

**КИНЕТИКА РЕАКЦИЙ ОЗОНА С АДЕНИНОМ И ЦИТОЗИНОМ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ****А.А. Максютова, Э.Р. Хайнасова, Ю.С. Зимин**

Айгуль Айдаровна Максютова\*, Эльвина Рафитовна Хайнасова, Юрий Степанович Зимин  
Кафедра физической химии и химической экологии, Башкирский государственный университет,  
ул. Заки Валиди, 32, Уфа, Российская Федерация, 450076  
E-mail: ajm-ajms@mail.ru\*, khainasova.elvina@mail.ru, ZiminYuS@mail.ru

*Методом ультрафиолетовой спектроскопии изучена кинетика реакций озона с азотистыми основаниями (АО) – аденином и цитозином – в водных растворах. На первом этапе исследований был определен диапазон рабочих концентраций АО. Обнаружено, что линейные зависимости между оптическими плотностями и концентрациями водных растворов азотистых оснований достаточно надежно, с коэффициентами корреляций  $r \geq 0,998$ , выполняются до  $[АО] = 2,3 \cdot 10^{-4}$  моль/л. По закону Бугера-Ламберта-Бера определены коэффициенты экстинкции аденина и цитозина в водных растворах, которые в дальнейшем были использованы для расчета их остаточных концентраций. На следующем этапе при равенстве начальных концентраций исходных веществ ( $[АО]_0 = [O_3]_0$ ) изучена кинетика озонированного окисления азотистых оснований. Анализ результатов показал, что кинетические кривые расходования исходных реагентов довольно хорошо ( $r \geq 0,996$ ) линеаризуются в координатах уравнения реакции второго порядка. С помощью барботажной установки найдено, что на 1 моль израсходованного АО приходится 1 моль поглощенного озона. Таким образом, реакции озона с аденином и цитозином однозначно протекают по кинетическим законам второго порядка (первого – по  $O_3$  и первого – по АО). По интегральным уравнениям реакций рассчитаны константы скорости, значения которых свидетельствуют о довольно высокой реакционной способности озона по отношению к азотистым основаниям. В интервале 285-309 К изучены температурные зависимости констант скорости второго порядка и определены активационные параметры (предэкспоненциальные множители и энергии активации) реакций озона с аденином и цитозином в водных растворах.*

**Ключевые слова:** аденин, цитозин, озон, кинетика, активационные параметры

**KINETICS OF OZONE REACTIONS WITH ADENINE AND CYTOSINE IN AQUEOUS SOLUTIONS****A.A. Maksyutova, E.R. Khaynasova, Yu.S. Zimin**

Aigul A. Maksyutova\*, Elvina R. Khaynasova, Yuriy S. Zimin  
Department of Physical Chemistry and Chemical Ecology, Bashkir State University, Zaki Validi st., 32, Ufa, 450076, Russia  
E-mail: ajm-ajms@mail.ru\*, khainasova.elvina@mail.ru, ZiminYuS@mail.ru

*The ultraviolet spectroscopy method has been applied to study the kinetics of the ozone reactions with nitrogenous bases (NB), namely adenine and cytosine in aqueous solutions. At the first research stage, the range of NB working concentrations has been determined. It was found that linear dependences between optical densities and concentrations of nitrogenous bases aqueous solutions are quite reliable, with correlation coefficients  $r \geq 0.998$ , are satisfied up to  $[NB] = 2.3 \cdot 10^{-4}$  mol/l. According to the Bouguer-Lambert-Beer law, adenine and cytosine extinction coefficients in aqueous solutions were determined and subsequently used to calculate their residual concentrations. At the next stage, the kinetics of nitrogenous bases ozonized oxidation was studied with equal initial concentrations of the starting substances ( $[NB]_0 = [O_3]_0$ ). The results revealed that the kinetic consumption curves of the starting reagents are fairly well linearized ( $r \geq 0.996$ ) in the second-order reaction equation coordinates. As found with the bubbling installa-*

*tion, 1 mol of the absorbed ozone falls on 1 mol of the used NB. Thus, the reactions of ozone with adenine and cytosine explicitly proceed according to the second-order kinetic laws (the first – according to O<sub>3</sub> and the first – according to NB). The rate constants were calculated by the integral reaction equations, the values of which indicate a higher ozone reactivity in relation to nitrogen bases. The temperature dependences of the second-order rate constants was studied ranging 285–309 K, and the activation parameters (pre-exponential factors and activation energies) of the ozone reactions with adenine and cytosine in aqueous solutions were determined.*

