

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА –
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЯЗЫК ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ”

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МЕДИЦИНЕ

© 2020 г. В. Н. Чарушин^{a,*}, Ю. А. Титова^{a,**}, Е. Р. Милаева^{b,***}

^aИнститут органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: charushin@ios.uran.ru

**E-mail: titova@ios.uran.ru

***E-mail: milaeva@med.chem.msu.ru

Поступила в редакцию 24.01.2020 г.

После доработки 15.02.2020 г.

Принята к публикации 17.02.2020 г.

В докладе приведён краткий обзор химических элементов, соединения которых находят применение в медицине: от широко распространённых органогенных элементов (углерод, водород, азот, кислород, сера и фосфор), входящих в структуру белков и нуклеиновых кислот клеток живых организмов и определяющих передачу наследственной информации, до редко встречающихся в живой природе органических соединений фтора – их синтетические производные всё более прочно входят в арсенал современных лекарственных средств. Значительное внимание уделено металлопротеинам, играющим важную роль в биохимии жизненно важных процессов, а также соединениям металлов, широко используемым в медицине. Особое внимание заслуживают химические элементы и их изотопы, соединения которых применяются в ядерной медицине для диагностики и лечения широкого круга заболеваний, прежде всего онкологических и сердечно-сосудистых.

Ключевые слова: органогенные элементы, макро- и микроэлементы, металлы жизни, металлопротеины, радиоактивные элементы, позитрон-эмиссионная томография (ПЭТ), боронейтронозахватная терапия, бета-лактамы антибиотики, гетероциклы, фторхинолоны.

DOI: 10.31857/S0869587320040039

Величайшее открытие Д.И. Менделеева – периодический закон – во многом изменило историю науки и открыло широкие возможности для развития новых научных направлений [1]. В данном обзоре обсуждается значение химических элементов периодической системы, играющих ключевую роль в жизнедеятельности живых организмов, а также элементов, соединения которых используются в медицине.

Лекарственные средства сопровождают человечество с незапамятных времен, и на ранних этапах развития медицины в её арсенале преобладали самые простые химические вещества (вода, винный спирт, глюкоза, поваренная соль, сода, поташ, сулема и др.), а также водные или спиртовые экстракты природных биологически активных соединений, терапевтическое действие которых устанавливалось эмпирическим путём.



ЧАРУШИН Валерий Николаевич – вице-президент РАН, председатель Уральского отделения РАН, директор ИОС УрО РАН. ТИТОВА Юлия Алексеевна – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории гетероциклических соединений ИОС УрО РАН. МИЛАЕВА Елена Рудольфовна – доктор химических наук, заведующая кафедрой медицинской химии и тонкого органического синтеза химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.



Рис. 1. Эмблема Международного года Периодической таблицы химических элементов

Химический анализ, позволяющий надёжно устанавливать элементный состав веществ, появился лишь в середине XIX в. Сведения о химических элементах и их свойствах в то время были весьма ограниченными. При открытии периодического закона Д.И. Менделеевым в его таблице содержалось около 60 химических элементов, то есть немногим более половины известных сегодня элементов [1].

Из 118 элементов современной Периодической таблицы один – менделевий – получил название в честь российского учёного – автора таблицы, а ещё 6 имеют непосредственное отношение к российской науке самим фактом открытия. Первым из них стал названный в честь нашего Отечества рутений – 44 элемент таблицы. Его открыл профессор химии Казанского университета Карл Карлович Клаус при исследовании уральской платиновой руды в 1844 г. [1], то есть за четверть века до того как Д.И. Менделеев сформулировал основные положения периодического закона. В 1846 г. научное достижение К.К. Клауса было отмечено Демидовской премией (учреждена в 1832 г. уральским промышленником П.Н. Демидовым). Кстати, не так часто упоминается факт, что Дмитрий Иванович Менделеев удостоился звания лауреата Демидовской премии 1862 г. за написание первого российского учебника по органической химии. Что касается открытого К.К. Клаусом рутения, то в те годы никто не представлял, конечно, какое значение будут иметь в будущем комплексные соединения этого уникального элемента – аналога платины, как и самой платины для металлорганического катализа, а также для медицины [1].

История открытия другого элемента – самария – также связана с Уралом. Он был выделен из минерала самарскита, обнаруженного рабочими инженера В.Е. Самарского-Быховца при прове-

Таблица 1. Наиболее важные органогенные элементы

Элемент	Содержание в организме человека, %
Водород (H)	10
Углерод (C)	18
Азот (N)	3
Кислород (O)	65

дении горных работ в Ильменском заповеднике ужноуральского города Миасса в 1847 г. [1].

