

КОМПЛЕКС ВКЛЮЧЕНИЯ Gd(III) С β -ЦИКЛОДЕКСТРИНОМ И L-ТРИПТОФАНОМ

© 2024 г. С. С. Хасаева^{1,*}, Н. Н. Буков¹, С. Н. Иванин¹, С. Л. Кузнецова¹, Э. Л. Исаева²

¹ Кубанский государственный университет, Краснодар, 350040 Россия

² Чеченский государственный университет имени А. А. Кадырова, Грозный, 364024 Россия

*e-mail: justchemist@mail.ru

Поступило в редакцию 30 января 2024 г.

После доработки 3 апреля 2024 г.

Принято к печати 3 апреля 2024 г.

Синтезирован комплекс включения гадолиния(III) с L-триптофаном (L-Trp) и β -циклодекстрином (β -CD) состава $Gd(Trp)_3Cl_3 \cdot 3\beta\text{-CD} \cdot nH_2O$. Установлено, что комплекс образуется за счет вхождения в полость β -CD ароматической части молекулы L-Trp, а ионы Gd^{3+} находятся во внешней сфере.

Ключевые слова: комплекс включения, L-триптофан, гадолиний(III), β -циклодекстрин, физико-химические методы исследования

DOI: 10.31857/S0044460X24020128, **EDN:** GUNRPA

ВВЕДЕНИЕ

L-триптофан (L-Trp) – это незаменимая α -аминокислота, которая оказывает большое влияние на метаболическую активность человека, а также травоядных животных. Биологическая роль триптофана заключается в том, что он, с одной стороны, служит «кирпичиком» для строительства собственных белков организма, а с другой – нужен для синтеза важнейших биологически активных соединений [витаминов (B_3 , ниацин) и гормонов (серотонин, мелатонин, гормон роста)]. Являясь источником мелатонина и серотонина, триптофан обладает значительными антиоксидантными свойствами [1]. Триптофан используется в качестве антиоксиданта в пищевой промышленности и в качестве биомаркера в фармацевтической промышленности [2]. С точки зрения биоактивности, комплексные соединения аминокислот с металлами (d -металлы, как известно, имеют большое значение во многих биохимических процессах в живых организмах, а f -элементы являются редкоземельными зондами) представляют большой интерес. Таким образом, при введении иона d -элемента усиливаются фармакологические

свойства, а введение f -элемента позволяет отследить пути доставки лекарственного препарата в нужную точку живого объекта [3, 4].

Плохая растворимость активного фармацевтического ингредиента в воде является серьезной проблемой [5]. В частности, комплексы аминокислот с металлами обычно имеют низкую и изменчивую биодоступность и, следовательно, неудовлетворительный терапевтический эффект. Аминокислоты к тому же химически неустойчивы, они агрегируют и под действием света и влаги могут разрушаться. В лекарственных препаратах обычно используется активная L-форма аминокислот, которая со временем, по мнению автора [6], может переходить в неактивную D-форму. Проблему устойчивости можно решить, поместив комплекс в полость другой молекулы – *хозяина*. Самыми распространенными *хозяевами*-инкапсуляторами являются β -циклодекстрины (β -CD). Одна из особенностей β -CD заключается в их способности включать в гидрофобную полость небольшие гидрофобные молекулы, тем самым повышая их растворимость, и, следовательно, стабильность и биодоступность лекарственных веществ [7].

Получение и изучение комплексов включения циклодекстринов является весьма актуальным. Хорошо исследованы бинарные комплексы типа CD–гость. Целый ряд работ посвящен комплексам включения CD с аминокислотами [8–12], модифицированного β -CD с аминокислотами [13–16], комплексам CD с металлами [17]. Тройные системы типа CD–гость–металл изучены меньше [18, 19]. Так, системы CD–аминокислота–ион металла описаны в работах [20, 21], в которых приводятся данные о комплексах включений функционализированного циклодекстрина с триптофаном и никелем(II) и комплексов тирозина с металлами Co(II) и Cu(II) с β -циклодекстрином.

В то же время, аминокислоты особенно ароматические по своей структуре являются идеальными лигандами для образования комплексов включения с CD [6]. Имея несколько активных центров для координации с металлами [3], они образуют бинарные комплексы и могут быть использованы для получения тройных комплексов. В связи с этим в данной работе получен и изучен физико-химическими методами

комплекс включения Gd(III) с β -циклодекстрином и L-триптофаном.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Комплекс включения Gd(III) с β -циклодекстрином и L-триптофаном получали смешением L-Трп, β -CD и хлорида гадолиния(III) в дистиллированной воде.

