

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ ЛЮМИНОФОРОВ В РАСТВОРАХ

Абдрахманов А.М.¹, Гареев Б.М.², Якшембетова Л.Р.³, Шарипов Г.Л.⁴

¹Абдрахманов Айрат Маратович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;

²Гареев Булат Махматович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник;

³Якшембетова Луиза Рузиевна – кандидат химических наук, младший научный сотрудник;

⁴Шарипов Глюс Лябибович – доктор химических наук, ведущий научный сотрудник,

Лаборатория химии высоких энергий и катализа,

Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН,

г. Уфа

Аннотация: рассмотрена возможность аналитического применения метода сонолюминесцентной спектроскопии для определения в растворах органических люминофоров. Показано, что предпочтительным для данной цели является использование однопузырьковой сонолюминесценции в режиме движения пузырька, а также методики, основанной на вовлечении определяемых веществ в сонохемилуминесцентные реакции.

Ключевые слова: сонолюминесценция, однопузырьковая сонолюминесценция, органические люминофоры.

APPLICATION OF SONOLUMINESCENCE SPECTROSCOPY FOR THE DETERMINATION OF AROMATIC PHOSPHORS IN SOLUTIONS

Yakshembetova L.R.¹, Abdrakhmanov A.M.², Sharipov G.L.³, Sharipov G.L.⁴

¹Abdrakhmanov Airat Maratovich - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher;

²Gareev Bulat Makhmutovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher;

³Yakshembetova Luiza Ruzilevna – Candidate of chemical sciences, junior researcher;

⁴Sharipov Glus Lyabibovich – Doctor of Chemistry, Leading Researcher,

LABORATORY OF HIGH ENERGY CHEMISTRY AND KATAZIZ,

INSTITUTE OF PETROCHEMISTRY AND CATALYSIS UFITS RAS,

UFA

Abstract: the possibility of analytical application of the sonoluminescence spectroscopy method for the determination of organic luminophores in solutions is considered. It has been shown that it is preferable for this purpose to use the mode of single-bubble sonoluminescence in the mode of bubble movement, as well as a technique based on the involvement of analytes in sonochemiluminescent reactions.

Keywords: sonoluminescence, single-bubble sonoluminescence, organic phosphors.

УДК 544.576:535:378

Введение

Открытие сонолюминесценции (СЛ), излучения света при схлопывании кавитационных пузырьков, образующихся в жидкости при действии на неё ультразвуковых волн большой интенсивности [1], и последующие исследования этого явления [2-6] привели возникновению нового метода анализа – сонолюминесцентной спектроскопии [7-9]. Суть этого метода заключается в идентификации и количественном определении элементов в растворах по характеристическим спектрам СЛ этих элементов.

Механизмы генерации возбужденных состояний при кавитации могут быть различными. Истинная сонолюминесценция возникает при столкновениях частиц, потенциальных эмиттеров излучения, во внутрипузырьковой плазме, возникающей в кавитационных пузырьках на стадии их схлопывания [2,3,6]. Эмиттерами свечения при этом могут быть растворенные в жидкости газы, диффундирующие в кавитационный пузырек на стадии его роста, молекулы жидкости и растворенных в ней летучих веществ, испаряющиеся с поверхности раздела газ-жидкость пузырька при разогреве его содержимого на стадии сжатия. При интенсивном движении и деформации пузырьков в ультразвуковом поле, возможно впрыскивание микро и даже наноразмерных капель жидкости, содержащих в себе и нелетучие растворенные вещества, внутрь пузырька. Эти капли быстро испаряются, таким образом, молекулы жидкости и растворенных в ней веществ оказываются в газовой фазе пузырька. Отметим, что эмиттерами свечения могут быть не только проникающие в пузырек молекулярные частицы, но и продукты их сонолиза, например, атомы, ионы или радикалы. Описанный выше механизм генерации возбужденных состояний называют столкновительным механизмом возбуждения СЛ. Впервые характеристические спектры атомарной СЛ, обусловленные данным механизмом, были получены для щелочных и

щелочноземельных металлов (Na, Li, K, Ca и др.) в водных растворах их нелетучих солей [10,11]. В дальнейшем подобная СЛ была обнаружена и для других металлов (Mo, Co, W и др.) в органических растворах их летучих карбонильных комплексов [12]. Атомарная СЛ этих металлов была использована для оценки на основе спектроскопического анализа физических параметров внутрипузырьковой плазмы (температуры [13] и давления [14]).