Открытие целой серии элементов (105 – дубний, 114 – флеровий, 115 – московий и 118 – оганесон) связано с работами знаменитой Флёрвской лаборатории Объединённого института ядерных исследований в Дубне. Вполне закономерно, что Демидовский научный фонд отметил вклад академика Ю.Ц. Оганесяна в открытие новых трансураниевых элементов, присудив ему Демидовскую премию 2019 г.

Роль элементов в жизнедеятельности живых организмов. Органогенные элементы. Обратим внимание на те элементы, которые представлены на эмблеме Международного года Периодической таблицы: помимо 101-го элемента (менделевия), на ней изображены водород, углерод, азот и кислород. Это важнейшие органогенные элементы, к числу которых относят также фосфор и серу (рис. 1, табл. 1).

Именно органогенные элементы входят в состав биосферы нашей планеты (атмосферные вода, кислород, азот, углекислый газ, метан и другие природные источники углеводов), а также определяют процессы фотосинтеза и другие важнейшие процессы в живой клетке, ведущие к созданию ключевых классов органических веществ, таких как аминокислоты, пептиды, белки, углеводы (простые и сложные), липиды и фосфолипиды (из которых построены клеточные мембраны) и многие биологически активные гетероциклические соединения [2]. Уникальность атомов углерода, их способность образовывать неограниченное число одинарных (C–C), двойных (C=C) и тройных (C≡C) связей, формировать циклические и каркасные соединения, олигомеры и полимеры, а также образовывать связи с другими элементами (C–H, C–N, C–O, C–S) определяют многообразие мира органических соединений. В качестве примера можно привести структуру гормона удовольствия *окситоцина*, состоящего из многих аминокислотных фрагментов и тех же органогенных элементов (рис. 2) [2, 3].

Те же элементы (C, H, N, O) входят в состав молекул кофермента “никотин-амидадениндинуклеотид” (НАД) и его восстановленной формы (НАД-Н), которые ответственны за важнейшие окислительно-восстановительные процессы в организме. Здесь появляется ещё один важнейший элемент – фосфор, входящий в виде остатков фосфорной кислоты в нуклеотидные фрагменты (рис. 3) [2, 3].

И, наконец, верх совершенства – структура ДНК, открывшая новую эру в биологии и медицине, собрана из тех же четырёх органогенных элементов (водород, углерод, азот, кислород) и фосфора из остатков фосфорной кислоты, которые связывают нуклеозиды в определённую по-