**Key words:** adenine, cytosine, ozone, kinetics, activation parameters

**Для цитирования:**

Максютова А.А., Хайнасова Э.Р., Зимин Ю.С. Кинетика реакций озона с аденином и цитозином в водных растворах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 10. С. 17–22

**For citation:**

Maksyutova A.A., Khaynasova E.R., Zimin Yu.S. Kinetics of ozone reactions with adenine and cytosine in aqueous solutions. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 10. P. 17–22

## ВВЕДЕНИЕ

Азотистые основания, такие как урацил, тимин, цитозин, аденин и гуанин, являются важнейшими компонентами нуклеиновых кислот. При этом урацил входит в состав РНК, тимин – в состав ДНК, а остальные азотистые основания (цитозин, аденин и гуанин) встречаются в обеих нуклеиновых кислотах (РНК и ДНК). Отметим также, что урацил, тимин и цитозин относятся к производным пиримидина, а аденин и гуанин – к производным пурина.

Известно, что нарушение целостности азотистых оснований может приводить к серьезным последствиям для живых организмов и тяжелым генетическим заболеваниям. В последние годы повысился интерес к исследованиям, направленным на изучение механизмов разрушения азотистых оснований (да и самих нуклеиновых кислот) под действием различных окислителей. Так, в литературе имеются сведения по окислительным превращениям ДНК и составляющих ее компонентов активными формами кислорода (синглетным кислородом, гидроксильным и супероксидным радикалами) и рядом других окисляющих агентов [1–9]. Достаточно большое количество работ посвящено изучению окислительных превращений производных урацила под действием молекулярного кислорода (в присутствии хлоридов металлов) [10–13], гидроксида натрия [14, 15], персульфата аммония [16], пероксильных радикалов [17–19], пероксида водорода [20–23], озона [24, 25] и др. Среди перечисленных окислителей особое значение принадлежит озону, который сегодня приобрел огромную популярность в медицинской практике (профилактика и терапия различных болезней). В то же время нельзя исключать и негативного воздействия O<sub>3</sub> на РНК и ДНК и, ко-

нечно же, нуклеиновые (азотистые) основания. Отсюда возникает необходимость получения количественных параметров, характеризующих реакционную способность озона по отношению к этим основаниям.

В связи с изложенным, целью настоящей работы явилось изучение кинетики реакций озона с двумя азотистыми основаниями (аденином и цитозином), входящими в состав нуклеиновых кислот.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов окисления были использованы аденин и цитозин с содержанием основных веществ  $\geq 99\%$ , произведенные фирмой «Aldrich» (США). Озон получали с помощью лабораторного озонатора. Растворитель – свежеперегнанная дистиллированная вода.

Кинетику реакций озона с азотистыми основаниями (АО) – аденином и цитозином – в водных растворах изучали методом УФ спектроскопии. Исследования проводили на спектрометре UV-2600 фирмы «Shimadzu» по методике, изложенной в работе [25]. При этом во всех опытах выполнялось условие равенства начальных концентраций реагентов:  $[O_3]_0 = [AO]_0$ . За ходом реакции следили по изменению оптических плотностей ( $A$ ) на длинах волн  $\lambda_{\max} = 260$  и  $267$  нм, отвечающих максимумам поглощения аденина и цитозина, соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры УФ-поглощения аденина и цитозина имеют две основные полосы поглощения (рис. 1), хотя аденин, как представитель пуриновых оснований, помимо пиримидинового кольца, имеет имидазольное. Согласно [26], вторую полосу поглощения азотистых оснований относят к поглощению сопряжений  $\text{—}\overset{|}{\text{C}}=\overset{|}{\text{C}}-\overset{|}{\text{C}}=\text{N—}$  пиримидиновых колец.

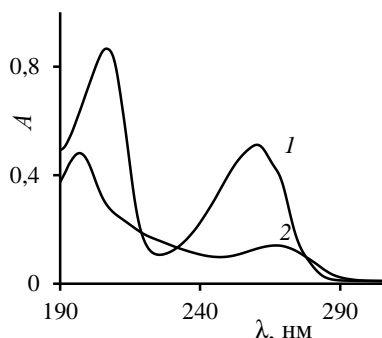


Рис. 1. Спектры поглощения водных растворов аденина (1) и цитозина (2); 293 К, [АО] = 4·10<sup>-5</sup> моль/л  
 Fig. 1. Absorption spectra of adenine (1) and cytosine (2) aqueous solutions; 293 K, [AO] = 4·10<sup>-5</sup> mol/l

Известно, что для пуриновых оснований характерна прототропная таутомерия. Исследования авторов [27, 28] показали, что аденин в водной среде при pH ≈ 7,0 существует главным образом в аминной форме.