На термограмме исследуемого комплекса (рис. 1, табл. 1) можно выделить 4 стадии потери массы. Первая стадия эндоэффект при 96.6°C с потерей массы 10.99%, что соответствует процессу десорбции воды. Хорошо видно, что данный эффект разделяется на 2 максимума (96.6 и 112.5°C), что, по нашему мнению, связано, во-первых, с десорбцией воды на гидрофильной поверхности β -CD (соответствующий эффект для чистого β -CD лежит в области 80°C и имеет $\Delta m = 10.16\%$, также в работе [18] было показано, что с одной молекулой β -CD может быть связано до 10–12 молекул воды). Следующий эффект потери массы при 112.5°C связан, по нашему мнению, с отщеплением внутрисферной воды, координированной с ионами Gd^{3+} . Общее число молекул воды

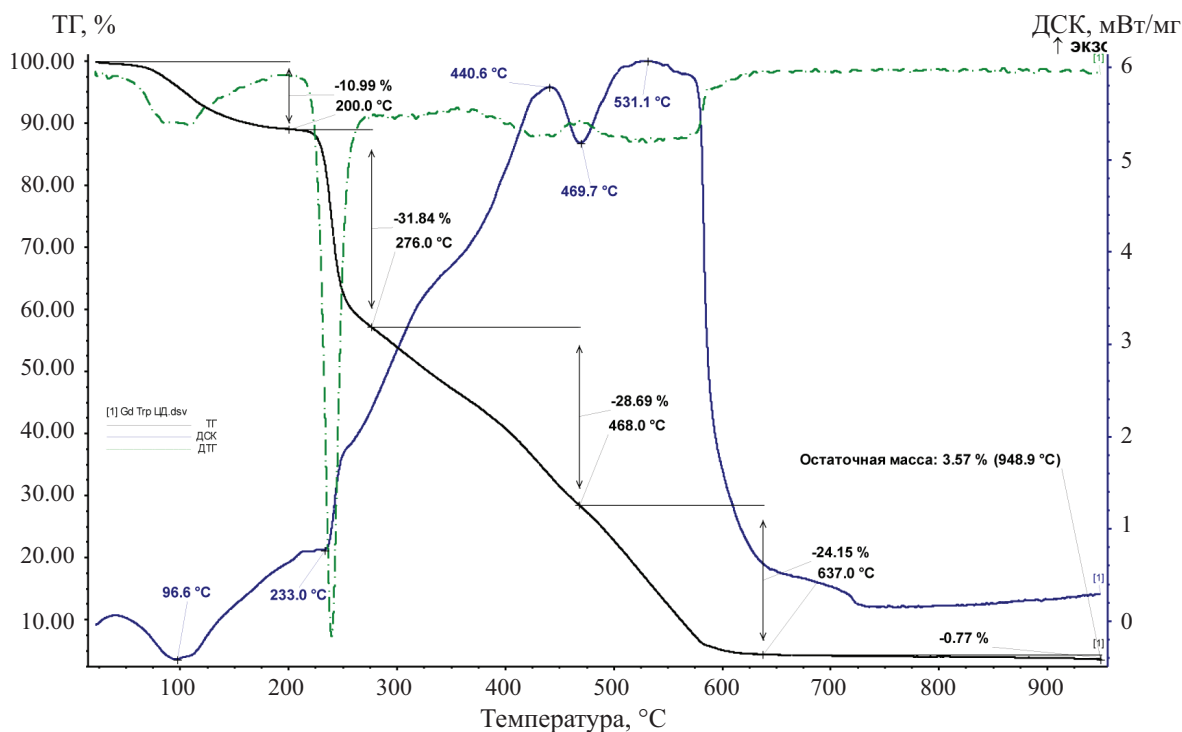


Рис. 1. Термограмма комплекса включения β -циклодекстрина с гадолинием(III) и L-триптофаном.

