



УДК 543.544

ВЭЖХ-масс-спектрометрический анализ трехкомпонентной реакции с участием 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолона и различных аминоазолов

© 2020 Поликарчук В.А., Потапов А.Ю., Разумова В.Э.,
Вережников В.Н., Шихалиев Х.С., Кострюков В.Ф., Столповская Н.В.

Воронежский государственный университет, Воронеж

Поступила в редакцию 13.10.2020 г.

DOI: 10.17308/sorpchrom.2020.20/3141

Современный рациональный дизайн структур органических соединений требует высокой эффективности вследствие необходимости одновременного повышения молекулярной сложности и минимизации числа стадий синтетических процедур. Эти проблемы становятся еще более значимыми при конструировании различных полиазагетероциклических структур, в том числе с пиримидиновым скелетом, являющимся одним из самых распространенных фрагментов в структурах природных и синтетических биологически активных соединений. Поэтому, актуальными являются проблемы, связанные с поиском новых селективных синтетических подходов к построению пиримидиновых гетероциклических систем, изучением механизмов их образования, реакционной способности и дальнейшей направленной функционализации, выбора доступных реагентов для их синтеза.

В настоящее время получение новых гетероциклических соединений мультикомпонентными методами, рассматривается как наиболее перспективное, с точки зрения создания комбинаторных библиотек для высокопроизводительного биологического скрининга, позволяющего *in vitro* одновременно протестировать тысячи соединений на различные виды биоактивности. Основным направлением решения данных задач является модернизация синтетических процедур посредством внедрения методологий мультикомпонентных и каскадных процессов.

Кроме этого, основной проблемой при исследовании трехкомпонентных каскадных реакций с использованием различных полинуклеофильных матриц является определение последовательности процессов, приводящих к целевым продуктам. Для реализации этой задачи необходимы сведения о строении промежуточных соединений, возможность индивидуализации которых традиционными препаративными методами весьма затруднительна.

Методом ВЭЖХ совмещенной с масс-спектрометрией изучен маршрут трехкомпонентного взаимодействия аминоазолов с 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолоном и диметилацеталем *N,N*-диметилформамида. Показано, что ожидаемые азолопиримидо[5,4-с]хинолин-6(7*H*)-оны образуются лишь в минорном количестве, а основным продуктом этого взаимодействия является 3,3'-бихинолин-2,2',4,4'(1,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрон, образующийся при окислительной димеризации 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолонона под действием кислорода воздуха. При замене диметилацетала *N,N*-диметилформамида на триэтилортоформиат был выделен исключительно 3,3'-бихинолин-2,2',4,4'(1,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрон. Исследование состава маточного раствора показал трудноразделимую смесь, в которой присутствовали в остаточных количествах исходные реагенты 3,3'-бихинолин-2,2',4,4'(1,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрон, а также целевой азолопиримидо[5,4-с]хинолин-6(7*H*)-он.

Ключевые слова: высокоэффективная жидкостная хроматография, масс-спектрометрия, 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолон, аминоазолы, 3,3'-бихинолин-2,2',4,4'(1,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрон.

Введение

Синтез соединений, принадлежащих к ряду 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолонов, составляет важную область исследований, поскольку они нашли применение в каче-

стве анальгетиков [1], красителей [2], нейролептиков [3], иммуномодуляторов [4], противораковых [5], антибактериальных [6], противотуберкулезных [7] и противогепатитных средств [8]. Они также привлекли значительный интерес как антагонисты глицинового рецептора *NMDA* (N-метил-D-аспартат) и серии рецепторов *5-HT3* (5-гидрокситриптамин тип 3), связанных с некоторыми расстройствами центральной нервной системы, включая инсульт, эпилепсию, шизофрению, болезни Паркинсона и Альцгеймера [9–12]. Кроме того, недавно было обнаружено, что 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолоны служат ключевыми промежуточными продуктами в синтезе непептидных антагонистов рецепторов *GnRH* (гонадотропин-рилизинг-гормонов). Такие соединения представляют интерес для лечения патологий, связанных с половыми гормонами [13].

