

УДК 691.175.5/8

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2020.2.11

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПРОИЗВОДНЫХ ПОЛИАНИЛИНА**© А. Н. Андриянова*, Л. Р. Латыпова,
Ш. М. Салихов, А. Г. Мустафин***Уфимский институт химии УФИЦ РАН
Россия, Республика Башкортостан, 450054 г. Уфа, пр. Октября, 71.*

Тел.: +7 (347) 235 60 66.

*Email: anastasia.shishkina1993@mail.ru

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к синтезу новых сопряженных полимеров, среди которых производные полианилина занимают лидирующее место. В настоящей работе успешно получены производные полианилина с улучшенной растворимостью. Синтезированные полимеры охарактеризованы методами ЯМР ^1H , ^{13}C , УФ, ИК спектроскопией, элементным анализом, а также изучены их люминесцентные свойства. Представленная в работе модификация полианилина путем включения в орто-положение ароматического кольца алкенильных групп приводит к улучшению ряда физико-химических свойств.

Ключевые слова: производные анилина, полианилин, полимеризация, растворимость, фотолюминесценция.

1. Введение

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к новому классу полимеров с системой сопряженных двойных связей, получаемых по реакции окислительной полимеризации различных ароматических и гетероциклических соединений и созданию электропроводящих материалов на их основе, а также исследованию процессов, приводящих к их получению [1].

Так, на основе полианилина (ПАНИ) и его производных были созданы сенсоры для распознавания различных агрессивных газовых сред, высокочувствительные биосенсоры, а также эффективные антистатические покрытия [2–3]. Показано, что полианилин может оказывать антикоррозионное действие в процессах окислительной коррозии черных металлов и сплавов [4].

Однако, несмотря на значительные перспективы применения ароматических полисопряженных аминов, реальная возможность полномасштабного использования полианилинов ограничивается их низкой растворимостью. Для решения этой проблемы существует несколько подходов: а) допирование ПАНИ неорганическими или органическими кислотами [5–6], б) полимеризация замещенных производных анилина [7–8], в) полимеризация аналогичные преобразования [9], г) сополимеризация анилина с соответствующими замещенными анилинами [10–11]. Одним из наиболее важных направлений модификации ПАНИ является синтез новых функционализированных мономеров анилина с последующим преобразованием в полимеры с улучшенными физико-химическими характеристиками. Известно, что наибольшее положительное влияние на свойства полимера наблюдается в случае производных полианилина с электронно-донорными заместителями [12]. В литературе существует множество примеров успешного синтеза орто-алкилзамещенных полианилинов [12]. По-

добная модификация приводит к значительному улучшению растворимости относительно незамещенного ПАНИ, что является важным показателем для практической значимости материала.

Цель настоящего исследования – синтез новых полимеров на основе 2-(1-метилбут-2-ен-1-ил)анилина и исследование их физико-химических свойств.

2. Экспериментальная часть**2.1. Материалы**

Все растворители, реагенты, как анилин, транс-1,3-пентадиен, перегоняли и сушили перед использованием. Соляная кислота (HCl), сульфат магния (MgSO_4), пероксодисульфат аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) использовались без дополнительной очистки. 4-Хлорпент-2-ен [13], 2-(1-метилбут-2-ен-1-ил)анилин [14], а также 2-(1-метилбут-1-ен-2-ил)анилин [15] синтезировали по описанным методикам.

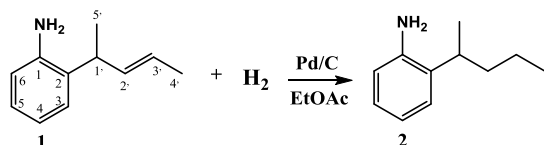
2.2. Синтез и характеристика полимеров

Спектры ЯМР ^1H , ^{13}C записаны на спектрометре Bruker Avance III 500 МГц (500 и 125 МГц) в CDCl_3 , внутренний стандарт – остаточные сигналы растворителя. ИК спектры записывали на приборе IR-Prestige-21 (Fourier Transform Spectrophotometer Shimadzu) в тонком слое. Элементный анализ выполнен на CHNS(O)-анализаторе Евро-2000. Спектры УФ регистрировали на спектрофотометре 2600 Shimadzu в растворе ДМСО при 298 К, длины волн от 190 до 900 нм, используя кварцевую кювету толщиной 1 см. Флуоресцентный спектральный анализ проводили на спектрофлуорофотометре RF-5301 PC Shimadzu в растворе ДМСО при 298 К.