При действии ультразвука на растворы возможна реализация и других вторичных механизмов свечения. Один из них – это сонофотолюминесценция (СФЛ), то есть тривиальное переизлучение части излучаемого пузырьками света, поглощенного люминофорами, в растворе. Как показали исследования, при действии ультразвука на растворы солей металлов, обладающих люминесценцией, могут реализовываться как сонофотолюминесценция, так и столкновительный внутрипузырьковый механизм возбуждения. Например, характеристическая СЛ ионов лантанидов (Ln^{3+}) [15] и уранила (UO_2^{2+}) [16] обусловлена вкладом обоих этих механизмов. СФЛ характерна также для органических люминофоров, обладающих высокими квантовыми выходами люминесценции (красителей, полиароматических молекул и т.д.), причем данных о возбуждении их люминесценции по столкновительному механизму до сих пор не было.

Еще одним вторичным механизмом СЛ является химический механизм генерации света в хемилюминесцентных реакциях продуктов сонолиза, попадающих в раствор при схлопывании пузырьков. Данный процесс обозначают как сонохемилюминесценция (СХЛ). Примерами этого механизма является СХЛ в щелочных растворах люминола [17,18], и водных растворах хелатного комплекса тербия(III) [19] и комплекса $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ [20].

Описанные примеры позволяют создать начальную библиотеку спектров СЛ определяемых веществ, преимущественно неорганических солей. В тоже время расширение — это базы определяемых веществ необходимо для дальнейшего развития метода сонолюминесцентной спектроскопии и его широкого внедрения в практику. В этой работе показана возможность регистрации спектров СЛ малых добавок органических веществ в растворах и обсуждены механизмы их возникновения. Для лучшего понимания действия возможных механизмов возбуждения этих люминофоров сравнивается люминесценция, регистрируемая при двух основных режимах сонолиза: одно- и многопузырьковом.

Экспериментальная часть.

В работе использованы растворители этиленгликоль, додекан и люминесцирующие добавки бензол, толуол, ксилол, антрацен, 9,10-дифенилантрацен (ДФА), р-терфенил (p-terphenyl), бис-(2,4-динитрофенил) оксалат квалификации «к.ч.». Многопузырьковый сонолиз растворов проводился в термостатируемом стальном реакторе снабженным снизу кварцевым окном, внутренний диаметр реактора 20 мм. Во всех экспериментах объем облучаемой ультразвуком жидкости составлял 20 мл. Растворы насыщали аргоном 20 минут до сонолиза и непосредственно вовремя сонолиза со скоростью потока газа 10 мл/мин. Обработка ультразвуком проводилась с помощью ультразвукового процессора ACE GLASS (20 кГц), снабженного титановым волноводом стержневого типа с диаметром излучающей поверхности 6 мм, при акустической мощности 20 Вт. Расстояние от торца волновода до кварцевого окна составляло 5 мм. Внутри реактора поддерживалась температура 8-10°C.