Согласно [29], преимущественной формой цитозина в нейтральных водных растворах является amino-кето-таутомерная форма (концентрация иминных и енольных таутомеров в данных условиях пренебрежимо мала).

На первом этапе исследований был определен диапазон рабочих концентраций аденина и цитозина. Для этого мы использовали закон Бугера – Ламберта – Бера:

$$A = \epsilon_{\lambda} \cdot [AO] \cdot l,$$

где  $A$  – оптические плотности водных растворов аденина и цитозина;  $\epsilon_{\lambda}$  – коэффициенты экстинкции азотистых оснований при длине волны  $\lambda$  (л моль<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>); [АО] – концентрации азотистых оснований (моль/л);  $l$  – толщина кюветы ( $l = 1$  см).

Установлено, что линейные зависимости между оптическими плотностями и концентрациями водных растворов азотистых оснований достаточно надежно, с высокими значениями коэффициентов корреляций  $r \geq 0,998$ , выполняются до [АО] = 2,3·10<sup>-4</sup> моль/л. Таким образом, все дальнейшие исследования были проведены при концентрациях азотистых оснований, не превышающих 2,3·10<sup>-4</sup> моль/л. По тангенсам углов наклона зависимостей  $A = f([AO])$  определены коэффициенты экстинкции аденина и цитозина в водных растворах (табл. 1), которые в дальнейшем были использованы для расчета их остаточных концентраций.

Дополнительными опытами установлено, что с увеличением времени озонированного окисления полосы, обусловленные поглощением сопряжений —C=C—C=N— пиримидиновых колец

аденина и цитозина, уменьшались до значения оптической плотности  $A = 0$ . При этом новых полос поглощения в УФ спектрах при  $\lambda = 260-267$  нм обнаружено не было даже при значительных временах окислительного процесса (5-10 мин). Таким образом, можно утверждать, что продукты окисления не поглощают свет в области указанных длин волн.

Таблица 1

**Коэффициенты экстинкции азотистых оснований в водных растворах**

**Table 1. Extinction coefficients of nitrogenous bases in aqueous solutions**

Азотистые основания	$\epsilon_{\lambda} \cdot 10^{-3}$ , л моль <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	$\lambda_{max}$ , нм
Аденин	9,3 ± 0,3	260
Цитозин	3,1 ± 0,1	267

На следующем этапе работы изучены стехиометрия и кинетика реакций озона с аденином и цитозином в водных растворах. Стехиометрические соотношения реагентов (O<sub>3</sub> и АО) определяли при комнатной температуре 295 К с помощью барботажной установки, позволяющей контролировать расходование озона в реакции с азотистыми основаниями по изменению его концентрации в газовой фазе до и после реактора. Методика проводимых при этом экспериментов и расчетов детально описана в работе [25].

Исследования показали, что в первые 1,5-2,0 мин исходные вещества (АО и O<sub>3</sub>) реагируют в соотношении 1:1, т.е. на начальной стадии окисления 1 моль израсходованного субстрата (аденина или цитозина) связан с поглощением 1 моля озона. Данный факт должен приводить к следующему кинетическому уравнению исследуемых реакций:

$$V = -dC/dt = k [AO][O_3], \tag{1}$$

где  $k$  – константа скорости реакций озона с аденином (или цитозином). Тогда, при равных начальных концентрациях реагентов ( $[AO]_0 = [O_3]_0 = C_0$ ), следует ожидать линейаризации кинетических кривых расходования АО и O<sub>3</sub> в координатах следующего уравнения [30]:

$$1/C = 1/C_0 + k \cdot t, \tag{2}$$

где  $C$  – текущая концентрация исходных реагентов в момент времени  $t$ .

Действительно, для кинетических кривых изменения  $C$ , полученных в опытах при указанных выше условиях ( $[AO]_0 = [O_3]_0 = C_0$ ), обнаружены довольно хорошие (рис. 2,  $r \geq 0,996$ ) спрямления в координатах уравнения (2). При этом текущие концентрации реагентов ( $[AO] = [O_3] = C$ ) в

моменты времени  $t$  были вычислены по формуле:

$$C = \frac{A}{(\varepsilon_{AO} + \varepsilon_{O_3}) \cdot l} = \frac{A_{AO} + A_{O_3}}{(\varepsilon_{AO} + \varepsilon_{O_3}) \cdot l}, \quad (3)$$

где  $A_{AO}$  и  $A_{O_3}$  – оптические плотности, связанные с поглощением азотистых оснований и озона, соответственно. В формуле (3) учтено одновременное поглощение обоих реагентов (АО и  $O_3$ ) в одной и той же УФ области спектра. Значения констант скорости  $k$  реакций второго порядка были рассчитаны по тангенсам углов наклона зависимостей  $1/C = f(t)$  (рис. 2).