2-(1-метилбутил)анилин (2). К раствору 5.0 г (31.1 ммоль) 2-(1-метилбут-1-ен-2-ил)анилина **1** в 50 мл этилацетате добавляли Pd/C (10% мольных) и перемешивали на магнитной мешалке в атмосфере водорода (схема 1). По окончании реакции (контроль по ТСХ) реакцию массу отфильтровы-

вали, растворитель удаляли при пониженном давлении. Выход 4.5 г (90%). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3 , δ , м.д., $J/\text{Гц}$): 1.02 (3H, т, $^3J = 7.4$, H-4'), 1.34 (3H, д, $^3J = 6.8$, H-5'), 1.38–1.49 (2H, м, H-3^а, H-3^б), 1.60–1.67 (1H, м, H-2^б), 1.71–1.79 (1H, м, H-2^а), 2.84 (1H, м, H-1'), 6.76 (1H, д, $^3J_{6,5} = 7.6$, H-6), 6.89 (1H, т, $^3J_{4,3} = 7.6$, H-4), 7.11 (1H, т, $^3J_{5,6} = 7.6$, H-5), 7.20 (1H, д, $^3J_{3,4} = 7.6$, H-3). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3 , δ , м.д.): 14.36 (C-4'), 20.66 (C-5'), 20.93 (C-3'), 32.71 (C-1'), 39.28 (C-2'), 116.08 (C-6), 119.13 (C-4), 126.21 (C-3), 126.45 (C-5), 132.07 (C-2), 143.63 (C-1).

Схема 1



Поли[2-(1-метилбут-2-ен-1-ил)анилин] (3). К раствору 1.0 г (6.2 ммоль) 2-(1-метилбут-2-ен-1-ил)анилина в 50 мл 0.2 М HCl при комнатной температуре медленно при перемешивании добавляли 1.8 г $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ в 50 мл 0.2 М HCl (схема 2). По мере протекания реакции цвет раствора менялся с желтого на темно-коричневый. Реакция протекала в течение 24 ч при комнатной температуре и постоянном перемешивании. Побочные продукты, сульфат аммония и серную кислоту, удалялись многократным промыванием осадка последовательно в дистиллированной воде и гексане. Полученный фильтрат сушили при пониженном давлении с получением 0.9 г (75%) окисленной формы производного полианилина. ЯМР спектры которого практически идентичны описанным ранее [16].

Поли[2-(1-метилбут-1-ен-1-ил)анилин] (4). Получали по методике синтеза соединения 3 из 1.0 г (6.2 ммоль) 2-(1-метилбут-1-ен-1-ил)анилина 1 и 1.8 г $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$. Выход 1.1 г (88%). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3 , δ , м.д., $J/\text{Гц}$): 0.80–1.03 (м, H-4'), 1.67–1.92 (м, H-3'), 1.98–2.08 (м, H-5'), 5.60–5.74 (м, H-2'), 7.01–7.35 (м, Ph). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3 , δ , м.д.): 14.01 (C-4'), 22.75 (C-3'), 25.32 (C-5'), 127.65–130.23 (C-3, C-5, C-6, C-1'), 134.20 (C-2'), 135.92 (C-2), 140.07 (C-4), 151.41 (C-1).

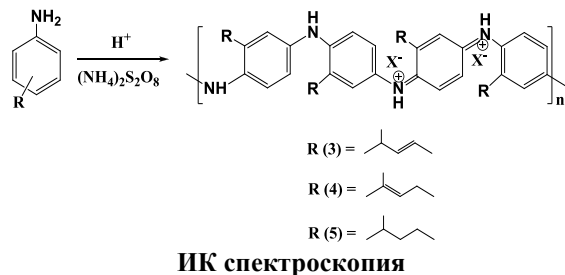
Поли[2-(1-метилбутил)анилин] (5). Получали по методике синтеза соединения 3 из 1.0 г (6.1 ммоль) 2-(1-метилбутил)анилина 2 и 1.8 г $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$. Выход 0.96 г (80%). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3 , δ , м.д., $J/\text{Гц}$): 0.73–0.94 (м, H-4'), 1.10–1.34 (м, H-3', H-5'), 1.43–1.64 (м, H-2'), 2.88–3.05 (м, H-1'), 6.95–7.51 (м, Ph). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3 , δ , м.д.): 14.19 (C-4'), 20.71 (C-3'), 21.60 (C-5'), 33.48 (C-1'), 39.75 (C-2'), 125.68–127.68 (C-3, C-5, C-6), 130.88 (C-2), 143.11 (C-4), 150.45 (C-1).