Однопузырьковый сонолиз растворов проводили в сферической стеклянной колбе-резонаторе с приклеенными оппозитно пьезокерамическими преобразователями (объем ~ 100 мл, частота стоячей волны в указанных растворителях ~ 25-27 кГц). Растворы дегазировали вакуумированием при 10^{-2} Торр в течение 30 мин. Акустическое давление p_a в центре резонатора измеряли сравнением с сигналом калиброванного погружного гидрофона 8103 Bruel & Kjer. Спектры и интенсивность свечения при сонолизе регистрировали сканирующим монохроматором МДР-206 (детектор света фотоумножитель Hamamatsu R3896, $\Delta\lambda = 5$ нм). Свет от пузырька в центре колбы для SBSL доставлялся на входную щель спектрофлуориметра с помощью кварцевого световода диаметром 0.4 мм, входной торец которого располагалась на расстоянии 5 мм от пузырька. Полученные усредненные спектры были исправлены на спектральную чувствительность детектирующей системы. Спектры фотолюминесценции (PL) ($\Delta\lambda = 2$ nm) регистрировали на спектрофлуориметре Fluorolog 3 Horiba Jobin Ivon. Спектры поглощения растворов регистрировали на спектрофотометре Shimadzu UV-1800.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1. представлены спектры МПСЛ растворов р-терфенила, антрацена и ДФА в додекане, а так же спектр сонолюминесценции этого растворителя. Обнаружено, что в спектре МПСЛ в присутствии р-терфенила появляется дополнительный максимум свечения (по сравнению со спектром чистого растворителя) в области менее 400 нм, который можно отнести к флуоресценции данного эффективного люминофора (квантовый выход $\phi = 0.93$ [21]). Как видно из рис. 1, эта полоса имеет малую интенсивность и её использование для аналитической определения р-терфенила в растворе затруднительно.

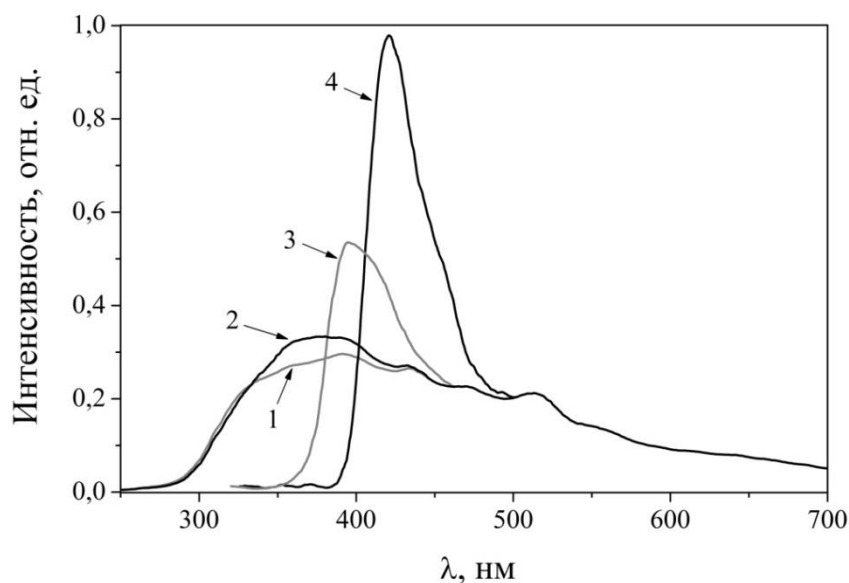


Рис. 1. Спектры МПСЛ: 1 – додекана, 2 – раствора 10^{-2} моль/л р-терфенила в додекане, 3 – раствора $3 \cdot 10^{-3}$ моль/л антрацена в додекане, 4 – раствора $3 \cdot 10^{-3}$ моль/л ДФА в додекане. Все растворы насыщены аргоном.

В спектрах МПСЛ растворов антрацена и дифенилантрацена ($\phi = 0.36$ и 1.0 соответственно [21]) в додекане не очень хорошо видна колебательная структура полос данных люминофоров с основными максимумами при 395 нм (антрацен) и 425 нм (ДФА), однако их подобие с полосами в спектрах фотолюминесценции несомненно. На фоне континуума СЛ растворителя наблюдаются также известные максимумы радикальных эмиттеров C_1 и C_2 (полосы Свана), продуктов сонолиза молекул растворителя. Хорошо заметно поглощение ароматическими люминофорами части континуума растворителя, отсутствующее в спектре при их наличии. Учитывая высокие значения ϕ люминофоров, очевидно действие механизма сонофотолюминесценции, ответственного за их свечение.