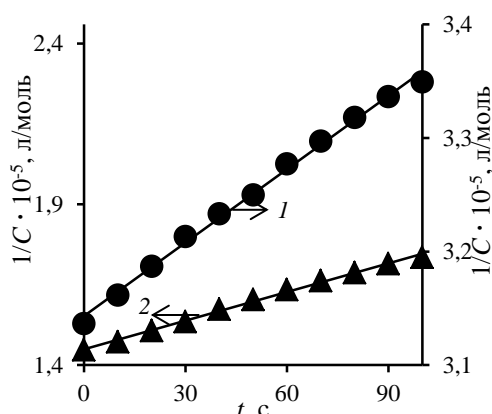


Рис. 2. Линеаризация кинетических кривых изменения  $C$  в координатах уравнения (2) для реакций озона с аденином (1) и цитозином (2); 297 К

Fig. 2. Linearization of the kinetic curves of  $C$  change in the equation coordinates (2) for the reactions of ozone with adenine (1) and cytosine (2); 297 K

На завершающем этапе работы изучены температурные зависимости констант скорости реакций озона с аденином и цитозином в водных растворах. Полученные в интервале температур 285-309 К значения  $k$  изменялись в пределах от 7,2 до 54,2 л моль<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup> ( $O_3$  + аденин) и от 12,3 до 69,5 л моль<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup> ( $O_3$  + цитозин), что свидетельствует о высокой реакционной способности озона по отношению к исследованным азотистым основаниям.

Обработка температурных зависимостей  $k$  в логарифмических координатах уравнения Аррениуса (рис. 3) позволила определить значения логарифмов предэкспоненциальных множителей  $\lg A$  и энергий активации  $E$  для изученных нами реакций (табл. 2).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Simandan T., Sun J., Dix T.A. Oxidation of DNA bases, deoxyribonucleosides and homopolymers by peroxy radicals. *Biochem. J.* 1998. V. 335. N 2. P. 233-240. DOI: 10.1042/bj3350233.
2. Grand A., Morell C., Labet V., Cadet J., Eriksson L.A. •H atom and •OH radical reactions with 5-methylcytosine. *J. Phys. Chem. A.* 2007. V. 111. N 37. P. 8968-8972. DOI: 10.1021/jp0737799.

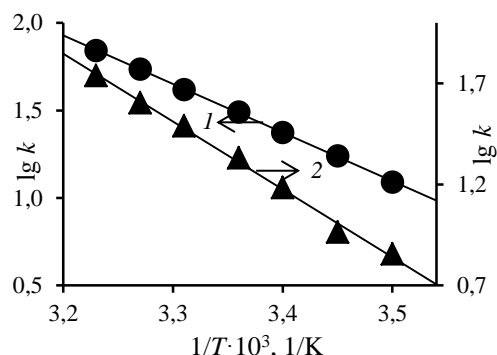


Рис. 3. Температурные зависимости констант скорости реакций озона с аденином (1) и цитозином (2) в координатах уравнения Аррениуса

Fig. 3. Temperature dependences of the ozone reaction rate constants with adenine (1) and cytosine (2) in the coordinates of the Arrhenius equation

Таблица 2

Параметры уравнения Аррениуса для реакций озона с азотистыми основаниями

Table 2. Arrhenius equation parameters for reactions of ozone with nitrogenous bases

Азотистые основания	$\lg A$ (л моль <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup> )	$E$ , кДж/моль
Аденин	$11,7 \pm 1,7$	$59,1 \pm 2,6$
Цитозин	$10,3 \pm 1,3$	$50,7 \pm 3,6$

#### ВЫВОДЫ

В настоящей работе впервые получены количественные параметры, характеризующие реакционную способность озона по отношению к двум азотистым основаниям (аденину и цитозину) в водных растворах. Установлено, что реакции  $O_3$  с азотистыми основаниями протекают по кинетическим уравнениям второго порядка. Полученные значения констант скорости свидетельствуют о высокой реакционной способности взаимодействующих веществ. В интервале 285-309 К изучена температурная зависимость констант скорости второго порядка и рассчитаны параметры уравнения Аррениуса для исследованных реакций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-73-20073).