Таблица 1. Данные термического анализа β -CD и его комплекса включения с Gd(III) с L-Trp.^a

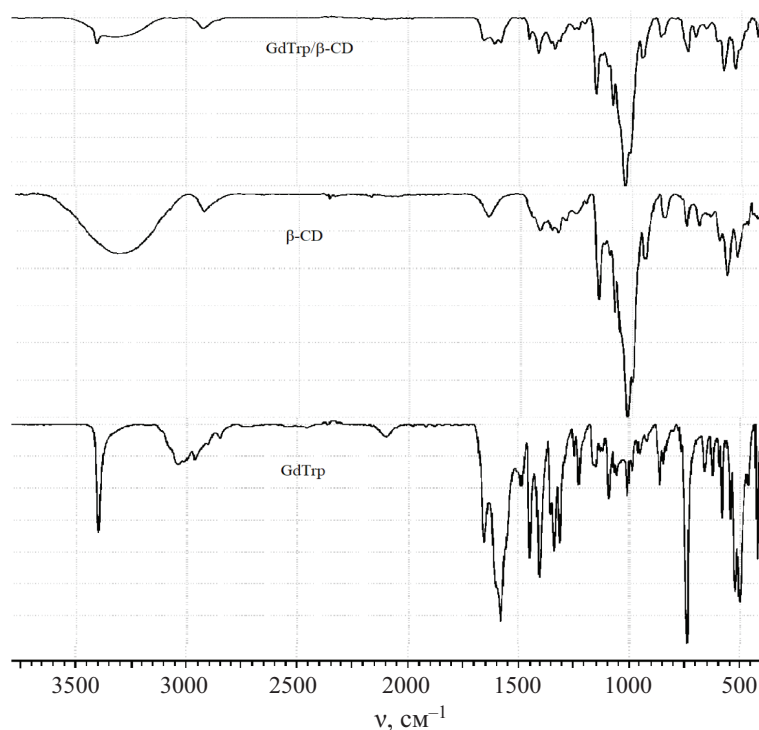
β -CD		Gd(Trp) ₃ C ₁₃ ·3 β -CD·nH ₂ O	
термоэффект, °C	потеря массы, %	термоэффект, °C	потеря массы, %
88	10.16	96.6	10.99
225	1.72	233	31.84
268			
281			
316			
336	63.24	440.6	28.69
489	23.48	531.1	24.15

^a Экзоэффекты выделены полужирным шрифтом.

в исследуемом комплексе включения варьируется в области 25–30 молекул, основная часть которых координирована на поверхности β -CD.

Эффекты термодеструкции исследуемого комплекса включения отличаются от эффектов, наблюдаемых в чистом β -CD (табл. 1) и чистом комплексе Gd³⁺ с триптофаном. Так, вторая и третья стадии пиролиза комплекса включения, вероятно,

обусловлены разложением Trp и β -CD в интервале 200–450°C (эндоэффект 233°C и экзоэффект 440°C с потерей массы 60.53%). На четвертой стадии происходит деструкция β -CD в интервале 450–640°C с потерей массы 24.15% (интенсивный экзотермический пик с максимумом при 531°C). Дальнейший нагрев до 900°C дает остаточную массу 3.6% оксихлорида гадолиния (GdClO). При

**Рис. 2.** ИК спектры GdTrp, β -CD, комплекса включения (GdTrp/ β -CD).

этом температура разложения Trp и β -CD в комплексе включения понизилась, что дополнительно связывают с образование комплекса включения [21]. Анализ данных ТГА-исследований и данных титрования на содержания металла и лиганда позволили определить состав изучаемого комплекса как $Gd(Trp)_3Cl_3 \cdot 3\beta\text{-CD} \cdot nH_2O$, где $n = 25\text{--}30$.

ИК спектры $GdTrp$, $Gd(Trp)_3Cl_3 \cdot 3\beta\text{-CD} \cdot nH_2O$, $\beta\text{-CD}$ показаны на рис. 2. ИК спектр комплекса включения схож со спектром чистого циклодекстрина, что указывает на отсутствие изменений в структуре молекулы-хозяина ($\beta\text{-CD}$) и слабое взаимодействие ее с молекулой гостя (комплекса гадолиния с триптофаном). Спектр $\beta\text{-CD}$ характеризуется широкой полосой при 3309 см^{-1} , которая принадлежит валентным колебаниям связи O–H. Валентные колебания связей C–H появляются при 2925 см^{-1} , при 1645 см^{-1} регистрируются деформационные колебания фрагмента R–O–N в CОН-группах. Полосы поглощения в области $1413\text{--}1205\text{ см}^{-1}$ относятся к деформационным колебаниям фрагментов H–C–N и H–C–C RCH₂OH и RCHON групп. Интенсивная полоса при 1022 см^{-1} принадлежит валентным колебаниям C–O, а полоса, наблюдаемая при 1151 см^{-1} , соответствует асимметричным гликозидным валентным колебаниям фрагмента C–O–C [22, 23].