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Полимеризация

Полимеризацию проводили с использованием $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ и 0.2 М HCl (схема 2). Продукт промывали большим количеством этанола с получением темно-коричневого цвета производного полианилина.

Схема 2



ИК спектроскопия

ИК спектры синтезированных образцов представлены на рис. 1.

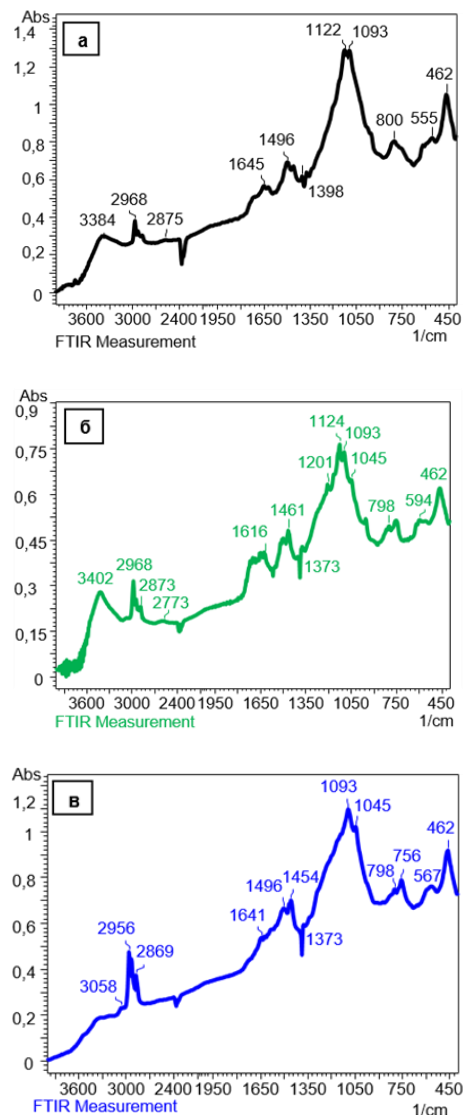


Рис. 1. ИК спектры синтезированных полианилинов: а – образец 3, б – образец 4, в – образец 5.

Во всех ИК спектрах полученных полимеров отмечается широкая полоса около $3359\text{--}3364\text{ см}^{-1}$ соответствует колебаниям связи $\text{N}\text{--}\text{H}$. Максимум поглощения в области $2968\text{--}2958\text{ см}^{-1}$ соответствует валентным колебаниям связи $\text{C}\text{--}\text{H}$. Пики при 2875 , 2873 и 2869 см^{-1} характерны для связи $\text{C}\text{--}\text{H}$ в

алифатическом заместителе. Валентные колебания бензюидной и хиноидной формы в полимерах наблюдались при 1454–1496 и 1616–1645 см^{-1} соответственно. Валентные колебания связи C–N наблюдались при 1373–1398 см^{-1} . Очень важным для полианилинов является пик при 1124–1093 см^{-1} , который соответствует допированному состоянию ($=\text{N}^+/-\text{N}^{+-}$) [17]. На спектре образца **4** присутствует полоса при 1201 см^{-1} , характеризующая деформационное колебание вторичного ароматического амина C–N⁺, которое свидетельствует об образовании полярной структуры. Поглощение около 1045, 798–800 см^{-1} относится к деформационным колебаниям C–H в плоскости 1,4-положения фенильного кольца в основной цепи [16].

3.2. Элементный анализ

Данные элементного анализа подтверждают окисленную форму полимера и результаты согласуются с результатами ИК и УФ спектров в образовании эмеральдина (табл. 1).