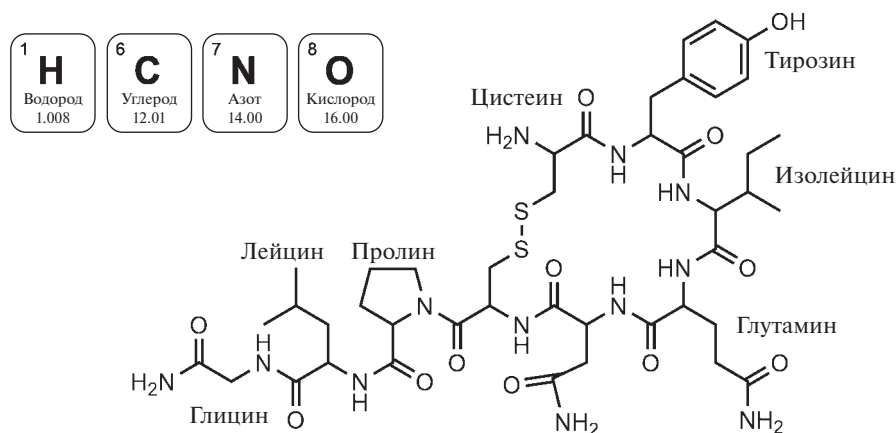


Рис. 2. Структура гормона окситоцина

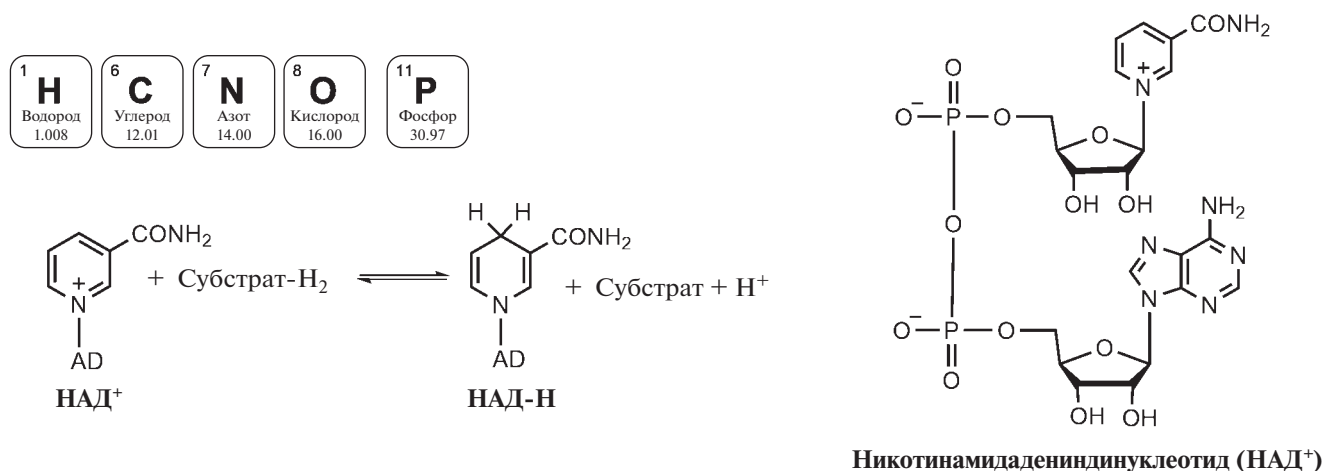


Рис. 3. Структура коферментов НАД⁺ и НАД-Н

следовательность нуклеотидов. Именно гетероатомы в структуре ДНК определяют способность гетероциклических оснований (аденин, гуанин, тимин и цитозин) к образованию многочисленных водородных связей “кислород–водород” и “азот–водород” и формированию двойной спирали ДНК [2, 3].

“Металлы жизни”. Из 118 химических элементов периодической таблицы только 16 относят к так называемым элементам жизни. Мы уже отметили шесть неметаллов (H, O, N, C, P, S), составляющих основу биологически важных молекул и макромолекул. К ним следует добавить 10 жизненно важных металлов: Na, K, Mg, Ca, Zn, Cu, Co, Mn, Fe, Mo, которые также являются биогенными [4]. Из указанной десятки к макроэлементам относятся 4 металла (натрий, калий, кальций и магний). Каждый из этих элементов исключительно важен, и отклонение его содержания от нормы требует терапевтической корректировки (табл. 2).

Так, натрий (его содержание в организме взрослого человека составляет 150–200 г) отвечает за поддержание кислотно-щелочного баланса, осмотического давления, уровня pH крови и транспорт аминокислот и различных анионов через мембраны клеток. Существуют разнообразные лекарственные составы на основе солей на-

Таблица 2. Макроэлементы

Элемент	Содержание в организме человека, %
Натрий (Na)	0.15
Магний (Mg)	0.05
Калий (K)	0.35
Кальций (Ca)	2.00
Фосфор (P)	1.10
Сера (S)	0.25
Хлор (Cl)	0.15

трия, которые используются в медицине для коррекции отклонений (хлорид, бромид, иодид, сульфат, гидрокарбонат, никотинат, бензоат и др.).

Калий также входит в группу макроэлементов – его содержание в организме взрослого человека составляет около 120 г. Главная биологическая функция калия – формирование потенциалов на мембранах клеток, а также участие в передаче нервных импульсов и регуляции сердечных сокращений. Существуют препараты на основе солей калия, в том числе комбинированные смеси (например, аспарагинат калия и аспарагинат магния), поскольку магний также необходим для ритмичной работы сердца и передачи сигнала в нервной и мышечной тканях.

Из жизненно важных металлов к макроэлементам относится и магний, содержание которого в организме взрослого человека составляет около 25 г. Значительное количество магния содержится в костной ткани (депо магния). Существуют препараты на основе цитрата и оротата магния, например, *магнерот* – для лечения болей и спазмов мышц.

Самый распространенный в организме человека макроэлемент неорганической природы – кальций, который играет ключевую роль в физиологических и биохимических процессах клетки. Ионы кальция (Ca^{2+}) участвуют в процессах свёртывания крови, а также регулируют самые разные внутриклеточные процессы – мышечное сокращение, экзоцитоз, секрецию гормонов и нейромедиаторов. В организме взрослого человека содержится примерно 1.2 кг кальция (2% от веса), из них 99% – в скелете и зубах человека. Его недостаток – прямой путь к остеопорозу и другим физиологическим отклонениям. Трудно переоценить роль соединений кальция в стоматологии.