4-Гидрокси-2(1*H*)-хинолон является универсальным и удобным предшественником для синтеза широкого спектра гетероциклических соединений [14]. Он представляет особый интерес как очень перспективный реагент – стартовый билдинг-блок мультикомпонентных реакций гетероциклизации для быстро развивающейся комбинаторной химии. Эта новая методология, основанная на автоматических высокотехнологичных методах синтеза, позволяет синтезировать большое количество новых органических соединений в качестве объектов для широкомасштабного биологического скрининга.

Енольный реакционный центр в этом соединении открывает широкие возможности для разнообразных реакций гетероциклизации. Наиболее известной из которых является аннелирование пиранового цикла к 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолону в результате взаимодействия с этоксиметиленпроизводными малонитрила [15], оксазолон [16], с диметиламинометилиденпроизводным ацетиламинопропионата [17]. Также известны трехкомпонентные реакции синтеза пирано[3,2-с]хинолинонов с использованием в качестве синтонов триметилортоформиата [18] и альдегидов [19]. Однако, аннелирование пиримидинового цикла к 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолону не изучено. В связи с этим, целью нашего исследования являлось изучение направлений и вероятных маршрутов трехкомпонентного взаимодействия 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолона с аминазолами и диметилацеталем N,N-диметилформамида. Для решения подобных задач все чаще стали использовать масс-спектрометрию в сочетании с жидкостной хроматографией (ВЭЖХ-МС), позволяющей анализировать составы промежуточных и конечных продуктов реакций [20-23].

Экспериментальная часть

Фильтрация выпавших в осадок продуктов реакции проводили с использованием водоструйного вакуумного насоса (15 мм.рт.ст.) и фильтрующей воронки ВФ-1-20 с пористостью 40. Осадок промывали небольшим количеством этанола и высушивали при комнатной температуре. Хромато-масс-спектрометрический анализ проводился на приборе Agilent Technologies 1260 infinity с масс-детектором Agilent 6230 TOF LC/MS (времяпролетный детектор масс высокого разрешения), метод ионизации – двойное электрораспыление (dual-ESI). Запись и регистрация сигналов проводилась в положительной полярности; давление небулайзера (распылителя) 20 psig, газ-осушитель (N₂) 6 см³/мин, 325°C; диапазон обнаружения масс составляет 50-2000 Дальтон. Напряжение на капилляре 4.0 кВ, фрагментаторе +191 В, скиммере +66 В, OctRF 750 В. Для разделения использовалась колонка Poroshell 120 EC-C18 (4.6x50 мм; 2.7 мкм) при температуре 40 °С. Хроматографическое разделение проводили в линейном градиентном режиме элюирования. Подвижная фаза состояла из элюента А: 60% ацетонитрила, 0.1% муравьиной кислоты/вода; элюента В: 0.1% му-

равьиной кислоты/ацетонитрил. Скорость потока подвижной фазы составляла 0.4 см³/мин. Объем вводимой пробы 1.5 мкл. Программное обеспечение для обработки результатов исследований – MassHunter Workstation / Data Acquisition V.06.00.

Обсуждение результатов

Реакцию 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолона 1 с диметилацеталем *N,N*-диметилформаида 2 и аминоазолами 3, 4 проводили при кипячении в *N,N*-диметилформамиде, в течение нескольких часов (схема 1). Выпавшие в осадок продукты реакции были отделены вакуумным фильтрованием и проанализированы с помощью ВЭЖХ-МС.