Полосы поглощения молекулы гостя накладываются на ИК спектр циклодекстрина с небольшими изменениями в интенсивности и частотах, что свидетельствует о сохранении комплекса гадолиния с триптофаном при образовании тройного комплекса и слабом взаимодействии его с молекулой хозяина [6]. При отнесении полос поглощений триптофана и его комплекса с Gd^{3+} использовали данные из работ [24, 25]. Данные ИК спектров комплекса гадолиния(III) с триптофаном подтверждают координацию иона гадолиния(III) с ионизированной карбоксильной группой (частоты асимметричных и симметричных валентных колебаний карбоксильной группы COO^- – $1610, 1413\text{ см}^{-1}$). Поглощение иминогруппы гетероцикла (3400 и 1583 см^{-1}) и ионизированной α -аминогруппы NH_3^+ (1454 см^{-1}) в комплексе и лиганде не изменяется, что свидетельствует о неучастии этих групп в образовании координационной связи с ионом гадолиния(III).

В спектрах исследуемого комплекса включения наблюдается наложение полос поглощения $\beta\text{-CD}$ и комплекса гадолиния(III) с триптофаном в области

$1660\text{--}1500, 1338\text{--}1232, 738$ и $546\text{--}424\text{ см}^{-1}$. В первом случае происходит перекрывание валентных асимметричных колебаний COO^- -группы с полосами поглощения бензольного кольца триптофана, а полоса, проявляющаяся при 1454 см^{-1} , принадлежит деформационным колебаниям NH_3^+ -группы триптофана.

Сравнение ИК спектров $\beta\text{-CD}$, $GdTrp$ со спектром комплекса включения позволяет сделать следующие выводы. В спектре комплекса включения наблюдаются основные полосы поглощения $\beta\text{-CD}$ и хорошо видны полосы поглощения ионизированных amino- и карбоксильных групп L-триптофана, не входящих в полость $\beta\text{-CD}$ (табл. 2). При этом полосы поглощения ионизированной карбоксильной группы COO^- , связанной с ионом Gd^{3+} , закономерно имеют пониженные частоты и наблюдаются в области $1660\text{--}1500\text{ см}^{-1}$, как и в ИК спектре чистого комплекса. Судя по ИК спектру, полосы поглощения ионизированной аминогруппы NH_3^+ не смещаются, что свидетельствует о неучастии аминогруппы в координации. В высокочастотной области на фоне полос поглощения гидроксильных групп $\beta\text{-CD}$ (3326 см^{-1}) наблюдается полоса поглощения NH-группы пиррольного кольца L-триптофана (3400 см^{-1}), не участвующей в координации. Все это позволяет

Таблица 2. Частоты колебаний основных групп комплекса включения $Gd(Trp)_3Cl_3 \cdot 3\beta\text{-CD} \cdot nH_2O$.^a

Отнесение	$\nu, \text{см}^{-1}$
$\nu[NH(r)_{Trp}]$	3400 ср
$\nu(OH)$ (H_2O + первичные гидроксилы, $\beta\text{-CD}$)	3326 ш
$\nu(C-H)$ (CH, CH_2 , $\beta\text{-CD}$)	2923 ср
$\delta(OH)$ ($C-OH_{\beta\text{-CD}}$ + COO^-_{Trp})	1658 ср
$\nu_{as}(COO^-_{Trp})$	1610 ср
$\delta[NH(r)_{Trp}] + \nu(R_{Trp})$	1583 ср
$\delta_s(NH_3^+_{Trp})$	1454 пл
$\delta(C-H)$ (CH_2OH , $CH-OH$, $\beta\text{-CD}$)	1413–1249
$\nu(C-O-C) + \nu(C-O-H_{\beta\text{-CD}})$	1153–998
$\delta(C-H_{\beta\text{-CD}})$	944–848
$\delta(r_{Trp})$	738 ср, 657 сл
$\delta(C-H_{\beta\text{-CD}})$	705 сл
$\delta(C-H_{\beta\text{-CD}})$	607–526
$\delta(R_{Trp})$	424 сл

^a R – бензольное кольцо, r – пиррольное кольцо.

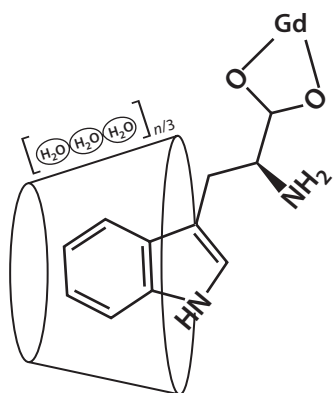


Рис. 3. Схематическое изображение фрагмента предполагаемого комплекса включения.