С целью повышения интенсивности этих полос люминофоров была рассмотрена однопузырьковая сонолюминесценция их растворов. Известно, что при однопузырьковой сонолюминесценции энергия акустического (ультразвукового) поля фокусируется в одном кавитационном пузырьке, что приводит к более экстремальным физическим параметрам внутрипузырьковой плазмы и соответственно к большей интенсивности СЛ. Регистрация однопузырьковой СЛ возможна в двух режимах: при неподвижном пузырьке (ОПСЛ) и при движении пузырька по хаотичной траектории около центра резонатора (ОПСЛ-РД). Как отмечено во введении, режим ОПСЛ-РД сопровождается инъекцией капель жидкости внутрь пузырька и более эффективным проникновением в него растворенных веществ по сравнению с режимом ОПСЛ.

На рисунке 2а. приведены спектры «аргоновой» ОПСЛ растворов р-терфенила в додекане при различном акустическом давлении p_a . Легко видеть, что полоса р-терфенила с максимумом при 355 нм регистрируется только при довольно высоком акустическом давлении $p_a = 1.27$ бар, т.е. в режиме ОПСЛ-РД. В то же время для классической ОПСЛ при $p_a = 1.05$ бар, когда пузырек стабилен, люминесценция р-терфенила отсутствует. Свечение р-терфенила не может быть и результатом процесса СФЛ, так как в области поглощения света р-терфенилом люминесценция растворителей, как видно по спектрам однопузырьковой сонолюминесценции, отсутствует. На фоне континуума СЛ растворителя наблюдаются также полосы Свана. Влияние акустического давления с изменением характера движения пузырька на возбуждение люминесценции р-терфенила свидетельствует, по нашему мнению, о проникновении р-терфенила в сильно деформируемый при интенсивных перемещениях пузырек. Такие деформации стимулируют инъекцию в него нанокapель раствора. Далее имеет место возбуждение люминофора по столкновительному механизму.

