$ . Экспериментально проведена оценка состава смеси ПАУ (фенантрен, антрацен, флуорен, пирен) методами классической флуоресценции с селективным возбуждением и синхронной флуоресценции. Сделан вывод о том, что применение синхронных спектров позволяет улучшить избирательность флуоресцентного анализа ПАУ в смеси. Данные методы могут быть успешно применены для идентификации отдельных ПАУ при экологическом мониторинге экотоксикантов в водных объектах окружающей среды.

**Ключевые слова:** флуоресцентный анализ, синхронное сканирование, полициклические ароматические углеводороды

**Вклад авторов:** *О.А. Плотникова* – концепция и разработка исследования, регистрация спектров, анализ полученных результатов, написание текста; *Е.И. Тихомирова* – концепция и постановка задачи исследования, систематизация материала; *Г.В. Мельников* – анализ и интерпретация данных, коррекция содержания статьи.

**История статьи:** поступила в редакцию 15.08.2022; доработана после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 10.10.2022.

**Для цитирования:** Плотникова О.А., Тихомирова Е.И., Мельников Г.В. Сравнительный анализ избирательности флуоресцентных методов для экологического мониторинга экотоксикантов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 4. С. 574–583. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-574-583>

## Comparative analysis of fluorescent methods selectivity for ecotoxicants environmental monitoring

Olga A. Plotnikova  , Elena I. Tikhomirova , Gennadyi V. Melnikov 

*Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, Russian Federation*

 [plotnikovaoa@sstu.ru](mailto:plotnikovaoa@sstu.ru)

**Abstract.** A comparative analysis of classical and synchronous fluorescent methods selectivity for ecotoxicants determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) was carried out. PAHs sorption preconcentration from aqueous cetyltrimethylammonium bromide micellar solutions and spectra recording on a viscose matrix were used. In the case of complex environmental samples, the scope of fluorimetric analysis can be expanded by registering synchronous fluorescence spectra obtained by simultaneously scanning the excitation and emission wavelengths with a constant shift:  $\lambda_{em} - \lambda_{ex} = \Delta\lambda = \text{const}$ . The composition of PAHs mixture (phenanthrene, anthracene, fluorene, pyrene) was experimentally evaluated by classical fluorescence with selective excitation and synchronous fluorescence. It was concluded that the use of synchronous spectra makes it possible to improve the selectivity of the PAHs fluorescence analysis in a mixture. These methods can be successfully applied to identify individual PAHs in monitoring of environment water bodies.

**Keywords:** fluorescence analysis, simultaneous scanning, polycyclic aromatic hydrocarbons

**Authors' contributions:** *O.A. Plotnikova* – concept and development of the study, spectra registration, analysis of the obtained results, writing the text; *E.I. Tikhomirova* – concept and research problem statement, systematization of the material; *G.V. Melnikov* – analysis and interpretation of data, correction of the article content.

**Article history:** received 15.08.2022; revised 06.09.2022; accepted 10.10.2022.

**For citation:** Plotnikova OA, Tikhomirova EI, Melnikov GV. Comparative analysis of fluorescent methods selectivity for ecotoxicants environmental monitoring. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2022;30(4):574–583. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-574-583>

### Введение

Экотоксиканты – полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) включены Стокгольмской конвенцией (2001 г.) в ряд стойких органических загрязнителей. Поскольку ПАУ обладают сильной канцерогенной, мутагенной и тератогенной активностью [1], они наносят большой ущерб здоровью человека и животных даже при «следовых» концентрациях в окружающей среде. Для эффективного контроля ПАУ крайне важным является выбор подходящих методов их обнаружения. Широко распространены

хроматографические методы анализа ПАУ. Однако они обладают рядом недостатков: необходимостью дорогостоящего аппаратного оснащения, длительностью и сложностью пробоподготовки и анализа. В связи с этим для обеспечения растущих потребностей экоаналитического контроля актуальными являются разработка и усовершенствование существующих методов анализа ПАУ.