считать, что COO^- -группа L-Trp координируется с ионом Gd^{3+} , а ионизированная NH_3^+ -группа не участвует в координации. Фрагмент изучаемого комплекса приведен на рис. 3.

Для определения изменений в структурах компонентов в результате взаимодействия, сравнивались дифрактограммы исходников и комплекса включения (рис. 4). Хорошо видно, что рентгенограмма комплекса включения содержит все основные фазы цикло-

декстрина, определяющего структуру образующегося соединения с наложением фаз хлорида гадолиния. В тоже время в дифрактограмме комплекса включения не наблюдаются характерных пиков кристаллического триптофана (в дифрактограмме триптофана наблюдаются резкие пики с высокой интенсивности при $2\theta = 4.7^\circ, 14.04^\circ, 18.96^\circ$). Это может указывать на то, что триптофан находится в полости β -CD и не формирует плоскости твердой фазой. Пики Gd(III) на дифрактограмме комплекса включения проявляются, потому что Gd(III) расположен снаружи. Изменения интенсивности отличительных пиков от молекулы-хозяина (β -CD) являются факторами, по которым можно судить об образовании новой фазы, и, следовательно, могут считаться подтверждением образования комплекса включения [18, 26].

На рис. 5 приведен спектр ЭПР комплекса включения $\text{Gd}(\text{Trp})_3\text{Cl}_3 \cdot 3\beta\text{-CD} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и эталона по g -фактору $\text{MgO}:\text{Mn}^{2+}$ (на рисунке отмечены звездочкой). Как видно из рисунка, для исследуемого комплекса включения характерно наличие следующих значений g -фактора: 1.99, 2.79 и 5.90.

Как известно [27], спектры ЭПР X-диапазона ионов Gd(III), присутствующих при низких концентрациях практически в любом типе стеклообразного носителя имеют тенденцию к наличию трех характерных

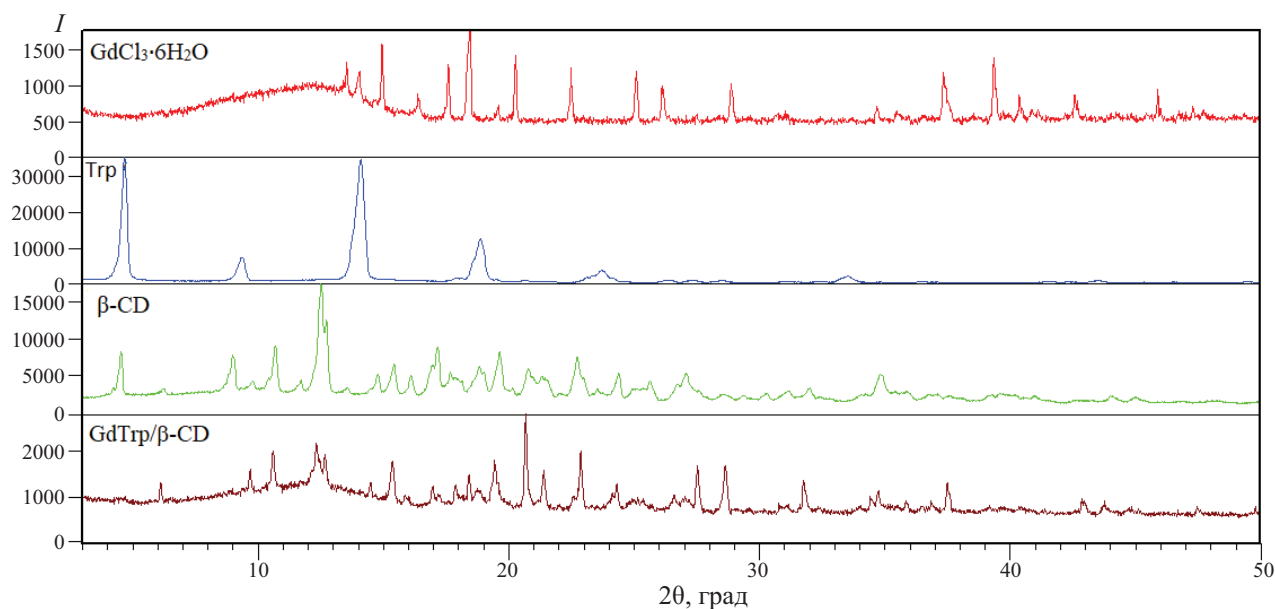


Рис. 4. Дифрактограммы комплекса включения ($\text{GdTrp}/\beta\text{-CD}$), $\beta\text{-CD}$, Trp, $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