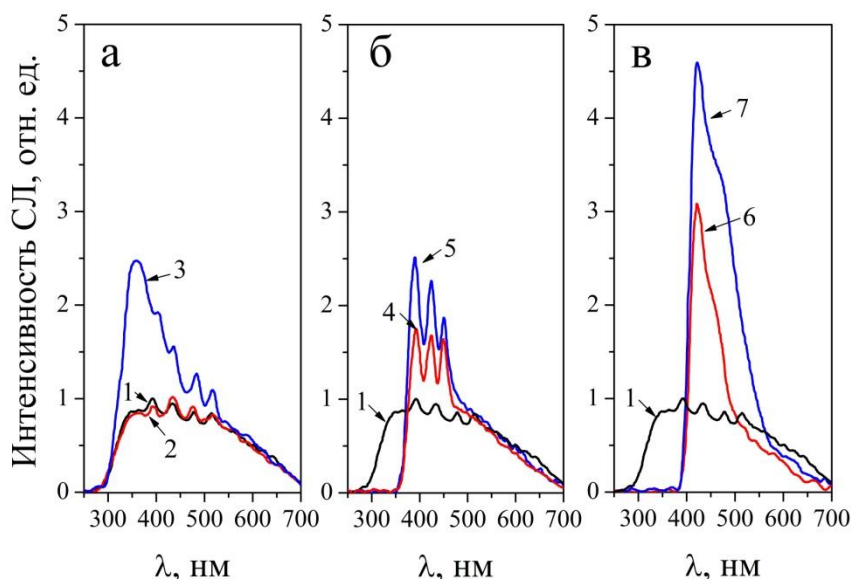


Рис. 2. Спектры ОПСЛ ($p_a = 1,05$ бар) и ОПСЛ-РД ($p_a = 1,27$ бар) додекана и растворов люминофоров в додекане: 1 – ОПСЛ и ОПСЛ-РД додекана, 2 – ОПСЛ $3 \cdot 10^{-3}$ моль/л *p*-терфенила, 3 – ОПСЛ-РД $3 \cdot 10^{-3}$ моль/л *p*-терфенила, 4 – ОПСЛ $3 \cdot 10^{-3}$ моль/л антрацена, 5 – ОПСЛ-РД $3 \cdot 10^{-3}$ моль/л антрацена, 6 – ОПСЛ $3 \cdot 10^{-3}$ моль/л ДФА, 7 – ОПСЛ-РД $3 \cdot 10^{-3}$ моль/л ДФА.

Из анализа интенсивностей полос S_2 нами была оценена эффективная эмиссионная колебательная температура, достигаемая внутри аргоновых пузырьков (по методике [22]). Она составила $(4900-5100) \pm 200$ К. Следует отметить, что существование ароматических люминофоров и их возбуждение в неизменном виде в горячем плазменном ядре пузырька вряд ли возможно, но это осуществимо в менее горячей периферии пузырька при инъекции в эту область раствора.

В спектрах однопузырьковой сонолюминесценции антрацена и 9,10-дифенилантрацена, представленных на рис. 2б и 2в, хорошо видно резкое возрастание интенсивности полос люминофоров при повышении акустического давления от 1.05 до 1.27 бар, в то время как площадь поглощенной части континуума растворителя практически неизменна. При акустическом давлении 1.05 бар люминесценцию люминофоров можно отнести к действию механизма сонофотолюминесценции. Дополнительный прирост интенсивности полос люминофоров при 1.27 бар тогда можно приравнять к вкладу столкновительного механизма. Из соотношения площадей полос люминесценции люминофоров при 1.05 и 1.27 бар можно заключить, что вклады сонофотолюминесценции и столкновительного механизма в их возбуждение сопоставимы.

Из анализа спектров ОПСЛ-РД мы оценили предел обнаружения исследованных люминофоров, и он составляет около $3 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

Известно, что в чистых ароматических растворителях, являющихся люминофорами, не регистрируется их собственная характеристическая сонолюминесценция [23]. Мы предположили, что при подборе условий, снижающих тушение, люминесценция указанных ароматических люминофоров все же может быть получена также при соновозбуждении. Для достижения этой цели нами рассмотрена ОПСЛ и ОПСЛ-РД растворов указанных люминофоров в этиленгликоле. У этого растворителя отсутствует поглощение в области более 250 нм, что должно позволить зарегистрировать коротковолновую люминесценцию производных бензола. Спектры ОПСЛ и ОПСЛ-РД этиленгликоля совпадают и представляют собой континуум монотонно уменьшающийся по интенсивности от 265 до 700 нм. Резкий коротковолновый (менее 265 нм) край данного континуума обусловлен поглощением этиленгликолем сонолюминесценции пузырька.

Спектры ОПСЛ при добавлении к этиленгликолю ароматических люминофоров состоят только из континуума несколько меньшей интенсивности и не содержат полос люминесценции люминофоров. И только в режиме ОПСЛ-РД на фоне континуума появляются полосы собственной люминесценции бензола, толуола, *p*-ксилола. Для примера на рисунке 3 представлены спектры ОПСЛ и ОПСЛ-РД растворов бензола в этиленгликоле.