Определенными преимуществами для определения ПАУ обладают люминесцентные, в частности флуоресцентные методы, поскольку отличительной чертой молекул ПАУ является их способность к поглощению и флуоресценции под действием УФ-излучения. Данные методы находят все большее применение в экологическом мониторинге окружающей среды. Однако обычные классические флуориметрические методы характеризуются ограниченной избирательностью (селективностью). При анализе сложных природных смесей перекрытие широких полос флуоресценции ПАУ при комнатной температуре обычно мешает процессу идентификации отдельных компонентов [2]. В случае сложных проб окружающей среды область применения флуориметрического анализа может быть расширена с помощью синхронной флуоресцентной спектроскопии [3; 4].

Концепция применения для анализа веществ синхронных спектров, получаемых при одновременном сканировании длин волн возбуждения и испускания с постоянным сдвигом:  $\lambda_{\text{исп}} - \lambda_{\text{возб}} = \Delta\lambda = \text{const}$ , впервые была предложена Ллойдом в 1971 г. [5]. Была сформулирована методология и приведены конкретные примеры применения данного метода для определения ПАУ в многокомпонентном анализе [4]. В обзорах [6; 7] подробно описаны принципы и возможности применения синхронной спектроскопии. В работе [8] методом синхронной флуоресценции с постоянным сдвигом длин волн определялись бензо[а]пирен, бензо[б]флуорантен и бензо[к]флуорантен в смеси 16 ПАУ. Анализ смеси ПАУ методом синхронной флуоресценции в мицеллярной фазе различных неионных поверхностно-активных веществ (ПАВ) представлен в работе [9]. Об одновременном определении методом синхронной флуоресценции различных бинарных и тройных смесей ПАУ в морской воде с использованием мицеллярных сред, содержащих различные ПАВ, сообщается в работе [10]. Комбинация методов спектроскопии Шпольского и синхронной спектроскопии широко применяется при определении ПАУ в природных и техногенных средах [11].

Основное отличие синхронных спектров от обычных классических заключается в том, что они регистрируются при сканировании спектров возбуждения и испускания с постоянным сдвигом длин волн  $\Delta\lambda$ . В ряде случаев можно получить одиночный достаточно узкий пик, характерный для конкретного вещества. Такие пики регистрируются в том диапазоне длин волн, где происходит перекрытие спектров поглощения и флуоресценции. Причем оптимальные параметры ширины и интенсивности такого пика характерны для случая перекрытия максимумов соответствующих спектров. Выявлено,

что интенсивность пика при синхронном сканировании спектра зависит от концентрации люминесцирующего вещества и дает возможность его количественного определения. Особенно перспективен данный метод для анализа многокомпонентного состава люминофоров с перекрывающимися классическими спектрами флуоресценции, поскольку позволяет добиться хорошего разрешения сигналов и, следовательно, дает возможность идентифицировать отдельные компоненты смеси.

В результате техники синхронного сканирования не только упрощаются спектры сложных молекул, но и устраняется мешающее влияние релеевского рассеяния растворителя и в значительной степени (при соответствующем выборе  $\Delta \lambda$ ) уменьшается проявление комбинационного рассеяния растворителя, что приводит к снижению фона и, соответственно, снижению предела обнаружения.

Данный метод успешно применялся для идентификации ПАУ во взвешенных частицах городского воздуха [2; 12]. В [13] описано применение синхронной флуоресцентной спектроскопии для быстрого количественного определения ПАУ в почвенных экстрактах и других твердых образцах. Пробы воды из различных источников исследуются на содержание ПАУ данным методом в [14; 15].

Целью работы является сравнительная оценка применения классического и синхронного флуоресцентных методов для анализа смеси ПАУ.

### Материалы и методы

В работе применялись препараты ПАУ (пирен, антрацен, фенантрен, флуорен) фирмы Sigma (США). Исходные растворы ПАУ готовились по точным навескам и хранились в стеклянных пробирках с притертыми пробками в темном месте во избежание фотохимического разрушения соединений. В качестве растворителя использовались водно-мицеллярные растворы (ВМР) катионного ПАВ – цетилтриметиламмония бромида (ЦТАБ) марки «ч.д.а.» фирмы Sigma. Растворение ПАУ в растворах проводилось при помощи ультразвуковой ванны «ПСБ-4035-05» (ЗАО «ПСБ-Галс», Россия) и контролировалось по спектрам поглощения на двухлучевом сканирующем УФ-ВИД спектрофотометре ПромЭкоЛаб ПЭ-6100УФ (Россия).