Таблица 1

Атомное содержание С, Н, N и Cl
в образцах полианилинов

Полимер	Атомный процент (%)			
	С	Н	N	Cl
3	67.08	5.78	7.57	5.95
4	67.21	5.59	7.13	3.33
5	73.12	7.51	6.69	4.17

3.3. УФ-спектроскопия

Электронные спектры поглощения синтезированных образцов, снятые в ДМСО, представлены на рис. 2. Для ПАНИ характерны два максимума поглощения $\lambda_1 = 320$ нм и $\lambda_2 = 610$ нм [18]. Первый максимум соответствует π - π^* -электронному переходу между соседними ароматическими кольцами, а второй максимум поглощения – n - π^* -электронному переходу в хиноидном фрагменте макромолекулярной цепи. Известно, что заместители в ароматическом кольце производных ПАНИ оказывают два эффекта: стерический и электронный в зависимости от природы радикала.

Объемная структура алкильных/алкенильных заместителей способствует увеличению угла кручения полимерной цепи, что демонстрируется гипсохромным сдвигом в спектрах поглощения. Электронные спектры исследуемых образцов отличаются от ПАНИ (табл. 2). Синтезированные полимеры демонстрируют максимум поглощения на УФ-видимом спектре при 285–298 нм. Данный пик имеет гипсохромный сдвиг относительно ПАНИ, причиной которого является стерический эффект, вызванный заместителями в ароматическом кольце полимера. Второй максимум при 540 нм присутствует только на спектре образца **5**. Можно предположить, что количество хиноидных фрагментов в образце **5** значительно больше, чем в образцах **3** и **4**.

Из этого следует, что синтезированные образцы **3** и **4** находятся в лейкоэмеральдиновой форме, а образец **5** в эмеральдиновой форме.

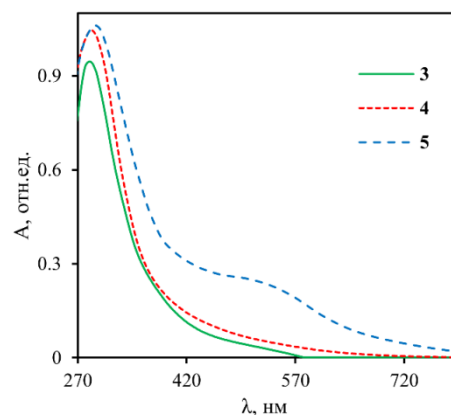


Рис. 2. УФ спектры синтезированных полимеров.

Представленные УФ спектры исследуемых образцов подтверждают существенное влияние алифатического заместителя на смещение максимумов поглощения относительно ПАНИ. Следует отметить, что электронодонорный эффект функциональной группы в *орто*-положении ароматического кольца характеризуется гипсохромным сдвигом первого пика поглощения.

3.4. Люминесценция

На рис. 3 показаны спектры флуоресценции исследуемых образцов в растворе ДМСО полученные при комнатной температуре.

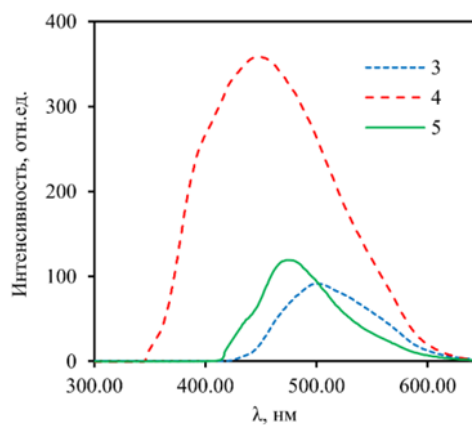


Рис. 3. Спектры люминесценции синтезированных полимеров.

Таблица 2

Люминесцентные и оптические свойства полимеров

Полимер	Поглощение		λ_{Ex} , нм	λ_{Em} , нм
	λ_{1} , нм	λ_{2} , нм		
ПАНИ [16]	320	610	–	–
3	285	–	430	500
4	290	–	350	456
5	298	540	420	479

Растворимость полученных производных полианилина в различных растворителях

Полимер	Растворители									
	ДМСО	ДФФА	CHCl ₃	MeCN	MeOH	Ацетон	ТГФ	Толуол	Гексан	Бензол
3	***	***	**	*	**	**	*	*	*	*
4	***	***	**	**	**	**	*	*	*	*
5	***	***	***	***	**	***	***	*	*	*

Примечание: * – не растворим или плохо растворим (<10%), ** – частично растворим (<50%), *** – полностью растворим (>90%).