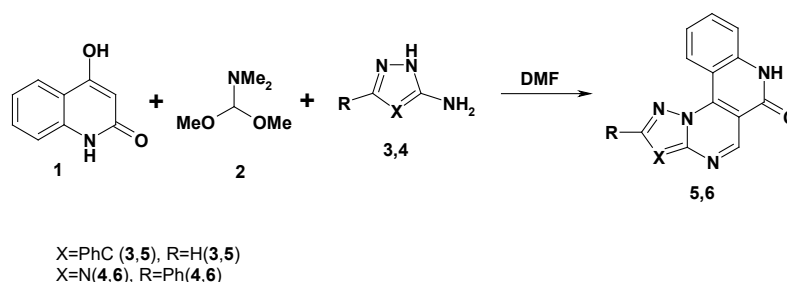


Схема 1

На приведенной в качестве примера хроматограмме (рис. 1) видно, что продукт реакции с 3-фениламинотриазолом в качестве основного вещества содержит соединение имеющих массу протонированного молекулярного иона m/z 321.0823 $[M+H]^+$ и примесь ожидаемого 2-фенил-[1,2,4]триазолопиримидо[5,4-с]хинолин-6(7*H*)-она 6 (m/z 314.1031 $[M+H]^+$).

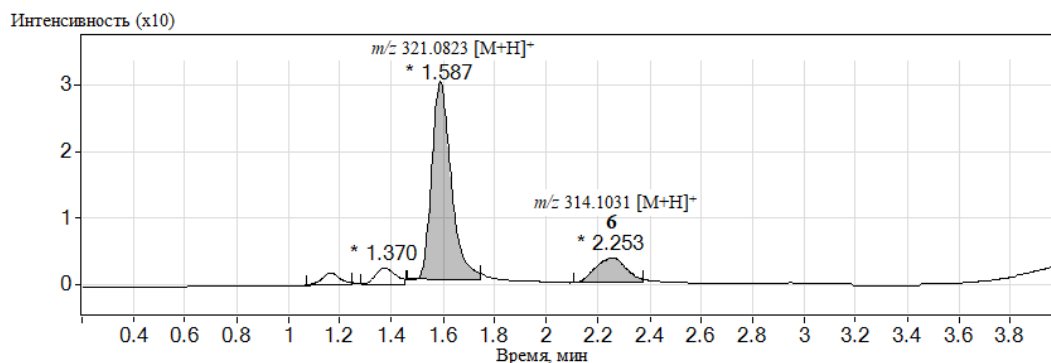


Рис. 1. Интегрированная сканированная хроматограмма полного ионного тока для продукта реакции с 3-фениламинотриазолом.

Fig. 1. Integrated scanned chromatogram of the total ionic current for the reaction product with 3-phenylaminotriazole.

При попытке повторить описанную выше реакцию с аминоазолами 3 и 4, заменив при этом диметилацеталь *N,N*-диметилформаида 2 на его синтетический эквивалент триэтилортоформиат 7 (схема 2), найдено, что продукты этого взаимодействия содержат вещество с той же массой протонированного молекулярного иона m/z 321, но уже без примеси целевых соединений 5, 6 (рис. 2).