Не менее важны и микроэлементы, играющие ключевую роль в катализе биохимических процессов [5]. Наиболее значимые из них представ-

Таблица 3. Наиболее важные микроэлементы

Элемент	Суточная потребность, мг
Марганец (Mn)	5
Железо (Fe)	18
Кобальт (Co)	0.2
Медь (Cu)	2
Цинк (Zn)	15
Молибден (Mo)	0.18
Фтор (F)	3
Бром (Br)	1
Иод (I)	0.15
Селен (Se)	0.04

лены рядом из 6 металлов (Fe, Cu, Zn, Mn, Co, Mo) и 4 неметаллов (фтор, бром, иод, селен) (табл. 3). Несмотря на низкое содержание микроэлементов-металлов в организме, они выполняют важнейшие функции, и этот ряд элементов обычно относят к “металлам жизни”. Как правило, в организме они находятся в виде катионов, координационно связанных с гетероатомами аминокислотных фрагментов или с гетероциклами.

Один из важнейших биогенных металлов – железо. Несмотря на незначительное количество содержания этого металла в организме человека (4.5 г), он выполняет множество функций, входя в состав белков-транспортёров и ферментов. Так, комплекс ионов железа с порфирином составляет основу активных центров гемоглобина, способных обратимо связываться с кислородом, координируя 4 молекулы O_2 и обеспечивая его перенос в ткани через кровеносную систему (рис. 4). Содержание гемоглобина в крови человека колеблется в пределах 120–180 г/литр (в норме).

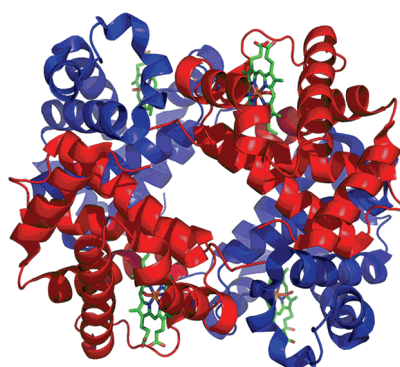
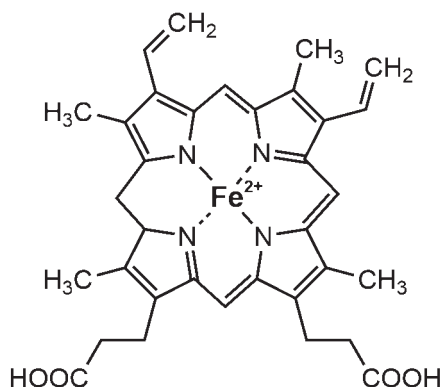


Рис. 4. Комплекс железа с протопорфирином и гемоглобин – железосодержащий белок, играющий важнейшую роль в процессах транспорта кислорода

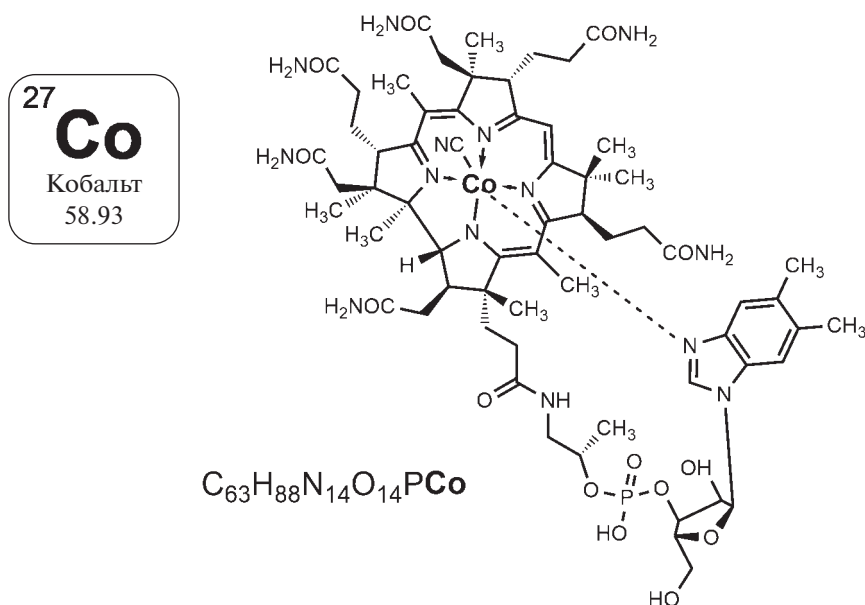


Рис. 5. Структура витамина В₁₂ (аденозилкобаламин)