В рабочих растворах концентрация ЦТАБ соответствовала критической концентрации мицеллообразования (ККМ) –  $9,5 \cdot 10^{-4}$  М. Концентрация ПАУ в ВМР составляла  $10^{-7}$  М.

Для сорбционного концентрирования и люминесцентных исследований применялась фильтровальная нетканая гидрофобная матрица на основе вискозы («Ленфильтр», г. Санкт-Петербург). Сорбцию ПАУ на матрицу проводили в динамическом режиме в сорбционной колонке. Затем сорбент сушили 10 мин при температуре 60 °С.

Флуоресценция ПАУ в растворах и на матрицах регистрировалась на спектрофлуориметре «Флуорат-02-Панорама» (Россия). Для измерения

люминесценции растворов использовали стандартные кварцевые кюветы с длиной оптического пути 1 см. Спектры флуоресценции на матрице получены с использованием специального держателя для твердых образцов. В обоих случаях использовалось фронтальное возбуждение флуоресценции образцов. Во всех экспериментальных исследованиях обязательно регистрировались фоновые сигналы матрицы, которые учитывались при построении спектров.

## Результаты и обсуждение

В литературных источниках обсуждаются возможности применения метода синхронной спектрофлуориметрии на твердых матрицах [13; 14; 16; 17]. Сорбционное концентрирование на матрицах позволяет значительно усилить сигнал флуоресценции ПАУ [18], что также справедливо и для синхронных спектров. Подобные эксперименты по синхронному сканированию с постоянным сдвигом длин волн возбуждения и испускания были выполнены нами при использовании сорбционного концентрирования ПАУ из ВМР ЦТАБ и регистрации спектров на вязкой матрице. Следует отметить, что спектры синхронной флуоресценции изученных ПАУ на твердой вязкой матрице соответствуют аналогичным спектрам, полученным при исследовании растворов ПАУ.

Упрощенный характер синхронных спектров сложных молекул является основой для простого и быстрого анализа как отдельных веществ, так и селективного метода определения индивидуальных компонентов в их смеси. Для подтверждения этого утверждения экспериментально были получены классические и синхронные спектры флуоресценции ряда растворов отдельных ПАУ и их смеси. В табл. 1 сведены длины волн максимумов в спектрах возбуждения и флуоресценции ПАУ.

Таблица 1. Спектральные характеристики ПАУ / Table 1. Spectral characteristics of PAHs

ПАУ / PAHs	$\lambda_{\text{всб}} / \lambda_{\text{вк}}$	$\lambda_{\text{фл}} / \lambda_{\text{п}}$
Фенантрен / phenanthrene	250	365
Антрацен / anthracene	250	402
Флуорен / fluorene	204	305
Пирен / pyrene	334	373

Были получены синхронные спектры флуоресценции изученных ПАУ: фенантрена, антрацена, флуорена и пирена в диапазоне  $\Delta\lambda$  от 5 до 160 нм с шагом 5 нм в интервале от 5 до 100 нм, а также с шагом 5 и 10 нм в интервале от 100 до 160 нм. Для пирена синхронные спектры представлены на рис. 1. Так как дополнительным фактором селективности может быть параметр  $\Delta\lambda$ , для каждого из изученных ПАУ экспериментально подбираются такие значения  $\Delta\lambda$ , при которых наблюдаются наиболее интенсивные и узкие пики.

Изучив предварительно особенности и характеристики синхронных спектров отдельных ПАУ, подобрав для них значения  $\Delta\lambda$  и зарегистрировав положение пиков, возможно выявить характерные интенсивные пики данных

компонентов уже в их смеси. При этом при одинаковом значении  $\Delta\lambda$  выявляются хорошо разрешенные пики разных компонентов.

Для подтверждения данного предположения было проведено сравнительное исследование спектров твердофазной флуоресценции многокомпонентной модельной смеси ПАУ (фенантрен, антрацен, флуорен, пирен), при концентрации компонентов в диапазоне  $10^{-8}$  М. Регистрировались спектры классической флуоресценции, полученные при длинах волн возбуждения, характерных для представителей данной смеси, а также синхронные спектры, с выделением наиболее интенсивных и характерных для индивидуальных ПАУ пиков.