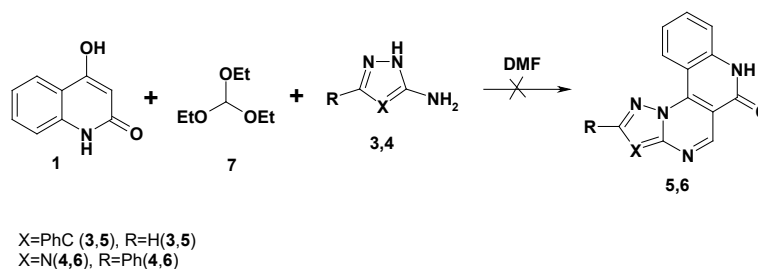


Схема 2

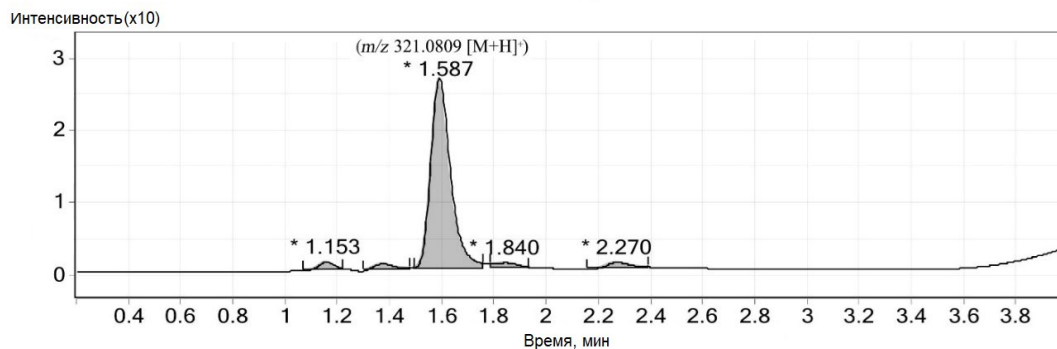


Рис. 2. Интегрированная сканированная хроматограмма полного ионного тока для продукта реакции с 4-фениламинопиразолом.

Fig. 2. Integrated scanned chromatogram of the total ion current for the reaction product with 4-phenylaminopyrazole.

Из полученных данных можно сделать вывод, что продукт с m/z 321 $[M+H]^+$ является результатом реакции исходных реагентов без участия аминоазолов 3 и 4. Наиболее вероятно, что это соединение является результатом димеризации исходного гидроксхинолона в 3,3'-бихинолин-2,2',4,4' (1*H*,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрон 8. Известно, что кумарины, как соединения схожие по химическим свойствам с 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолоном, могут образовывать подобные бис-продукты при окислении [24]. Так как реакция протекала продолжительное время, вероятно в нашем случае, в качестве окислительного агента выступил кислород воздуха (схема 3).

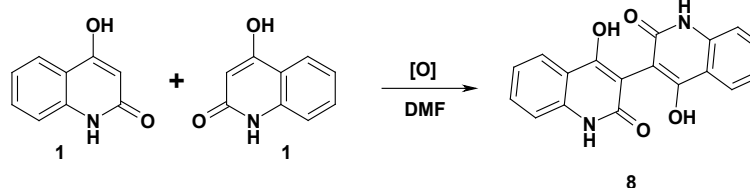


Схема 3.

Важно отметить, что выходы 3,3'-бихинолин-2,2',4,4' (1*H*,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрона 8 в двух проверенных экспериментальных условиях оказались достаточно высоки и составляли 74-82%. Для подтверждения полноты выделения образующегося вещества 8, а также того факта, что он является мажорным продуктом, нами был проведен ВЭЖХ-МС анализ фильтрата реакции с 3-фениламинотриазолом. На хроматограмме (рис.3) видна трудноразделимая смесь, в которой присутствуют в минорных относительных количествах исходные 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолон 1 (m/z 162.0552 $[M+H]^+$), 3-фениламинотриазол 4 (m/z 161.0828 $[M+H]^+$) и в остаточном количестве бис-продукт 8 (321.0823 $[M+H]^+$). Также присутствует в относительно небольшом количестве целевой 2-фенил-[1,2,4]триазолопиримидо[5,4-с]хинолин-6(7*H*)-он 6 (m/z 314.1031 $[M+H]^+$), выделить который не удалось.

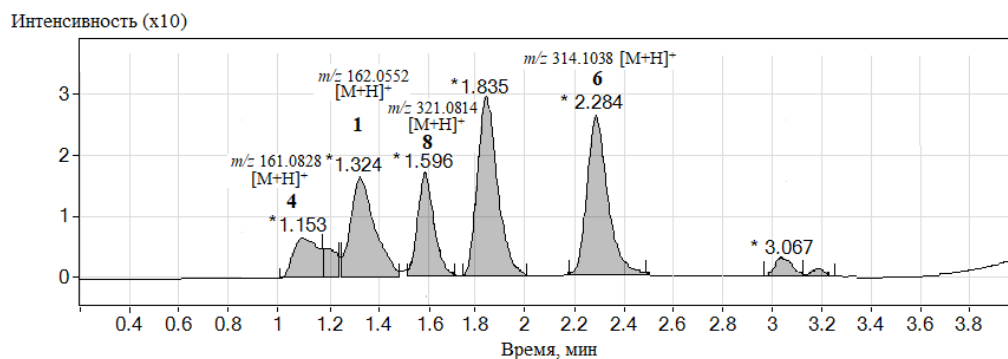


Рис. 3. Интегрированная сканированная хроматограмма полного ионного тока для фильтрата реакции с 3-фениламинотриазолом.