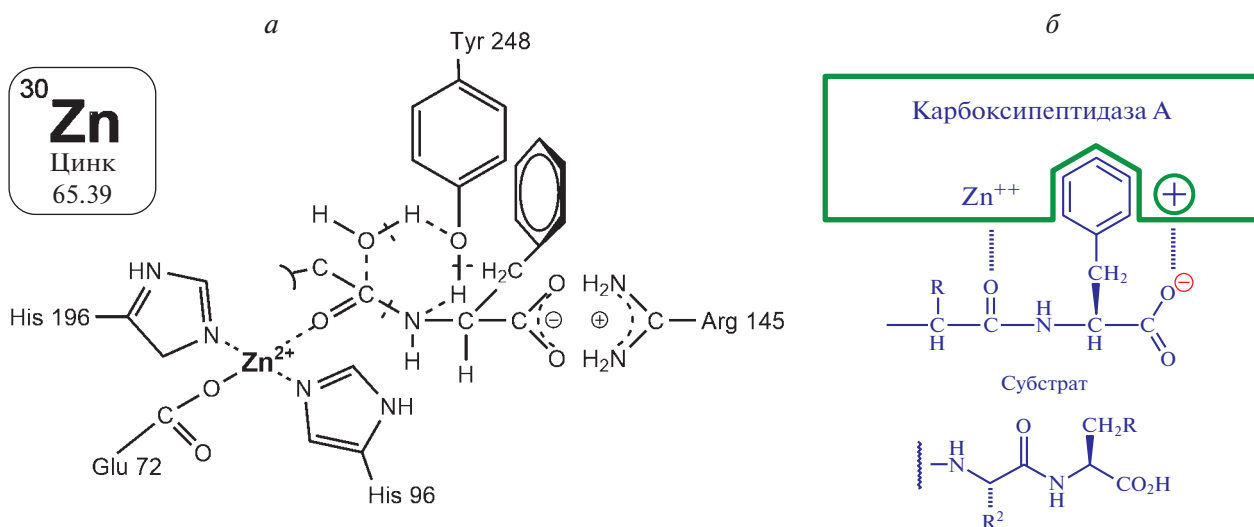


Рис. 6. Пример действия фермента, в состав которого входят ионы цинка:
a – активный сайт карбоксипептидазы А; *б* – пример действия карбоксипептидазы А

Широко распространены также многоцентровые металлоферменты. Важнейший фермент дыхания – цитохром-С-оксидаза – содержит и железо, и медь и осуществляет превращение молекулярного кислорода O₂ в воду. Другим примером служит витамин В₁₂ (рис. 5), который по своему строению относится к сложным координационным соединениям и представляет собой комплекс кобальта с коррином. Определение пространственной конфигурации, а также химической структуры молекулы витамина В₁₂ было выполнено в 1955 г. британским химиком и био-

химиком Дороти Кроуфут-Ходжкин, за что в 1964 г. она была удостоена Нобелевской премии. Витамин В₁₂ важен для здоровья мозга, нервной системы и синтеза ДНК.

Металлопротеины и, в частности, металлоферменты, играют ключевую роль в биохимии. Так, процессы гидролиза пептидных связей в белках катализируются карбоксипептидазой А – ферментом, в состав которого помимо 307 аминокислот входят ионы цинка (рис. 6). Окисление ксантина в мочевую кислоту эффективно происходит с участием фермента ксантиноксидазы, со-

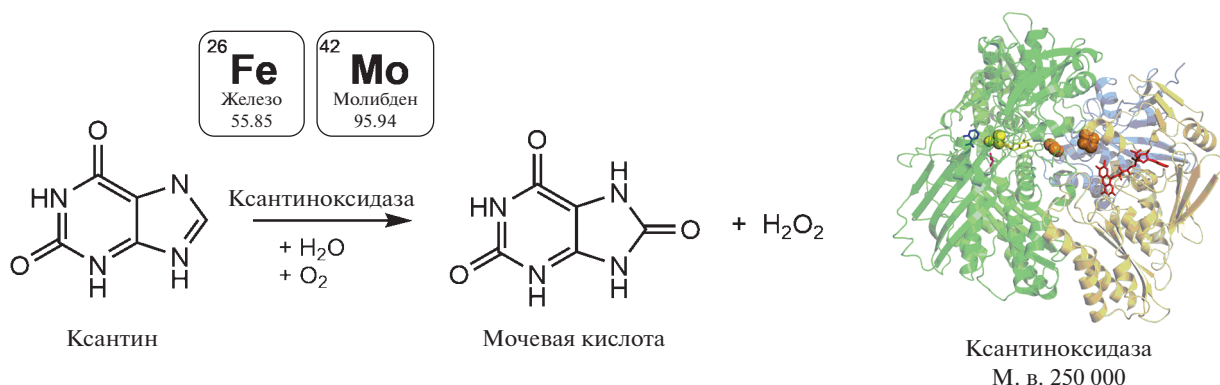


Рис. 7. Действие ксантиноксидазы – многоцентрового фермента, включающего 6 атомов железа и 2 атома молибдена