#### REFERENCES

1. Simandan T., Sun J., Dix T.A. Oxidation of DNA bases, deoxyribonucleosides and homopolymers by peroxy radicals. *Biochem. J.* 1998. V. 335. N 2. P. 233-240. DOI: 10.1042/bj3350233.
2. Grand A., Morell C., Labet V., Cadet J., Eriksson L.A. •H atom and •OH radical reactions with 5-methylcytosine. *J. Phys. Chem. A.* 2007. V. 111. N 37. P. 8968-8972. DOI: 10.1021/jp0737799.

3. Кузнецова А.А., Кнорре Д.Г., Федорова О.С. Окисление ДНК и ее компонентов активными формами кислорода. *Усп. химии*. 2009. Т. 78. № 7. С. 714-734.
4. Cadet J., Douki T., Ravanat J.L. Oxidatively generated base damage to cellular DNA. *Free Radic. Biol. Med.* 2010. V. 49. N 1. P. 9-21. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2010.03.025.
5. Wagner J.R., Cadet J. Oxidation reactions of cytosine DNA components by hydroxyl radical and one-electron oxidants in aerated aqueous solutions. *Acc. Chem. Res.* 2010. V. 43. N 4. P. 564-571. DOI: 10.1021/ar9002637.
6. Rodriguez-Muniz G.M., Marin M.L., Lhiaubet-Vallet V., Miranda M.A. Reactivity of nucleosides with a hydroxyl radical in non-aqueous medium. *Chem. Eur. J.* 2012. V. 18. N 26. P. 8024-8027. DOI: 10.1002/chem.201201090.
7. Madugundu G.S., Cadet J., Wagner J.R. Hydroxyl-radical-induced oxidation of 5-methylcytosine in isolated and cellular DNA. *Nucleic Acids Res.* 2014. V. 42. N 11. P. 7450-7460. DOI: 10.1093/nar/gku334.
8. Cadet J., Wagner J.R. Oxidatively generated base damage to cellular DNA by hydroxyl radical and one-electron oxidants: similarities and differences. *Arch. Biochem. Biophys.* 2014. V. 557. P. 47-54. DOI: 1016/j.abb.2014.05.001.
9. Cadet J., Davies K.J.A., Medeiros M.H., Di Mascio P., Wagner J.R. Formation and repair of oxidatively generated damage in cellular DNA. *Free Radic. Biol. Med.* 2017. V. 107. P. 13-34. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2016.12.049.
10. Нугуманов Т.Р., Иванов С.П., Насыров А.А., Гайфутдинова Р.К., Муринов Ю.И. Гомогенное окисление 5-гидрокси-6-метилурацила молекулярным кислородом в водных растворах. *Башк. хим. журн.* 2007. Т. 14. № 1. С. 48-50.
11. Nugumanov T.R., Ivanov S.P., Starikova Z.A., Murinov Yu.I. Oxidation of 5-hydroxy-6-methyluracil to 5,5,6-trihydroxy-6-methylpyrimidine-2,4-dione with molecular oxygen. *Mend. Commun.* 2008. V. 18. N 4. P. 223-224. DOI: 10.1016/j.mencom.2008.07.020.
12. Нугуманов Т.Р., Антипин А.В., Грабовский С.А., Кабальнова Н.Н., Муринов Ю.И. Окисление 5-гидрокси-6-метилурацила молекулярным кислородом в присутствии хлорида меди(II) в водных растворах. *Журн. общ. химии*. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 1195-1198.
13. Остахов С.С., Хурсан С.Л., Муринов Ю.И., Нугуманов Т.Р., Каюмова Р.Р., Петрова С.Ф. О роли ионов меди (II) в реакциях окисления молекулярным кислородом 5-гидрокси-6-метилурацила в основном и электронно-возбужденном состоянии в водных растворах. *Химия высоких энергий*. 2017. Т. 51. № 1. С. 36-41.
14. Петрова С.Ф., Нугуманов Т.Р., Лобов А.Н., Иванов С.П., Муринов Ю.И. Деструкция пиримидинового кольца при взаимодействии 5-гидрокси-6-метилурацила с гидроксидом натрия в водных растворах. *Вестн. Башк. ун-та*. 2016. Т. 21. № 3. С. 626-631.
15. Петрова С.Ф., Остахов С.С., Иванов С.П., Нугуманов Т.Р., Муринов Ю.И., Хурсан С.Л. Изучение спектрально-люминесцентным методом окисления 5-гидрокси-6-метилурацила в водно-щелочных растворах. *Химия высоких энергий*. 2018. Т. 52. № 6. С. 468-472.
16. Лихачева Н.А., Аминова Э.К. Продукты окислительного расщепления 6-метилурацила персульфатом аммония. *Башк. хим. журн.* 2017. Т. 24. № 3. С. 89-91.
17. Кабальнова Н.Н., Грабовский С.А., Нугуманов Т.Р., Иванов С.П., Муринов Ю.И. 5-Гидрокси-6-метилурацил – эффективная ловушка пероксильных радикалов. *Изв. АН. Сер. хим.* 2008. № 11. С. 2223-2227.