Fig. 3. Integrated scanned chromatogram of the total ion current for the reaction filtrate with 3-phenylaminotriazole.

Заключение

Таким образом, с помощью ВЭЖХ-МС установлено, что реакция между 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолоном, аминоазолами и диметилацеталем *N,N*-диметилформамида или ортоформиатом приводит, через стадии окислительных процессов, к образованию 3,3'-бихинолин-2,2',4,4'(1*H*,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрона с высоким выходом и лишь в небольшом количестве образуются азолопиримидо[5,4-*c*]хинолин-6(7*H*)-оны. Показано, что маточный раствор является трудноразделимой смесью, в которой присутствуют в остаточных количествах 4-гидрокси-2(1*H*)-хинолон, аминоазолы и 3,3'-бихинолин-2,2',4,4'(1*H*,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрон, а также в небольшом относительном количестве целевые азолопиримидо[5,4-*c*]хинолин-6(7*H*)-оны. Можно констатировать, что в результате нашего исследования найден эффективный одностадийный способ получения 3,3'-бихинолин-2,2',4,4'(1*H*,1'*H*,3*H*,3'*H*)-тетрона, являющегося ценным билдинг-блоком для использования в последующих реакциях гетероциклизации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2020-2022 годы, проект № FZGU-2020-0044.

Список литературы

1. Украинец И.В., Горохова О.В., Таран С.Г., Безулай П.А. // *Хим. Гетероцикл. Соед.* 1994. Т. 7. С. 958-966.
2. Ziegler F., Kappe Th., Salvador R. // *Monatsh. Chem.* 1963. Vol. 94. pp. 453-459. DOI.org/10.1007/BF00900278.
3. Kulagowski J.J., Baker R., Curtis N.R., Leeson P.D. et al. // *J. Med. Chem.* 1994. Vol. 37. No 10. pp. 1402-1405. DOI: 10.1021/jm00036a002.
4. Manera C., Malfitano A.M., Parkkari T., Lucchesi V. et al. // *Eur. J. Med. Chem.* 2015. Vol. 97. pp. 10-18. DOI: 10.1016/j.ejmech.2015.04.034.
5. Sabbah D.A., Hishmah B., Sweidan K., Bardaweel S. et al. // *Anticancer Agents Med Chem.* 2018. Vol. 18. No 2. pp. 263-276. DOI: 10.2174/1871520617666170911171152.
6. Sarveswari S., Vijayakumar V., Siva R., Priya R. // *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2015. Vol. 175. No 1. pp. 43-64. DOI: 10.1007/s12010-014-1256-9.
7. Dodia N., Shah A. // *Indian J. Het. Chem.* 1999. Vol. 9. No. 2. pp. 139-142.
8. Tedesco R., Shaw A.N., Bambal R., Chai D. et al. // *J. Med. Chem.* 2006. Vol. 49. No 3. pp. 971-983. DOI: 10.1021/jm050855s.