Флуоресцентные свойства сопряженных полимеров объясняются с точки зрения зонной теории полупроводников. Под действием излучения электроны переходят из валентной зоны сопряженного полимера в зону проводимости и затем мигрируют обратно в полимерную цепь. Возбужденный электрон и противоположно заряженная дырка притягивают друг друга и при их рекомбинации фотон излучается в виде флуоресценции [19].

В литературных источниках упоминалось о люминесцентных свойствах ПАНИ в растворе N-метилпирролидона, однако в растворе ДМСО флуоресценция не наблюдалась [19].

Исследование люминесцентных свойств образцов с разными алифатическими заместителями в *орто*-положении показало, что положение двойной связи оказывает существенное влияние на значение интенсивности люминесценции (рис. 3). Как видно из флуоресцентных спектров, интенсивность образца **4** в существенно превышает интенсивность **3** и **5** образцов. Также следует отметить, что максимум свечения смещается, что возможно обусловлено изменением функциональной группы в *орто*-положении ароматического кольца.

Таким образом, модифицирование полианилина алкенильными радикалами приводит к появлению люминесцентных свойств, ранее не обнаруженных для ПАНИ в данном растворителе. Интенсивность эмиссии исследуемых образцов в значительной степени определяется природой функциональной группы.

3.5. Растворимость

Одним из основных недостатков ПАНИ является его низкая растворимость в известных органических растворителях. С этой целью была оценена растворимость синтезированных полимеров **3**, **4** и **5** в отличающихся по природе органических растворителях. Полученные данные представлены в табл. 3.

Данные табл. 3 позволяют сделать вывод: включение алифатических заместителей в *орто*-положение ароматического кольца во всех случаях приводит к значительному улучшению растворимости синтезированных полимерных образцов. Данный факт обусловлен тем, что функциональная группа приводит к увеличению гибкости полимера и как следствие повышению его растворимости. Следует отметить, что образец **5** обладает наилучшей растворимостью среди исследуемых образцов, что также обусловлено образованием более гибкой структуры.

Выводы

В настоящей работе успешно получены производные полианилина с улучшенной растворимостью. Синтезированные полимеры охарактеризованы методами ЯМР, УФ, ИК спектроскопией, элементным анализом, а также изучены их люминесцентные свойства.

Полученные результаты демонстрируют значительное влияние функциональной группы на растворимость, оптические и люминесцентные свойства. Алифатический заместитель приводит к повышению гибкости полимерной структуры и как следствие росту растворимости. Установлено влияние функциональной группы на интенсивность люминесцентного свечения. Полианилин **4**, в котором заместитель содержит двойную связь в винильном положении от ароматического кольца, демонстрирует наибольшую интенсивность фотолюминесценции.

Таким образом, модификация полианилина путем включения в *орто*-положение ароматического кольца алкенильных групп приводит к улучшению физико-химических свойств.

В работе использовали оборудование Центра коллективного пользования «Химия» Уфимского института химии УФИЦ РАН. Работа выполнена по теме госзадания АААА-А19-119020890014-7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abu-Thabit N. Y. Chemical Oxidative Polymerization of Polyaniline: A Practical Approach for Preparation of Smart Conductive Textiles // J. Chem. Educ. 2016. Vol. 93. P. 1606–1611.
2. Anilkumar P., Jayakannan M. Hydroxyl-Functionalized Polyaniline Nanosphere: Tracing Molecular Interactions at the Nanosurface via Vitamin C Sensing // Langmuir. 2008. Vol. 24. P. 9754–9762.
3. Krzyczmonik P., Socha E. Electrodes modified with composite layers of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) and polyaniline (PANI) for applications in bioelectroanalysis // Chemik. Vol. 67. P. 801–810.
4. Yepez G., Poyil A. N., Bugarin A. Large-Scale Synthesis of Aniline Trimers in Different Oxidation // Synthesis. 2019. Vol. 51. P. 3611–3616.
5. Vivekanandan J., Ponnusamy V., Mahudswaran A., Vijayanand P. S. Synthesis and characterization and conductivity study of polyaniline by chemical oxidative and electrochemical methods // Arch. Appl. Sci. Res. 2011. №3. P. 147–153.
6. Verma D., Dutta V. Role of novel microstructure of polyaniline-CSA thin film in ammonia sensing at room temperature // Sens. Actuat. B: Chem. 2008. №134. P. 373–376.
7. Kabomo T. M., Scurrill M. S. The effects of ring substituents in aniline on the reactivity of PANI with hydrogen tetrachloroaurate and the dispersion of gold nanoparticles // Polym Adv Technol. 2016. №27. P. 759–764.