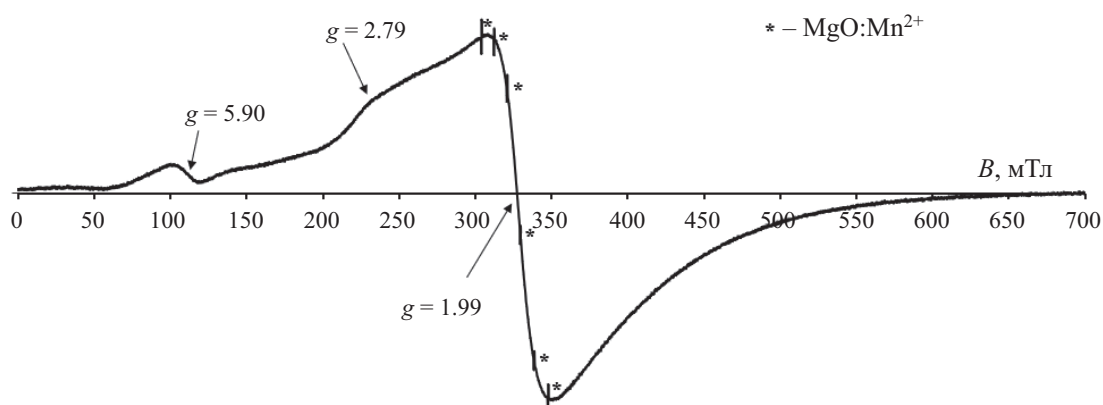


Рис. 5. Спектр ЭПР комплекса включения $\text{Gd}(\text{Trp})_3\text{Cl}_3 \cdot 3\beta\text{-CD} \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

значений g -фактора: 2.0, 2.8 и 6.0. Такой тип спектра ЭПР $\text{Gd}(\text{III})$ получил название «U-спектр» ввиду его широкого распространения в различных стеклообразных и неупорядоченных поликристаллических материалах. Также в спектрах ЭПР X-диапазона ионов $\text{Gd}(\text{III})$ в стеклах могут наблюдаться эффективные значения g -фактора от 3.3 до 3.6 и/или от 4.3 до 4.8. Ожидается, что U-спектр будет преобладать только тогда, когда ионы $\text{Gd}(\text{III})$ могут достигать высокого координационного числа (≥ 6) в пределах структурно неупорядоченной матрицы [27], так как в этих местах ионы гадолиния испытывают относительно слабое кристаллическое поле [28]. Согласно данным работы [29], спектры ЭПР ионов $\text{Gd}(\text{III})$ со значениями g -фактора 5.9, 2.79 и 1.98, наложенными на широкий резонанс при значении $g \sim 2.0$, характерны для комбинации кубической и тетрагональной симметрии. Все это подтверждает координацию ионов Gd^{3+} с кислородными атомами карбоксильной группы триптофана и, возможно, с 1 молекулой воды с образованием координационного полиэдра смешанной симметрии.

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно считать, что последовательным смешиванием растворов $\beta\text{-CD}$ и Trp с добавлением раствора хлорида гадолиния нами получен комплекс включения состава $\text{Gd}(\text{Trp})_3\text{Cl}_3 \cdot 3\beta\text{-CD} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. С помощью физико-химических методов проведено исследование возможности образования комплекса включения типа *хозяин–гость* при взаимодействии ароматической аминокислоты (L-триптофана) и $\beta\text{-CD}$.

Вероятно, комплекс включения образуется путем погружения аминокислотного ароматического радикала во внутреннюю гидрофобную полость молекул $\beta\text{-CD}$ и координацией ионов Gd^{3+} с карбоксильной группой триптофана, находящейся вне полости $\beta\text{-CD}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали β -циклодекстрин, L-триптофан, $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ квалификации ХЧ.