9. MacLeod A.M., Grimwood S., Barton C., Bristow L. et al. // *J. Med. Chem.* 1995. Vol. 38. No 12. pp. 2239-2243. DOI: 10.1021/jm00012a024.
10. Rowley M., Leeson P.D., Stevenson G. I., Moseley A.M. et al. // *J. Med. Chem.* 1993. Vol. 36. No 22. pp. 3386-3396. DOI: 10.1021/jm00074a020.
11. Zhou Z.L., Navratil J.M., Cai S.X., Whittemore E.R. // *Bioorg. Med. Chem.* 2001. Vol. 9. No 8. pp. 2061-2071. DOI: 10.1016/S0968-0896(01)00115-8.
12. Cai S.X., Zhou Z.L., Huang J.C., Whittemore E.R. et al. // *J. Med. Chem.* 1996. Vol. 39. No 23. pp. 4682-4686. DOI: 10.1021/jm960520y.
13. DeVita R.J., Hollings D.D., Goulet M.T., Wyvratt M.J. // *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 1999. Vol. 9. No 1. pp. 2615-2620. DOI: 10.1016/S0960-894X(99)00446-1.
14. Abdou M.M. // *Arabian J. Chem.* 2018. Vol. 11. No 7. pp. 1061-1071. DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.11.021.
15. Mulwad V.V., Hegde A.S., Suryanarayan V. // *Indian J. Chem.* 1999. Vol. 38B. pp. 148-151.
16. Kepe V., Kocevar M., Petric A., Polanc S. et al. // *Heterocycles (Sendai)*. 1992. Vol. 33. No 2. pp. 843-849.
17. Ngadjui B.T., Ayafor J.F., Bilon A.N., Sondengam B.L. et al. // *Tetrahedron*. 1992. Vol. 48. No 40. pp. 8711-8724. DOI: 10.1016/S0040-4020(01)89446-1.
18. Kmetić M., Stanovnik B., Tisler M., Kappe T. // *Heterocycles (Sendai)*. 1993. Vol. 35. No 2. pp.1331-1339.
19. Sowellim S.Z.A., El-Taweel F. M.A., Elagamey A.A. // *Egypt. J. Chem.* 1995. Vol. 38. No 5. pp. 511-522. DOI: 10.1016/j.tetlet.2013.03.044.
20. Шихалиев Х.С., Селеменов В.Ф., Медведева С.М., Пономарева Л.Ф. и др. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2014. Т. 14. № 2. С. 332-337.
21. Медведева С.М., Шихалиев Х.С. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2014. Т. 14. № 4. С. 696-702.
22. Медведева С.М., Шихалиев Х.С., Крыльский Д.В., Синяева Л.А. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2014. Т. 14. № 6. С. 970-976
23. Шихалиев, Х. С., Вандышев, Д. Ю., Потапов, А. Ю., Крысин, М. Ю., и др. // *Сорбционные и хроматографические процессы*, 2017. Т. 17. № 3. С. 490-495.
24. Ferguson J., Zeng F., Alper H. // *Org. Lett.* 2012. Vol. 14. No. 21. pp. 5602-5605. DOI: 10.1021/ol302725x.

HPLC-mass spectrometric analysis of a three-component reaction involving 4-hydroxy-2(1H) – quinolone and various aminoazoles

© 2020 Polikarchuk V.A., Potapov A.Yu., Razumova V.E., Verezhnikov V.N., Shikhaliev H.S., Kostryukov V.F., Stolpovskaya N.V.

Voronezh State University, Voronezh

Modern rational design of structures of organic compounds requires high efficiency due to the need to simultaneously increase the molecular complexity and minimize the number of stages of synthetic procedures. These problems become even more significant when designing various polyazaheterocyclic structures, including those with the pyrimidine skeleton, which is one of the most common fragments in the structures of natural and synthetic biologically active compounds. Therefore, the problems associated with the search for new selective synthetic approaches to the construction of pyrimidine heterocyclic systems, the study of the mechanisms of their formation, reactivity and further directed functionalization, and the choice of available reagents for their synthesis are relevant.

Currently, the production of new heterocyclic compounds by multicomponent methods is considered as the most promising, from the point of view of creating combinatorial libraries for high-performance biological screening, which allows in vitro simultaneous testing of thousands of compounds for various types of bioactivity. The main direction of solving these problems is the modernization of synthetic procedures through the introduction of multi-component and cascade process methodologies.