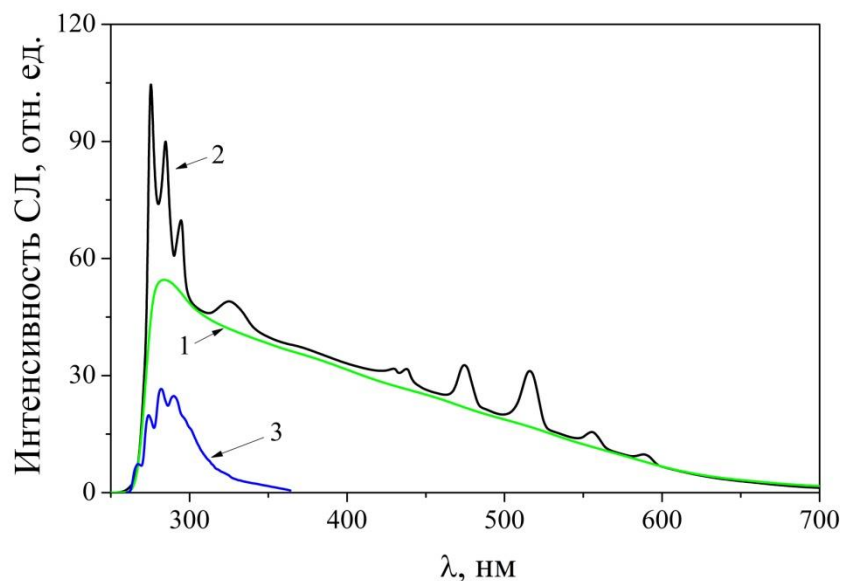


Рис. 3. Спектры ОПСЛ (1.24 bar) – 1 и ОПСЛ-РД (1.34 bar) – 2 растворов бензола в этиленгликоле, $C = 1.25 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Спектр ФЛ 10^{-2} моль/л C_6H_6 в этиленгликоле – 3.

Как видно из рисунка 3. в спектре ОПСЛ-РД присутствует, и бесструктурная полоса с максимумом около 320 нм, соответствующая испусканию света их синглетно-возбужденными димерами (т.е. эксимерами), идентифицированная по [24]. Появление этих полос не может быть объяснено механизмом сонофотолюминесценции, т.к. они отсутствуют в режиме ОПСЛ, и объясняется столкновительным возбуждением люминофоров в пузырьке. Полосы мономерной и эксимерной форм люминофоров хорошо разрешены на спектрах однопузырьковой сонолюминесценции, тогда как на спектрах фотолюминесценции в растворе они сильно уширены и обычно не разрешаются. По-видимому, спектры однопузырьковой сонолюминесценции принадлежат к газофазному свечению люминофоров в пузырьках. А возникновение не только мономерной, но и эксимерной люминесценции при малых концентрациях, свидетельствует о попадании этих люминофоров в неравновесную плазму пузырька, где возможны высокие пиковые давления. По данным характеристическим спектрам можно однозначно определить наличие данных люминофоров в исследуемых растворах при концентрациях около 10^{-3} моль/л.

Как видно из вышеизложенного, изучение спектра и других характеристик сонолюминесценции помогает выявить состав облучаемых систем, механизмы и продукты сонолиза. Данный сонолюминесцентный спектроскопический анализ наиболее результативен при использовании для получения характеристических спектров веществ режима ОПСЛ-РД.

Для этой цели может быть использована также и сонохемилюминесценция. Так, нами недавно обнаружен новый пример СХЛ с участием бис-(2,4-динитрофенил) оксалата (ДНПО) [25]. Известно, что реакция оксалатов с пероксидом водорода приводит к возникновению промежуточного диоксетанового продукта, и, благодаря высокоэффективному для возбуждения конечного эмиттера механизму химически инициируемой электроннообменной люминесценции при последующем взаимодействии диоксетана с активатором, обеспечивает рекордную интенсивность хемилюминесценции В изученном примере сонохемилюминесценция зарегистрирована нами в растворе бис-(2,4-динитрофенил) оксалата с активатором 9,10-дифенилантраценом без участия пероксида водорода. Квантовый выход новой сонохемилюминесценции – $1.5 \cdot 10^{-7}$ и $2.5 \cdot 10^{-7}$ Эйнштейн/моль в толуоле и диметоксиэтаноле, соответственно. Обнаруженная СХЛ обусловлена первичным образованием пероксидных продуктов сонолиза органических растворителей, инициирующих возникновение ключевого для хемилюминесценции интермедиата – диоксетандиона, распадающегося под действием каталитического активатора – ДФА с образованием его в синглетном возбужденном состоянии. На рис. 4. приведен спектр СХЛ в растворе ДНПО и ДФА в толуоле, совпадающий со спектром фотолюминесценции ДФА. Данная сонохемилюминесценция может быть использована в аналитических целях, например, предел обнаружения активатора ДФА в толуоле составил $5 \cdot 10^{-8}$ моль/л [25].