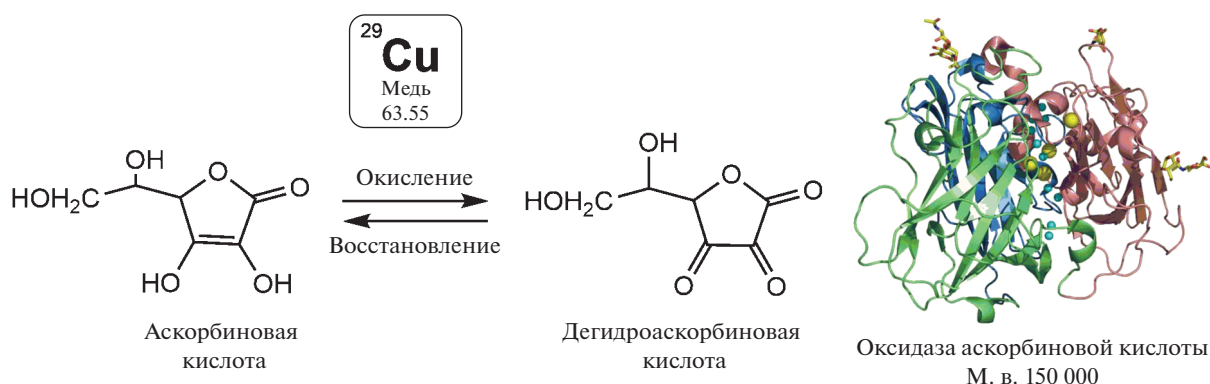


Рис. 8. Действие оксидазы аскорбиновой кислоты – многоцентрового фермента, включающего 6 атомов меди

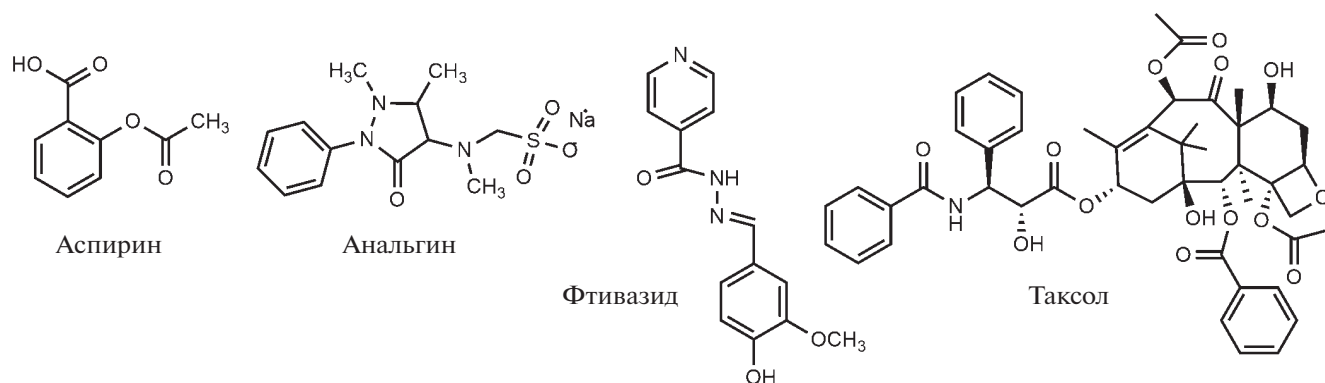


Рис. 9. Структуры некоторых лекарственных препаратов

держашей в своем составе атомы железа и молибдена (рис. 7), а окисление аскорбиновой кислоты – при действии соответствующей оксидазы, содержащей медь (рис. 8).

Элементы, соединения которых используются в медицине. В мире сегодня насчитывается несколько миллионов органических веществ, из них десятки тысяч обладают биологической активностью [6–8]. Именно из этих 4 элементов

(водород, углерод, азот, кислород) собраны структуры большинства лекарственных препаратов синтетического происхождения – таких простых, как *аспирин*, *анальгин*, *фтивазид*, и существенно более сложных, содержащих асимметрично замещённые (хиральные) атомы углерода, – так называемых энантимерно чистых веществ, как, например, противоопухолевый препарат природного происхождения *таксол* (рис. 9) [6–8].