In addition, the main problem in the study of three-component cascade reactions using various polynucleophilic matrices is to determine the sequence of processes leading to the target products. To implement

this task, we need information about the structure of intermediate compounds, the possibility of individualization of which by traditional preparative methods is very difficult.

The route of three-component interaction of aminoazoles with 4-hydroxy-2(1H)-quinolonone and dimethyl acetal N,N-dimethylformamide was studied by HPLC combined with mass spectrometry. It is shown that the expected azolopyrimido [5,4-c]quinoline-6(7H) - ones are formed only in a minor amount, and the main product of this interaction is 3,3' - biquinoline-2,2',4,4'(1,H, 1'H, 3H, 3'H) is a tetron formed by oxidative dimerization of 4-hydroxy-2(1H) - quinolonone under the action of air oxygen. When dimethylacetal N,N-dimethylformamide was replaced with triethyl orthoformate, only 3,3'-biquinoline was isolated-2,2',4,4'(1,H,1'H, 3H, 3'H) is a tetron. The study of the composition of the mother liquor showed a difficult-to-separate mixture, in which the initial reagents 3,3'-biquinoline were present in residual amounts-2,2',4,4'(1,H, 1'H, 3H, 3'H) - tetron, as well as the target azolopyrimido[5,4-c]quinoline-6(7H) - one.

Keywords: High performance liquid chromatography, mass spectrometry, 4-hydroxy-2(1H) - quinolonone, aminoazoles, 3,3' - biquinoline-2,2',4,4'(1,H,1'H, 3H, 3'H) is a tetron.

References

1. Ukrainets I.B., Gorokhova O.B., Taran C.G., Bezulai P.A., *Khim. Geoterotiskl. Soedin.*, 1994, No 7, pp. 958-966.
2. Ziegler F., Kappe Th., Salvador R., *Monats. Chem.*, 1963, Vol. 94, pp. 453-459. DOI: 10.1007/BF00900278.
3. Kulagowski J.J., Baker R., Curtis N.R., Leeson P.D. et al., *J. Med. Chem.*, 1994, Vol. 37, No 10, pp. 1402-1405. DOI: 10.1021/jm00036a002.
4. Manera C., Malfitano A.M., Parkkari T., Lucchesi V. et al., *Eur. J. Med. Chem.*, 2015, Vol. 97, pp. 10-18. DOI: 10.1016/j.ejmech.2015.04.034
5. Sabbah D.A., Hishmah B., Sweidan K., Bardaweel S. et al., *Anticancer Agents Med Chem.*, 2018, Vol. 18, No 2, pp. 263-276. DOI: 10.2174/1871520617666170911171152.
6. Sarveswari S., Vijayakumar V., Siva R., Priya R., *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 2015, Vol. 175, No 1, pp. 43-64. DOI: 10.1007/s12010-014-1256-9.
7. Dodia N., Shah A., *Indian J. Het. Chem.*, 1999, Vol. 9, No 2, pp. 139-142.
8. Tedesco R., Shaw A.N., Bambal R., Chai D. et al., *J. Med. Chem.*, 2006, Vol. 49, No 3, pp. 971-983. DOI: 10.1021/jm050855s.
9. MacLeod A.M., Grimwood S., Barton C., Bristow L. et al., *J. Med. Chem.*, 1995, Vol. 38, No 12, pp. 2239-2243. DOI: 10.1021/jm00012a024.
10. Rowley M., Leeson P.D., Stevenson G.I., Moseley A.M. et al., *J. Med. Chem.*, 1993, Vol. 36, No 22, pp. 3386-3396. DOI: 10.1021/jm00074a020.
11. Zhou Z.L., Navratil J.M., Cai S.X., Whittemore E.R., *Bioorg. Med. Chem*, 2001, Vol. 9, No 8, pp. 2061-2071. DOI: 10.1016/S0968-0896(01)00115-8.
12. Cai S.X., Zhou Z.L., Huang J.C., Whittemore E.R. et al., *J. Med. Chem.*, 1996, Vol. 39, No 23, pp. 4682-4686. DOI: 10.1021/jm960520y.
13. DeVita R.J., Hollings D.D., Goulet M.T., Wyvrat M.J., *Biorg. Med. Chem. Lett.*, 1999, Vol. 9, No 17, pp. 2615-2620. DOI: 10.1016/S0960-894X(99)00446-1.
14. Abdou M.M., *Arabian J. Chem.*, 2018, Vol. 11, No 7, pp. 1061-1071. DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.11.021.
15. Mulwad V.V., Hegde A.S., Suryanarayan V., *Indian J. Chem.*, 1999, Vol. 38B, pp. 148-151.
16. Kepe V., Kocovar M., Petric A., Polanc S. et al., *Heterocycles (Sendai)*, 1992, Vol. 33, No 2, pp. 843-849.
17. Ngadju B.T., Ayafor J.F., Bilon A.N., Sondengam B.L. et al., *Tetrahedron*, 1992, Vol. 48, No 40, pp. 8711-8724. DOI: 10.1016/S0040-4020(01)89446-1.
18. Kmetc M., Stanovnik B., Tisler M., Kappe T., *Heterocycles (Sendai)*, 1993, Vol. 35, No 2, pp. 1331-1339.
19. Sowellim S.Z.A., El-Taweel F.M.A., Elagamey A.A., *Egypt. J. Chem.*, 1995, Vol. 38, No 5, pp. 511-522. DOI: 10.1016/j.tetlet.2013.03.044.
20. Shihaliev Kh.S., Selemenev V.F., Medvedeva S.M., Ponomareva L.F. et al., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2014, Vol. 14, No 2, pp. 332-337.
21. Medvedeva S.M., Shihaliev Kh.S., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2014, Vol. 14, No 4, pp. 696-702.
22. Medvedeva S.M., Shihaliev Kh.S., Kryl'skij D.V., Sinjaeva L.A., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2014, Vol. 14, No 6, pp. 970-976.