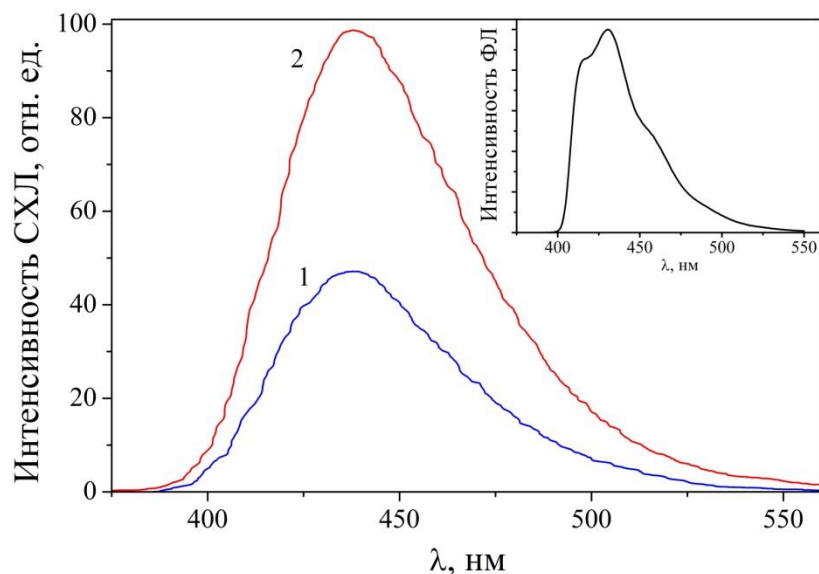


Рис. 4. Спектры СХЛ растворов 10^{-4} М ДНПО и 10^{-3} М ДФА в толуоле – 1, в диметоксиэтаноле – 2 ($\Delta\lambda = 20$ нм). На вставке – спектр фотолуминесценции ДФА в толуоле.

Таким образом, метод сонолюминесцентной спектроскопии может быть использован для определения рассмотренных органических веществ. Предпочтительным является использование режима ОПСЛ-РД, а также использование метода сонохемилюминесценции.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института нефтехимии и катализа УФИЦ РАН (тема №FMRS-2022-0077).