3. Kuznetsova A.A., Knorre D.G., Fedorova O.S. Oxidation of DNA and its components with reactive oxygen species. *Russ. Chem. Rev.* 2009. V. 78. N 7. P. 659-678. DOI: 10.1070/RC2009v078n07ABEH004038.
4. Cadet J., Douki T., Ravanat J.L. Oxidatively generated base damage to cellular DNA. *Free Radic. Biol. Med.* 2010. V. 49. N 1. P. 9-21. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2010.03.025.
5. Wagner J.R., Cadet J. Oxidation reactions of cytosine DNA components by hydroxyl radical and one-electron oxidants in aerated aqueous solutions. *Acc. Chem. Res.* 2010. V. 43. N 4. P. 564-571. DOI: 10.1021/ar9002637.
6. Rodriguez-Muniz G.M., Marin M.L., Lhiaubet-Vallet V., Miranda M.A. Reactivity of nucleosides with a hydroxyl radical in non-aqueous medium. *Chem. Eur. J.* 2012. V. 18. N 26. P. 8024-8027. DOI: 10.1002/chem.201201090.
7. Madugundu G.S., Cadet J., Wagner J.R. Hydroxyl-radical-induced oxidation of 5-methylcytosine in isolated and cellular DNA. *Nucleic Acids Res.* 2014. V. 42. N 11. P. 7450-7460. DOI: 10.1093/nar/gku334.
8. Cadet J., Wagner J.R. Oxidatively generated base damage to cellular DNA by hydroxyl radical and one-electron oxidants: similarities and differences. *Arch. Biochem. Biophys.* 2014. V. 557. P. 47-54. DOI: 1016/j.abb.2014.05.001.
9. Cadet J., Davies K.J.A., Medeiros M.H., Di Mascio P., Wagner J.R. Formation and repair of oxidatively generated damage in cellular DNA. *Free Radic. Biol. Med.* 2017. V. 107. P. 13-34. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2016.12.049.
10. Nugumanov T.R., Ivanov S.P., Nasyrov A.A., Gaifutdinova R.K., Murinov Yu.I. Homogeneous oxidation of 5-hydroxy-6-methyluracil by molecular oxygen in aqueous solutions. *Bashk. Khim. Zhurn.* 2007. V. 14. N 1. P. 48-50 (in Russian).
11. Nugumanov T.R., Ivanov S.P., Starikova Z.A., Murinov Yu.I. Oxidation of 5-hydroxy-6-methyluracil to 5,5,6-trihydroxy-6-methylpyrimidine-2,4-dione with molecular oxygen. *Mend. Commun.* 2008. V. 18. N 4. P. 223-224. DOI: 10.1016/j.mencom.2008.07.020.
12. Nugumanov T.R., Antipin A.V., Grabovskii S.A., Kabalnova N.N., Murinov Yu.I. Oxidation of 5-hydroxy-6-methyluracil with molecular oxygen in the presence of copper(II) chloride in aqueous solution. *Russ. J. Gen. Chem.* 2011. V. 81. N 7. P. 1543-1546. DOI: 10.1134/S107036321107022X.
13. Ostakhov S.S., Khursan S.L., Murinov Y.I., Nugumanov T.R., Kayumova R.R., Petrova S.F. The role of copper(II) ions in the oxidation of 5-hydroxy-6-methyluracil in the ground and electronically excited states with molecular oxygen in aqueous solutions. *High Energy Chem.* 2017. V. 51. N 1. P. 32-37. DOI: 10.1134/S0018143916060138.
14. Petrova S.F., Nugumanov T.R., Lobov A.N., Ivanov S.P., Murinov Yu.I. Destruction of pyrimidine ring during the interaction of 5-hydroxy-6-methyluracil with sodium hydroxide in aqueous solutions. *Vestn. Bashk. Un-ta*. 2016. V. 21. N 3. P. 626-631 (in Russian).
15. Petrova S.F., Ostakhov S.S., Ivanov S.P., Nugumanov T.R., Murinov Y.I., Khursan S.L. Spectral-luminescent study of the oxidation of 5-hydroxy-6-methyluracil in aqueous alkaline solutions. *High Energy Chem.* 2018. V. 52. N 6. P. 480-484. DOI: 10.1134/S0018143918060115.
16. Likhacheva N.A., Aminova E.K. Products of oxidative cleavage of 6-methyluracil by ammonium persulfate. *Bashk. Khim. Zhurn.* 2017. V. 24. N 3. P. 89-91 (in Russian).
17. Kabalnova N.N., Grabovskiy S.A., Nugumanov T.R., Ivanov S.P., Murinov Y.I. 5-Hydroxy-6-methyluracil as an efficient scavenger of peroxy radicals. *Russ. Chem. Bull.* 2008. V. 57. N 11. P. 2265-2270. DOI: 10.1007/s11172-008-0318-y.