23. Shihaliyev Kh.S., Vandyshev D.Yu., Potapov, A.Yu., Krysin, M.Yu., et al., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2017, Vol. 17, No 3, pp. 490-495.

Поликарчук Владимир Андреевич – аспирант кафедры органической химии химического факультета ВГУ, Воронеж

Потапов Андрей Юрьевич – д.х.н., доцент кафедры органической химии ВГУ, Воронеж

Разумова Виктория Эдуардовна – магистр 2 года обучения химического факультета ВГУ, Воронеж.

Вережников Виктор Николаевич – д.х.н., проф., профессор кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии ВГУ, Воронеж

Шихалиев Хидмет Сафарович – д.х.н., проф., заведующий кафедрой органической химии ВГУ, Воронеж

Кострюков Виктор Федорович – д.х.н., доц., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем

Столповская Надежда Владимировна – к.х.н., доц., доцент кафедры органической химии ВГУ, Воронеж

24. Ferguson J., Zeng F., Alper H., *Org. Lett.*, 2012, Vol. 14, No 21, pp. 5602-5605. DOI: 10.1021/ol302725x.

Polikarchyk Vladimir A. – the postgraduate student of organic chemistry department, Voronezh State University, Voronezh. e-mail: polikarchyk@mail.ru

Potapov Andrey Yu. – dr. sci., associate professor of organic chemistry department, Voronezh State University, Voronezh.

Razumova Victoria E. – student, Voronezh State University, Voronezh.

Verezhnikov Viktor N. – professor, professor of high-molecular compounds and colloid chemistry department, Voronezh State University, Voronezh

Shikhaliev Khidmet S. – professor, head of organic chemistry department, Voronezh State University, Voronezh

Kostryukov Viktor Ph. – dr. sci., associate professor of departments of materials science and nanosystems industry, Voronezh State University, Voronezh

Stolpovskaya Nadezhda V. – associate professor of organic chemistry department, Voronezh State University, Voronezh