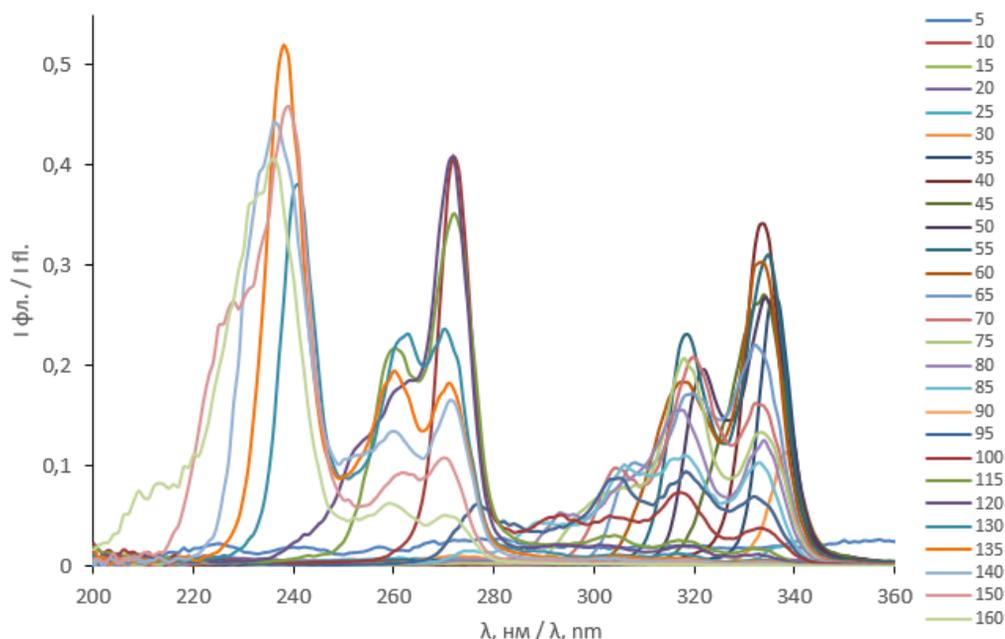


Рис. 1. Синхронные спектры флуоресценции пирена в диапазоне  $\Delta\lambda$  от 5 до 160 нм / Figure 1. Synchronous fluorescence spectra of pyrene in the  $\Delta\lambda$  range from 5 to 160 nm

Первоначально для идентификации отдельных ПАУ в смеси применялось селективное возбуждение флуоресценции соответствующими длинами волн возбуждения ПАУ (см. табл. 1). При  $\lambda_{\text{возб}} = 250$  нм (рис. 2а), характерной для флуоресценции фенантрена и антрацена, наблюдается серия пиков, в которых можно различить спектры данных ПАУ. При этом максимумы интенсивности флуоресценции, наблюдаемые при 348, 365, 382 нм, свидетельствуют о присутствии в смеси фенантрена; 380, 402, 423 нм – антрацена. Однако спектры перекрываются, что осложняет достоверную идентификацию отдельных ПАУ.

На рис. 2б представлены спектры флуоресценции той же смеси ПАУ, но при  $\lambda_{\text{возб}} = 334$  нм, характерной для возбуждения флуоресценции пирена. На спектре отчетливо можно выделить спектр флуоресценции пирена

с максимумами при длинах волн 373 и 391 нм. Можно заключить, что избирательной идентификации пирена в данной смеси не мешает присутствие других изученных представителей этой группы соединений.