18. Grabovskiy S.A., Konkina I.G., Murinov Y.I., Kabal'nova N.N. 5-aminouracil as effective inhibitor of peroxy radicals. Experimental and theoretical studies. *Current Org. Chem.* 2012. V. 16. N 11. P. 1447-1452. DOI: 10.2174/138527212800672619.
19. Якупова Л.Р., Насибуллина Р.А., Петрова С.Ф., Абдуллин М.Ф., Салихов Ш.М., Гимадиева А.Р., Сафиуллин Р.Л. Механизм окисления 5-амино-6-метилурацила пероксильным радикалом 1,4-диоксана. *Химия гетероцикл. соед.* 2015. Т. 51. № 2. С. 162-165.
20. Ахатова Г.Р., Сафарова И.В., Герчиков А.Я., Еникеев А.А. Кинетика взаимодействия производных урацила с пероксидом водорода. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 3. С. 40-43.
21. Ахатова Г.Р., Сафарова И.В., Герчиков А.Я., Еникеев А.А. Кинетика и механизм реакции урацилов с пероксидом водорода в водных растворах. *Кинетика и катализ.* 2012. Т. 53. № 3. С. 309-312.
22. Ахатова Г.Р., Шарипова Г.М., Сафарова И.В., Герчиков А.Я., Мустафин А.Г. Реакционная способность таутомерных форм 5-метилурацила при взаимодействии с пероксидом водорода в водных растворах. *Вестн. Башк. ун-та.* 2013. Т. 18. № 4. С. 1019-1022.
23. Герчиков А.Я., Шарипова Г.М., Ахатова Г.Р., Мустафин А.Г., Сахибгареева М.В., Спивак С.И. Кинетика и механизм реакции урацила с пероксидом водорода в водных растворах. Математическая модель реакции. *Кинетика и катализ.* 2015. Т. 56. № 5. С. 571-576.
24. Зимин Ю.С., Хайруллина Л.Р., Кутлугильдина Г.Г., Мустафин А.Г. Хемилуминесценция в реакции озона с 6-метилурацилом в водных растворах. *Журн. физ. химии.* 2015. Т. 89. № 12. С. 1864-1866. DOI: 10.7868/S0044453715120365.
25. Максютлова А.А., Зимин Ю.С., Гимадиева А.Р., Мустафин А.Г. Кинетика окисления урацила и его производных озонном в водных растворах. *Журн. физ. химии.* 2019. Т. 93. № 9. С. 1322-1327. DOI: 10.1134/S0044453719090139.
26. Cavalieri L.F., Bendich A. The ultraviolet absorption spectra of pyrimidines and purines. *J. Am. Chem. Soc.* 1950. V. 72. N 6. P. 2587-2594. DOI: 10.1021/ja01162a067.
27. Pullman B., Pullman A. Electronic aspects of purine tautomerism. *Adv. Heterocycl. Chem.* 1971. V. 13. P. 77-159. DOI: 10.1016/S0065-2725(08)60349-9.
28. Raczynska E.D., Makowski M., Zientara-Rytter K., Kolczynska K., Stepniewski T.M., Hallmann M. Quantum-chemical studies on the favored and rare tautomers of neutral and redox adenine. *J. Phys. Chem. A.* 2013. V. 117. N 7. P. 1548-1559. DOI: 10.1021/jp3081029.
29. Raczynska E.D., Sapula M., Zientara-Rytter K., Kolczynska K., Stepniewski T.M., Hallmann M. DFT studies on the favored and rare tautomers of neutral and redox cytosine. *Struct. Chem.* 2016. V. 27. N 1. P. 133-143. DOI: 10.1007/s11224-015-0710-9.
30. Денисов Е.Т., Саркисов О.М., Лихтенштейн Г.И. Химическая кинетика. М.: Химия. 2000. 568 с.
18. Grabovskiy S.A., Konkina I.G., Murinov Y.I., Kabal'nova N.N. 5-aminouracil as effective inhibitor of peroxy radicals. Experimental and theoretical studies. *Current Org. Chem.* 2012. V. 16. N 11. P. 1447-1452. DOI: 10.2174/138527212800672619.