Термогравиметрический анализ (ТГА) порошка исследуемого комплекса проводили на приборе NETZSCH STA 409 PC/PG в атмосфере воздуха в интервале $30\text{--}1000^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева 10 K/мин . ИК спектры порошка исследуемого комплекса записаны на ИК Фурье-спектрометре VERTEX 70 в области $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ методом нарушенного полного внутреннего отражения. Спектр ЭПР порошка соединения $\text{Gd}(\text{III})$ с β -циклодекстрином и L-триптофаном и эталона по g -фактору (ЭПР-стандарт $\text{MgO}:\text{Mn}^{2+}$, JEOL) записаны на ЭПР спектрометре JEOL JES FA-300 на частоте 9.14 ГГц с частотой модуляции 100 кГц . Запись спектров ЭПР проводили при комнатной температуре. Рентгенофазовый анализ образцов порошка исследуемого комплекса проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu). Содержание металла в комплексе определяли с помощью титрования слабокислого раствора 0.01 н. раствором ЭДТА в присутствии 0.1% -ного спиртового раствора кислородного оранжевого.

Синтез комплекса включения. Для получения комплекса включения в системе Gd(III)–L-Trp– β -CD 0.0612 г (0.3 ммоль) L-Trp растворяли в 20 мл горячей дистиллированной воды, 1 г (0.9 ммоль) β -CD растворяли в 25 мл горячей дистиллированной воды, 0.04 г (0.1 ммоль) хлорида гадолиния(III) растворяли в 5 мл воды. К раствору L-Trp добавляли раствор β -CD и перемешивали при 30°C в течение 1 ч, затем в этот раствор добавляли раствор хлорида гадолиния(III) и 30 мин перемешивали при той же температуре, после чего упаривали раствор при 50°C и оставляли для дальнейшей кристаллизации при комнатной температуре. Полученный мелкокристаллический порошок сушили в вакуум-эксикаторе.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буков Николай Николаевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8559-110X>

Иванин Сергей Николаевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9352-5970>

Кузнецова Светлана Львовна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8868-0730>

Исаева Элина Лечаевна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8403-5240>

Хасеева Седа Саламбековна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8462-8801>

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Эколого-аналитический центр» и Научно-образовательному центру «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» Кубанского государственного университета за оказанную помощь при проведении данного исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmad K., Khan M.Q., Khan R.A., Kim H. // Mater. Chem. Phys. 2022. Vol. 287. P. 126297. doi 10.1016/j.matchemphys.2022.126297
2. Garrido M., Rodríguez A.B., Terrón M.P. // Aging: Oxidative Stress and Dietary Antioxidants. 2014. P. 129. doi 10.1016/B978-0-12-405933-7.00013-5
3. Болотин С.Н., Буков Н.Н., Волынкин В.А., Панюшкин В.Т. Координационная химия природных аминокислот. М.: LKI, 2008. С. 240.
4. Kowalska-Baron A. // Comput. Theor. Chem. 2015. Vol. 1057. P. 7. doi 10.1016/j.comptc.2015.01.010
5. Löbmann K., Grohgan H., Laitinen R., Strachan C., Rades T. // Eur. J. Pharm. Biopharm. 2013. Vol. 85. P. 873. doi 10.1016/j.ejpb.2013.03.014
6. Ляшенко Д.Ю. // Поверхность. 2018. Т. 25. Вып. 10. С. 153. doi 10.15407/Surface.2018.10.154
7. Zarzycki P.K., Fenert B., Glód B.K. // Encapsulations. 2016. Vol. 2. P. 717. doi 10.1016/B978-0-12-804307-3.00017-X
8. Roy M.N., Roy A., Saha S. // Carbohydr. Polym. 2016. Vol. 151. P. 458. doi 10.1016/j.carbpol.2016.05.100
9. Nishijo J., Tsuchitani M. // J Pharm Sci. 2001. Vol. 90. P. 134. doi 10.1002/1520-6017(200102)90:2<134::AID-JPS4>3.0.CO;2-T
10. Shanmugam M., Ramesh D., Nagalakshmi V., Kavitha R., Rajamohan R., Stalin T. // Spectrochim. Acta (A). 2008. Vol. 71. P. 125. doi 10.1016/j.saa.2007.10.054
11. Caso J.V., Russo L., Palmieri M., Maltieri G., Galdiero S., Falanga A., Isernia C., Iacovino R. // Amino Acids. 2015. Vol. 47. P. 2215. doi 10.1007/s00726-015-2003-4
12. Song L.X., Teng C.F., Yang Y. // J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem. 2006. Vol. 54. P. 221. doi 10.1007/s10847-005-7970-8
13. Xie G., Tian W., Wen L., Xiao K., Zhang Z., Liu Q., Hou G., Li P., Tian Y., Jiang L. // ChemCommun. 2015. Vol. 51. P. 3135. doi 10.1039/C4CC09577D
14. Esmaeilpour D., Shityakov S., Tamaddon A.M., Bordbar A.K. // Carbohydr. Polym. 2021. Vol. 262. P. 117868. doi 10.1016/j.carbpol.2021.117868
15. Akita T., Matsui Y., Yamamoto T. // J. Mol. Struct. 2014. Vol. 1060. P. 138. doi 10.1016/j.molstruc.2013.12.020
16. Liu Y., Han B.-H., Li B., Zhang Y.-M., Zhao P., Chen Y.-T., Wada T., Inoue Y. // J. Org. Chem. 1998. Vol. 63. P. 1444. doi 10.1021/jo971466b
17. Norkus E. // J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem. 2009. Vol. 65. P. 237. doi 10.1007/s10847-009-9586-x
18. Braga S.S., Ferreira R.A., Goncalves I.S., Pillinger M., Rocha J., Teixeira-Dias J.J.C., Carlos L.D. // J. Phys. Chem. (B). 2002. Vol. 106. P. 11430. doi 10.1021/jp0204004
19. Ribeiro A.O., Serra O.A. // J. Braz. Chem. Soc. 2007. Vol. 18. P. 273. doi 10.1590/S0103-50532007000200005
20. Brown S.E., Coates J.H., Easton Ch.J., Eyk S.J., Lincoln S.F., May B.L., Stile M.A., Whalland C.B., Williams M.L. // J. Chem. Soc. Chem. Commun. 1994. P. 47. doi 10.1039/C39940000047
21. Shojaei M., Pirouzmanda M., Khatamiana M., Azizi S., Soleymani J. // J. Mol. Struct. 2023. Vol. 1275. P. 134659. doi 10.1016/j.molstruc.2022.134659