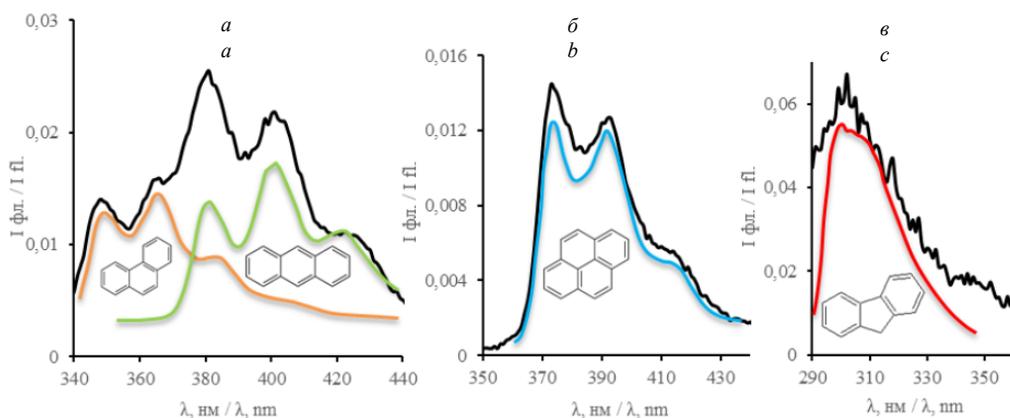


Рис. 2. Спектры флуоресценции смеси ПАУ при различных длинах волн фотовозбуждения: 250 нм (а), 334 нм (б) 204 нм (в) /  
Figure 2. Fluorescence spectra of PAHs mixture at different photoexcitation wavelengths: 250 nm (a), 334 nm (b) 204 nm (c)

При  $\lambda_{\text{возб}} = 204$  нм (рис. 2в) получен следующий спектр данной смеси ПАУ. На спектре наблюдается пик при 305 нм, характерный для молекул флуорена.

Таким образом, подбирая соответствующую длину волны возбуждения, можно селективно возбуждать флуоресценцию отдельных компонентов смеси ПАУ. Однако следует заметить, что в некоторых диапазонах длин волн есть значительное перекрытие спектров, что может затруднить идентификацию отдельных ПАУ (рис. 2а). В таком случае можно применять различные способы повышения селективности флуоресцентного метода, например синхронное сканирование спектров возбуждения и флуоресценции с постоянным сдвигом длин волн  $\Delta\lambda$ .

Нами была получена серия синхронных спектров смеси ПАУ при разных  $\Delta\lambda$  в диапазоне от 5 до 160 нм. Отобраны наиболее информативные спектры. Для идентификации отдельных ПАУ в смеси проводилось сравнение положение пиков синхронных спектров индивидуальных ПАУ при той же  $\Delta\lambda$ , при которой анализировалась смесь (рис. 3).

При  $\Delta\lambda = 55$  нм в смеси ПАУ наблюдается целая серия пиков (рис. 3а). Сравнение со спектрами отдельных ПАУ позволяет выделить фенантрен (пик с вершиной на 224 нм), флуорен (пик с вершиной на 262 нм) и пирен (два пика, максимальный из которых наблюдается на 335 нм).

Увеличивая  $\Delta\lambda$  до 130 нм, удастся зафиксировать в синхронных спектрах смеси ПАУ пики (рис. 3б), характерные для антрацена (на длине волны 251 нм), пирена (241 и 270 нм) и фенантрена (192 нм).