19. Yakupova L.R., Nasibullina R.A., Petrova S.F., Abdullin M.F., Salikhov S.M., Gimadieva A.R., Safiullin R.L. The mechanism of 5-amino-6-methyluracil oxidation with 1,4-dioxanyl peroxy radical. *Chem. Heterocycl. Compd.* 2015. V. 51. N 2. P. 162-165. DOI: 10.1007/s10593-015-1675-8.
20. Akhatova G.R., Safarova I.V., Gerchikov A.Ya., Enikeev A.A. Kinetics of the interaction of uracil derivatives with hydrogen peroxide. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 3. P. 40-43 (in Russian).
21. Akhatova G.R., Safarova I.V., Gerchikov A.Ya., Enikeev A.A. Kinetics and mechanism of the reactions of uracil with hydrogen peroxide in aqueous solutions. *Kinet. Catal.* 2012. V. 53. N 3. P. 297-300. DOI: 10.1134/S0023158412030019.
22. Akhatova G.R., Sharipova G.M., Safarova I.V., Gerchikov A.Ya., Mustafin A.G. Reactivity of 5-methyluracils tautomeric form with hydrogen peroxide in aqueous solutions. *Vestn. Bashk. Un-ta.* 2013. V. 18. N 4. P. 1019-1022 (in Russian).
23. Gerchikov A.Ya., Sharipova G.M., Akhatova G.R., Mustafin A.G., Sakhibgarееva M.V., Spivak S.I. Kinetics, mechanism, and mathematical model of the reaction between uracil and hydrogen peroxide in aqueous solution. *Kinet. Catal.* 2015. V. 56. N 5. P. 563-568. DOI: 10.1134/S0023158415050067.
24. Zimin Yu.S., Khairullina L.R., Kutlugil'dina G.G., Mustafin A.G. Chemiluminescence in the reaction of ozone with 6-methyluracil in aqueous solutions. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2015. V. 89. N 12. P. 2210-2212. DOI: 10.1134/S0036024415120365.
25. Maksyutova A.A., Zimin Yu.S., Gimadieva A.R., Mustafin A.G. Kinetics of the oxidation of uracil and six of its derivatives by ozone in aqueous solutions. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2019. V. 93. N 9. P. 1672-1676. DOI: 10.1134/S0036024419090127.
26. Cavalieri L.F., Bendich A. The ultraviolet absorption spectra of pyrimidines and purines. *J. Am. Chem. Soc.* 1950. V. 72. N 6. P. 2587-2594. DOI: 10.1021/ja01162a067.
27. Pullman B., Pullman A. Electronic aspects of purine tautomerism. *Adv. Heterocycl. Chem.* 1971. V. 13. P. 77-159. DOI: 10.1016/S0065-2725(08)60349-9.
28. Raczynska E.D., Makowski M., Zientara-Rytter K., Kolczynska K., Stepniewski T.M., Hallmann M. Quantum-chemical studies on the favored and rare tautomers of neutral and redox adenine. *J. Phys. Chem. A.* 2013. V. 117. N 7. P. 1548-1559. DOI: 10.1021/jp3081029.
29. Raczynska E.D., Sapula M., Zientara-Rytter K., Kolczynska K., Stepniewski T.M., Hallmann M. DFT studies on the favored and rare tautomers of neutral and redox cytosine. *Struct. Chem.* 2016. V. 27. N 1. P. 133-143. DOI: 10.1007/s11224-015-0710-9.
30. Denisov E.T., Sarkisov O.M., Likhtenshtein G.I. Chemical Kinetics. M.: Khimiya. 2000. 568 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 12.05.2020  
Принята к опубликованию 06.07.2020

Received 12.05.2020  
Accepted 06.07.2020