Список литературы / References

1. H. Frenzel, H. Schultes. Luminescenz im ultraschallbeschickten Wasser. // Z. Phys. Chem. 1934. V. 27. P. 421–424.
2. L.A. Crum, T.J. Mason, J. Reisse, K.S. Suslick. Sonochemistry and Sonoluminescence. Kluwer Publishers: Dordrecht, Netherlands, 1999; NATO ASI Series C, V. 524.
3. М.А. Маргулис. Сонолюминесценция. // УФН. 2000. Т. 170. С. 263–287.
4. M. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse. Single-Bubble Sonoluminescence. // Rev. Mod. Phys. 2002. V. 74(2). P. 425–484.
5. F.R. Young. Sonoluminescence. 2005. CRC Press, New York.
6. В.А. Борисёнок. Сонолюминесценция: эксперименты и модели (обзор). // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 3. С. 333–360.
7. Liu Van, Li Guo-yuan. Developing a new spectroscopy analytical method – sonoluminescence. // Spectroscopy and spectral analysis. 2002. V. 22(6). 1030–1032.
8. Ф.А. Чмиленко, А.Н. Бакланов. Определение щелочных и щелочноземельных элементов с использованием сонолюминесценции. // Журн. аналит. химии. 2000. Т. 55. № 12. С. 1281–1284.
9. O.I. Yurchenko, O.S. Kalinenko, A.N. Baklanov, E.A. Belova, and L.V. Baklanova. Sonoluminescence spectroscopy as a promising new analytical method. // Journal of Applied Spectroscopy. 2016. V. 83(1). P. 105–110.
10. K.J. Taylor, P.D. Jarman. The spectra of sonoluminescence. // Aust. J. Phys. 1970. V. 23(3). P. 319–334.
11. C. Seghal, R.P. Steer, R.G. Sutherland, R.E. Verrall. Sonoluminescence of argon saturated alkali metal salt solutions as a probe of acoustic cavitation. // J. Chem. Phys. 1979. V. 70. P. 2242–2248.
12. K.S. Suslick, E.B. Flint, M.W. Grinstaff, K.A. Kemper. Sonoluminescence from metal carbonyls. // J. Phys. Chem. 1993. V. 97. P. 3098–3099.
13. W.B. McNamara III, Y.T. Didenko, K.S. Suslick. Sonoluminescence temperatures during multi-bubble cavitation. // Nature. 1999. V. 401. P. 772–775.
14. W.B. McNamara III, Y.T. Didenko, and K.S. Suslick. Pressure during Sonoluminescence. // J. Phys. Chem. B. 2003. V. 107. P. 7303–7306.
15. G.L. Sharipov, R.K. Gainetdinov, A.M. Abdrakhmanov. Sonoluminescence of aqueous solutions of lanthanide salts. // Rus. Chem. Bull. 2003. V. 52. P. 1969–1973.
16. R. Pflieger, V. Cousin, N. Barr, P. Moisy, S.I. Nikitenko. Sonoluminescence of Uranyl Ions in Aqueous Solutions. // Chem. Eur. J. 2012. V. 18. P. 410–414.

17. *E.N. Harvey*. Sonoluminescence and sonic chemiluminescence. // *J. Am. Chem. Soc.* 1939. V. 61. P. 2392–2398.
18. *S. Hatanaka, H. Mitome, K. Yasui, S. Hayashi*. Single-bubble sonochemiluminescence in aqueous luminol solutions. // *J. Am. Chem. Soc.* 2002. V. 124. P. 10250–10251.
19. *S. Kulmala, T. AlaKleme, M. Latva, K. Haapakka, A. Hakanen*. Sonoluminescence of chelated terbium(III) in aqueous solution. // *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 1996. V. 92. P. 2529–2533.
20. *G.L. Sharipov, A.M. Abdrakhmanov, B.M. Gareev, L.R. Yakshembetova*. Sonochemiluminescence in an aqueous solution of Ru(bpy)₃Cl₂. // *Ultrason. Sonochem.* 2018. V. 42. P. 526–531.
21. *I.B. Berlman*. Handbook of Fluorescence Spectra of Aromatic Molecules / New York: Acad. Press, 1971.
22. *R. Pflieger, A.A. Ndiaye, T. Chave, S.I. Nikitenko*. Influence of Ultrasonic Frequency on Swan Band Sonoluminescence and Sonochemical Activity in Aqueous tert-Butyl Alcohol Solutions. // *J. Phys. Chem. B.* 2015. V. 119. P. 284–290.
23. *G.L. Sharipov, A.M. Abdrakhmanov*. Sonochemiluminescence of aromatic hydrocarbons. // *Rus. Chem. Bull.* 2010. V. 59. P. 1680–1685.
24. *N.N. Barashkov et al.* Excimers of Organic Molecules. // *Russ. Chem. Rev.* 1993. V. 62. P. 539–552.
25. *A.M. Абдрахманов, Л.Р. Якиембетова, Б.М. Гареев, Г.Л. Шарипов*. Новая сонохемилюминесценция бис-(2,4-динитрофенил) оксалата активируемая 9,10-дифенилантраценом. // *Вестник Башкирского университета*. 2022. Т. 27. №3. С. 620–624.