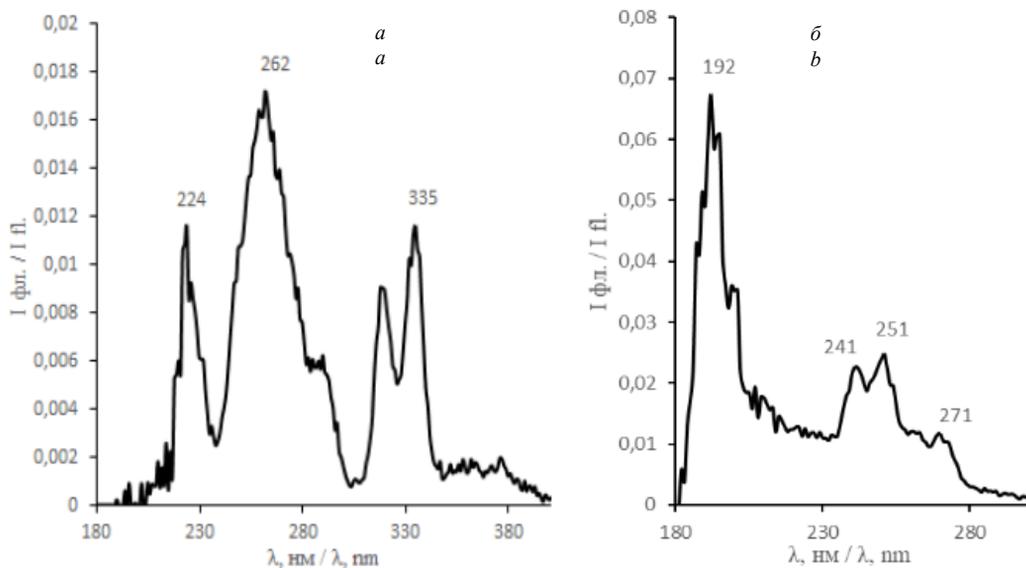


Рис. 3. Синхронные спектры флуоресценции смеси ПАУ при  $\Delta\lambda = 55$  нм (а) и  $\Delta\lambda = 130$  нм (б) / Figure 3. Synchronous fluorescence spectra of PAHs mixture at  $\Delta\lambda = 55$  nm (a) and 130 nm (b)

Таким образом, можно сделать вывод, что анализ синхронных спектров с разным сдвигом  $\Delta\lambda$  позволяет улучшить избирательность (селективность) флуоресцентного метода определения ПАУ в смеси. При этом важно, что для получения синхронных спектров не требуется особого оборудования, они могут быть получены на обычных спектрофлуориметрах, в которых предусмотрено одновременное (синхронное) изменение длин волн монохроматоров возбуждения и регистрации спектров флуоресценции [2].

### Заключение

При анализе сложных смесей ПАУ перекрытие широких полос флуоресценции обычно мешает процессу идентификации отдельных компонентов. Повысить избирательность флуоресцентного метода позволяет использование техники синхронного сканирования спектров возбуждения и флуоресценции с постоянным сдвигом длин волн  $\Delta\lambda$ . Экспериментально получены синхронные спектры флуоресценции отдельных ПАУ (пирена, антрацена, флуорена и фенантрена). Проведена сравнительная оценка анализа смеси ПАУ методом классической и синхронной флуоресценции. В итоге можно сделать вывод о том, что анализ синхронных спектров с разным сдвигом  $\Delta\lambda$  позволяет улучшить избирательность флуоресцентного метода анализа ПАУ в смеси. Флуоресцентные методы могут быть успешно применены для идентификации отдельных ПАУ при экологическом мониторинге экотоксикантов в водных объектах окружающей среды.