22. Gao Z.-W., Zhao X.-P. // J. Colloid Interface Sci. 2005. Vol. 289. P. 56. doi 10.1016/j.jcis.2005.03.027
23. Phan T.N.T., Bacquet M., Laureyns J., Morcellet M. // Phys. Chem. Chem. Phys. 1999. Vol. 1. P. 5189. doi 10.1039/A905713G
24. Cao X., Fischer G. // J. Phys. Chem. (A). 1999. Vol. 103. P. 9995. doi 10.1021/jp992421c
25. Тен Г.Н., Глухова О.Е., Слепченко М.М., Щербак-ова Н.Е., Баранов В.И. // Изв. Саратов. ун-ва. Нов. сер. Сер. Физика. 2017. Т. 17. Вып. 1. С. 20. doi 10.18500/1817-3020-2017-17-1-20-32
26. Mohandoss S., Ahmad N., Khan M.R., Lee Y.R. // J. Mol. Liq. 2023. Vol. 385. P. 122411. doi 10.1016/j.molliq.2023.122411
27. Mazur M., Poprac P., Valko M., Rhodes C.J. // J. Sol-Gel Sci. Technol. 2016. Vol. 79. P. 220. doi 10.1007/s10971-016-4014-3
28. Rada S., Chelcea R., Culea M., Culea E. // J. Mater. Sci. 2011. Vol. 46. P. 1289. doi 10.1007/s10853-010-4913-6
29. Iwamoto W., Vargas J.M., Holanda Jr. L.M., Alves E., Moreno M.S., Oseroff S.B., Pagliusi P.G., Rettori C. // J. Nanosci. Nanotechnol. 2010. Vol. 10. P. 1. doi 10.1166/jnn.2010.2438

Inclusion Complex of Gd(III) with β -Cyclodextrin and L-Tryptophan

S. S. Khasaeva^{a,*}, N. N. Bukov^a, S. N. Ivanin^a, S. L. Kuznetsova^a, and E. L. Isaeva^a

^a Kuban State University, Krasnodar, 350040 Russia

^b Chechen State University named after A. A. Kadyrov, Grozny, 364024 Russia

*e-mail: justchemist@mail.ru

An inclusion complex of gadolinium(III) with L-tryptophan (Trp) and β -cyclodextrin (β -CD) with the composition $\text{Gd}(\text{Trp})_3\text{Cl}_3 \cdot 3\beta\text{-CD} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ was synthesized. It was established that the complex is formed due to the entry of the aromatic part of the L-Trp molecule into the β -CD cavity, and the Gd^{3+} ions are located in the outer sphere.

Key words: inclusion complex, L-tryptophan, gadolinium(III), β -cyclodextrin, physico-chemical measurement methods