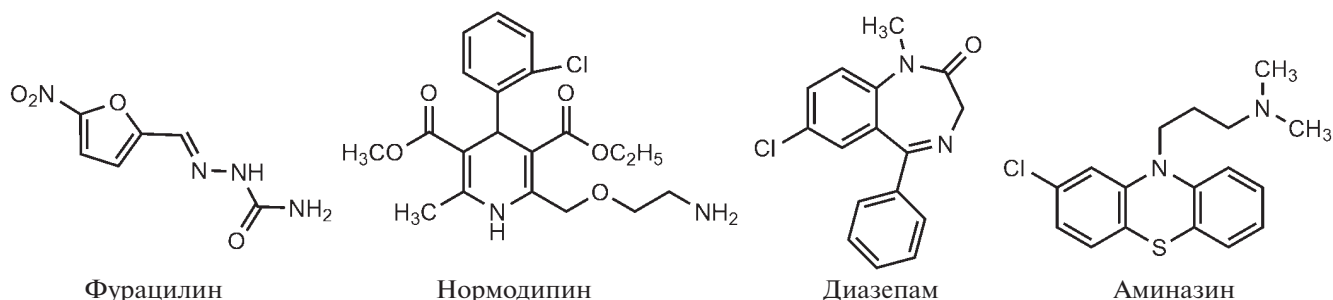
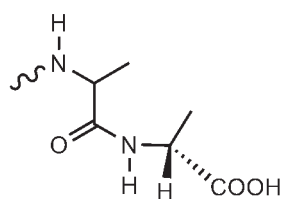
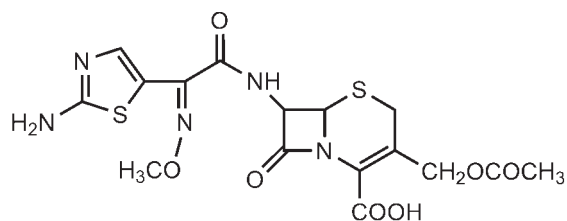
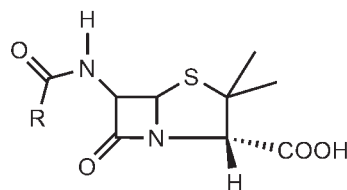


Рис. 10. Структуры некоторых препаратов, содержащих гетероциклические фрагменты

1 H Водород 1.008	6 C Углерод 12.01	7 N Азот 14.00	8 O Кислород 16.00	16 S Сера 32.06
-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	------------------------------------	---------------------------------



Конец пептидной цепи,
связывающийся
с транспептидазой



Цефотаксим

Рис. 11. Ключевые структуры бета-лактамов антибиотиков

Поразительно, что столь ограниченный круг химических элементов периодической системы (водород, углерод, кислород, азот, фосфор, сера и кремний) оказывается достаточным для получения столь внушительного разнообразия органических веществ — лекарственных препаратов, диагностикумов, полимеров и медицинских изделий самого различного назначения. Исключительно важно наличие в этом ряду гетероатомов (азота, кислорода и серы), поскольку в медицинской химии особая роль принадлежит соединениям, содержащим гетероциклический фрагмент. Они вносят самый весомый вклад (более 60%) в арсенал разнообразных лекарственных средств [6–10]. Хорошо известны, к примеру, антибактериальные препараты нитрофуранового ряда (*фурацилин*, *фурадонин*, *фуразолидон*), вазодилаторы и антигипертензивные средства дигидропиридинового типа (*никардипин*, *нифедипин*, *фелодипин*), транквилизаторы группы 1,4-бензодиазепина (*диазепам*, *оксазепам*, *нитразепам*, *феназепам*, *эленум*), нейрорепарации феноксиазинового ряда (*аминазин*, *пропазин*, *левопропазин*) (рис. 10) [6–10]. Гетероциклический мотив выражен и в ряду антибиотиков, таких как открытый известным английским бактериологом А. Флемингом *пеницил-*

лин или полусинтетические аналоги пенициллинов и цефалоспоринов (рис. 11) [6–10].

Всё большее значение приобретает наличие атома фтора в биологически активных соединениях [11, 12]. В органическом мире практически нет природных фторсодержащих органических соединений. В то же время более 20% всех создаваемых в мире препаратов содержат атом фтора, который придаёт им повышенную проницаемость через клеточные мембраны и, как правило, повышает активность. Современный арсенал антибактериальных препаратов уже невозможно представить без *левофлоксацина*, *моксифлоксацина* и других производных семейства фторхинолонов (рис. 12) [12].

В настоящее время интенсивно развивается направление, получившее название “неорганической медицинской химии” [13]. Кроме “металлов жизни” в сферу внимания попадают многие другие элементы и соединения на их основе.