## References / Список литературы

- [1] Lawal AT. Polycyclic aromatic hydrocarbons. A review. *Cogent Environmental Science*. 2017;3(1):1339841. <https://doi.org/10.1080/23311843.2017.1339841>
- [2] Matuszewska A, Czaja M. The Use of Synchronous Fluorescence Technique in Environmental Investigations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Airborne Particulate Matter from an Industrial Region in Poland. *Environmental Emissions. IntechOpen*. 2020. Available from: <https://doi.org/10.5772/intechopen.92402>
- [3] Rubio S, Gomez-Hens A, Valcarcel M. Analytical applications of synchronous fluorescence spectroscopy. *Talanta*. 1986;33(8):633–640. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(86\)80149-7](https://doi.org/10.1016/0039-9140(86)80149-7)
- [4] Vo-Dinh T. Synchronous luminescence spectroscopy: methodology and applicability. *Applied Spectroscopy*. 1982;36(5):576–581. <https://doi.org/10.1366/0003702824639510>
- [5] Lloyd JBF. The nature and evidential value of the luminescence of automobile engine oils and related materials: Part I. Synchronous excitation of fluorescence emission. *Journal of the Forensic Science Society*. 1971;11(2):83–94. [https://doi.org/10.1016/S0015-7368\(71\)70667-7](https://doi.org/10.1016/S0015-7368(71)70667-7)
- [6] Andrade-Eiroa A, De-Armas G, Estela JM, Cerda V. Critical approach to synchronous spectrofluorimetry. I. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2010;29(8):885–901. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.04.010>
- [7] Andrade-Eiroa A, De-Armas G, Estela JM, Cerda V. Critical approach to synchronous spectrofluorimetry. II. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2010;29(8):902–927. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.05.002>
- [8] Troche SV, Bugallo M, Falcón MG, Yusty ML, Lozano JS. Constantwavelength synchronous spectrofluorimetry for determination of benzo[a]pyrene, benzo[b]fluoranthene and benzo[k]fluoranthene in presence of 16 EPA PAHs. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*. 2003;99:96–101.
- [9] Böckelen A, Niessner R. Combination of micellar extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous media with detection by synchronous fluorescence *Fresenius' journal of analytical chemistry*. 1993;346(4):435–440. <https://doi.org/10.1007/bf00325857>
- [10] Rodríguez JJS, Garcia JH, Bernal MM, Martin-Lazaro AB. Analysis of mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons in sea-water by synchronous fluorescence spectrometry in organized media. *Analyst*. 1993;118(7):917–921. <https://doi.org/10.1039/AN9931800917>
- [11] Zhang W, Lin D L, Zou ZX, Li YQ. A novel approach for simultaneous determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by Shpol'skii non-linear variableangle synchronous fluorescence spectrometry. *Talanta*. 2007;71(4):1481–1486. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.07.022>
- [12] Sharma H, Jain VK, Khan ZH. Identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in suspended particulate matter by synchronous fluorescence spectroscopic technique. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2007;68(1):43–49. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2006.10.054>
- [13] Samokhvalov A. Analysis of various solid samples by synchronous fluorescence spectroscopy and related methods: A review. *Talanta*. 2020;216:120944. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120944>
- [14] Vilchez JL, Del Olmo M, Avidad R, Capitán-Vallvey LF. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbon residues in water by synchronous solid-phase spectrofluorimetry. *Analyst*. 1994;119(6):1211–1214. <https://doi.org/10.1039/AN9941901211>
- [15] Zhang RP, Yuan QL, Chen KH, He LF. Constant-wavelength synchronous fluorescence spectrometry for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons

- in water samples. *Advanced Materials Research*. 2012;490–495:3202–3206. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.490-495.3202>
- [16] He LF, Zhang XH, Zhang RP. Determination of PAHs in river water using bamboo charcoal as a solid-phase extraction adsorbent by Synchronous Fluorescence Spectrometry. *Advanced Materials Research*. 2012;518:1501–1505. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.1501>
- [17] Wang L, Li W, Zhang F, Li H, Cai G, Li B, Qian G, Du Y. Rapid determination of benzo[a]pyrene by membrane enrichment coupled with solid-phase constant-wavelength synchronous fluorescence spectrometry. *Luminescence*. 2016;31(6):1187–93. <https://doi.org/10.1002/bio.3088>
- [18] Plotnikova OA, Mel'nikov AG, Tikhomirova EI, Adylova AZ. Matrix type effect on sorption concentration process and luminescent determination of pyrene. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2020;14:145–151. <https://doi.org/10.1134/S1990793120010261>

### Сведения об авторах:

*Плотникова Ольга Александровна*, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 510054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77, ORCID: 0000-0003-2715-044X, eLibrary SPIN-код 1682-8461. E-mail: plotnikovaoa@sstu.ru

*Тихомирова Елена Ивановна*, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 510054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77. ORCID: 0000-0001-6030-7344, eLibrary SPIN-код 7673-8480. E-mail: tichomirovaei@sstu.ru.

*Мельников Геннадий Васильевич*, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 510054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77. ORCID: 0000-0002-4708-2256, eLibrary SPIN-код 7267-4911. E-mail: melnikov\_gv@sstu.ru

### Bio notes:

*Olga A. Plotnikova*, Cand. Sc. in Chemistry, Associate Professor of the Department of Ecology and Technosphere Safety, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-2715-044X, eLibrary SPIN-код 1682-8461. E-mail: plotnikovaoa@sstu.ru

*Elena I. Tikhomirova*, D. in Biology, Professor, Head of the Department of Ecology and Technosphere Safety, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-6030-7344, eLibrary SPIN-код 7673-8480. E-mail: tichomirovaei@sstu.ru

*Gennadyi V. Melnikov*, D. in Chemistry, Professor of the Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-4708-2256, eLibrary SPIN-код 7267-4911. E-mail: melnikov\_gv@sstu.ru