8. Ortega E., Armijo F., Jessop I., Del Valle M. A., Díaz F. R. Chemical synthesis and characterization of polyaniline derivatives: substituent effect on solubility and conductivity // *J. Chil. Chem. Soc.* 2013. №58. P. 1959–1962.
9. Barbero C., Salavagione H. J., Acevedo D. F., Grumelli D.E., Garay F., Planes G. A., Miras M.C. Novel synthetic methods to produce functionalized conducting polymers // *I. Polyanilines, Electrochim. Acta.* 2004. №49. P. 3671–3686.
10. Waware U. S., Hamouda A. M., Rashid M., Summers G. J. The spectral and morphological studies of the conductive polyaniline thin film derivatives by the in situ copolymerization // *J. Mater. Sci.-Mater. El.* 2017. №28. P. 15178–15183.
11. Thota A., Arukula R., Narayan R., Rao C. R., Raju K.V.S.N. Energy storage and surface protection properties of dianiline co-polymers // *RSC Advances.* 2015. №5. P. 106523–106535.
12. Modarresi-Alam A. R., Amirazizi A. R., Movahedifar F., Farrokhzadeh A., Asli G. R., & Nahavandi H. The first report of polymerization and characterization of aniline bearing chiral alkyl group on ring via covalent bond; poly [(±)-2-(sec-butyl) aniline] // *Journal of Molecular Structure.* 2015. P. 1083.
13. Cope A. C., Hardy E. M. J. The Introduction of Substituted Vinyl Groups. V. A Rearrangement Involving the Migration of an Allyl Group // *Am. Chem. Soc.* 1940. Vol. 62. P. 441–444.
14. Абдрахманов И. Б., Шарафутдинов В. М., Сагитдинов И. А., Толстикова Г. А. О случае легкого протекания перегруппировки Кляйзена N-(1-метил-2-бутинил)анилина // *Ж. орг. химии.* 1979. Т. 15. №12. С. 2601–2606.
15. Гатауллин Р. Р., Афонькин И. С., Фатыхов А. А., Абдрахманов И. Б. Синтез 1-бензоксазинов из орто-алкениланилинов // *ХГС.* 2002. №3. С. 367.
16. Andriianova A. N., Shigapova A., Biglova Y. N., Salikhov R., Abdrakhmanov I. B., Mustafin A. G. Synthesis and Physicochemical Properties of (Co)polymers of 2-[(2E)-1-methyl-2-buten-1-yl]aniline and Aniline // *Chin. J. Polym. Sci.* 2019. №37. С. 774–782.
17. Quillard S., Louarn G., Buisson J. P., Boyer M., Lapkowski M., Pron A. Vibrational spectroscopic studies of the isotope effects in polyaniline // *Synth. Met.* 1997. №84. P. 805–806.
18. Wang P., Tan K. L., Zhang F., Kang E. T., Neoh K. G. Synthesis and characterization of poly(ethyleneglycol)-grafted polyaniline // *Chem. Mater.* 2001. №13. P. 581–587.
19. Rafiqi F. A., Majid K. Synthesis, characterization, luminescence properties and thermal studies of polyaniline and polythiophene composites with rare earth terbium (III) complex // *Synth. Met.* 2015. №202. P. 147–156.

Поступила в редакцию 16.09.2019 г.

После доработки – 17.12.2019 г.

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF ORTHO-ALKYL DERIVATIVES OF POLYANILINE

© A. N. Andriianova*, L. R. Latypova, Sh. M. Salikhov, A. G. Mustafin

*Ufa Institute of Chemistry of RAS
71 Oktyabrya Avenue, 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (347) 235 60 66.

**Email: anastasia.shishkina1993@mail.ru*

In recent years, there has been an increasing interest in the synthesis of new conjugated polymers, among which polyaniline derivatives occupy a leading position. There are several methods for modifying polyaniline to improve its physicochemical properties. The most promising way to improve solubility is the synthesis of alkyl-substituted derivatives of polyaniline. In the present work, ortho-alkyl substituted polyaniline derivatives with improved solubility were successfully obtained. The synthesized polymers were characterized by ^1H , ^{13}C , UV-, IR- spectroscopy, elemental analysis, and their luminescent properties were studied. It was established that the obtained polymers were in emeraldine form, which was electrically conductive. The results showed a significant effect of the functional group on solubility, optical and luminescence properties. The inclusion of the aliphatic substituent led to increase in flexibility of the polymer structure and solubility. The influence of the functional group on the intensity of the luminescent emission was also established. Changing in the position of the double bond in the substituent led to an increase in the luminescent properties of the studied polymers. For example, the polymer, which contains a double bond in the vinyl position in the substituent, showed the highest photoluminescence intensity. The modification of polyaniline presented in the work by including alkenyl groups in the ortho position of the aromatic ring led to an improvement in a number of physicochemical properties.

Keywords: ortho-alkyl derivatives of aniline, polymerization, solubility, photoluminescence.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Abu-Thabit N. Y. *J. Chem. Educ.* 2016. Vol. 93. Pp. 1606–1611.
2. Anilkumar P., Jayakannan M. *Langmuir*. 2008. Vol. 24. Pp. 9754–9762.
3. Krzyczmonik P., Socha E. *Chemik*. Vol. 67. Pp. 801–810.
4. Yezep G., Poyil A. N., Bugarin A. *Synthesis*. 2019. Vol. 51. Pp. 3611–3616.
5. Vivekanandan J., Ponnusamy V., Mahudeswaran A., Vijayanand P. S. *Arch. Appl. Sci. Res.* 2011. No. 3. Pp. 147–153.
6. Verma D., Dutta V. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008. No. 134. Pp. 373–376.
7. Kabomo T. M., Scurrell M. S. *PolymAdv Technol*. 2016. No. 27. Pp. 759–764.
8. Ortega E., Armijo F., Jessop I., Del Valle M. A., Díaz F. R. *J Chil. Chem. Soc.* 2013. No. 58. Pp. 1959–1962.
9. Barbero C., Salavagione H. J., Acevedo D. F., Grumelli D.E., Garay F., Planes G. A., Miras M.C. I. *Polyanilines, Electrochim. Acta*. 2004. No. 49. Pp. 3671–3686.
10. Waware U. S., Hamouda A. M., Rashid M., Summers G. J. *J. Mater. Sci-Mater. El.* 2017. No. 28. Pp. 15178–15183.
11. Thota A., Arukula R., Narayan R., Rao C. R., Raju K.V.S.N. *RSC Advances*. 2015. No. 5. Pp. 106523–106535.
12. Modarresi-Alam A. R., Amirazizi A. R., Movahedifar F., Farrokhzadeh A., Asli G. R., & Nahavandi H. *Journal of Molecular Structure*. 2015. Pp. 1083.
13. Cope A. C., Hardy E. M. *J. Am. Chem. Soc.* 1940. Vol. 62. Pp. 441–444.
14. Abdrakhmanov I. B., Sharafutdinov V. M., Sagitdinov I. A., Tolstikov G. A. *Zh. org. khimii*. 1979. Vol. 15. No. 12. Pp. 2601–2606.
15. Gataullin R. R., Afon'kin I. S., Fatykhov A. A., Abdrakhmanov I. B. *KhGS*. 2002. No. 3. Pp. 367.
16. Andriianova A. N., Shigapova A., Biglova Y. N., Salikhov R., Abdrakhmanov I. B., Mustafin A. G. *Chin. J. Polym. Sci.* 2019. No. 37. Pp. 774–782.
17. Quillard S., Louam G., Buisson J. P., Boyer M., Lapkowski M., Pron A. *Synth. Met.* 1997. No. 84. Pp. 805–806.
18. Wang P., Tan K. L., Zhang F., Kang E. T., Neoh K. G. *Chem. Mater.* 2001. No. 13. Pp. 581–587.
19. Rafiqi F. A., Majid K. *Synth. Met.* 2015. No. 202. Pp. 147–156.

Received 16.09.2019.

Revised 17.12.2019.