Применение металлосодержащих средств для диагностики и терапии открывает уникальные возможности для борьбы с теми видами патологий, которые не поддавались лечению известными классическими препаратами органической

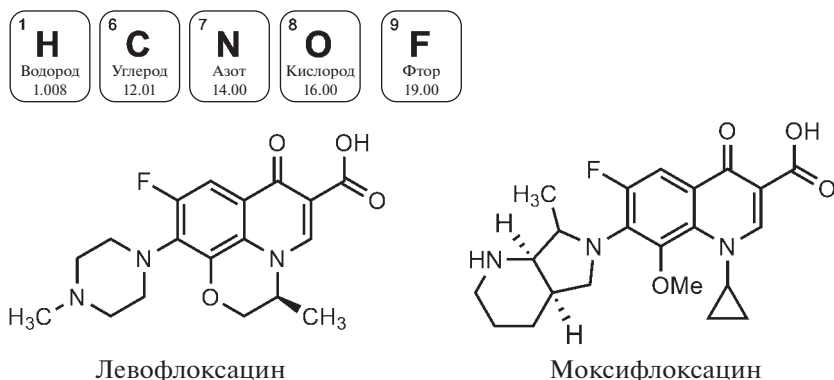


Рис. 12. Структуры важнейших фторхинолонов

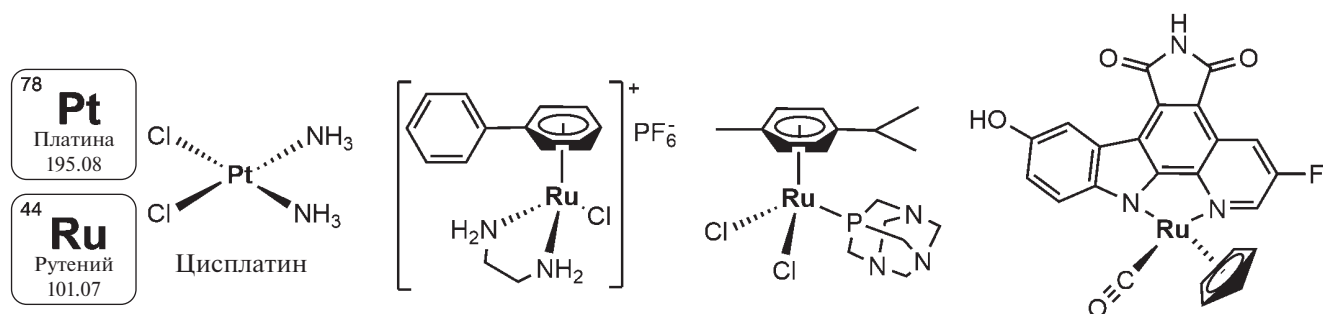


Рис. 13. Цисплатин и комплексные соединения рутения, используемые в медицине

природы. К наиболее известным относятся соединения платины, золота, лития, олова, гадолиния, лантана, введенные в клиническую практику в XX в. [14]. В качестве примера можно назвать первое антибактериальное средство – препарат *сальварсан* – органическое соединение мышьяка, созданное в 1907 г. лауреатом Нобелевской премии П. Эрлихом – выдающимся немецким учёным, одним из основателей химиотерапии.

Весомый вклад в развитие неорганической медицинской химии внёс выдающийся российский химик академик АН СССР А.Н. Несмеянов, который, в частности, впервые в 1971 г. ввёл в медицинскую практику отечественный препарат *ферроцерон* на основе металлоорганического соединения – ферроцена как средство для лечения железодефицитной анемии [15].

В клиническую практику прочно вошли антидепрессанты на основе карбоната лития (например, препарат *седалит* и его аналоги), а сульфат бария много лет используется в диагностике как рентгеноконтрастное вещество. Хорошо известны гастропротекторы и препараты для лечения заболеваний желудочно-кишечного тракта на основе соединений висмута (*де-нол*, *десмол*).

Применение препаратов на основе соединений золота получило название “кризотерапия”.

Такие лекарства, как *кризанол* (ауротиопропанол-сульфонат кальция), *миокризин* (натриевая соль ауротиояблочной кислоты) и *ауранофин* (комплекс триэтилфосфинзолота с тиоглюкозой), активно используются в терапии ревматоидного артрита.

С момента открытия в 1965 г. американским биофизиком Б. Розенбергом антипролиферативной активности *цисплатина* и его введением в 1978 г. в клинику в качестве препарата для лечения онкологических заболеваний успешно используются соединения платины: *цисплатин* и его аналоги – *оксалиплатин*, *карбоплатин*, *недаплатин*, *лобоплатин*, *гептаплатин*. Проводятся клинические испытания для ряда комплексных соединений рутения, проявивших высокую противоопухолевую активность (рис. 13).

Комплексные соединения гадолиния занимают особое место в диагностике, поскольку препараты на их основе (*гадопентетовая кислота*, *гадодиаמיד*, *гадотеровая кислота*) широко применяются в магнитно-резонансной томографии (МРТ) (рис. 14). Контрастные МРТ снимки с применением комплексов гадолиния позволяют диагностировать аномалии, которые не видны при использовании других методов визуализации.

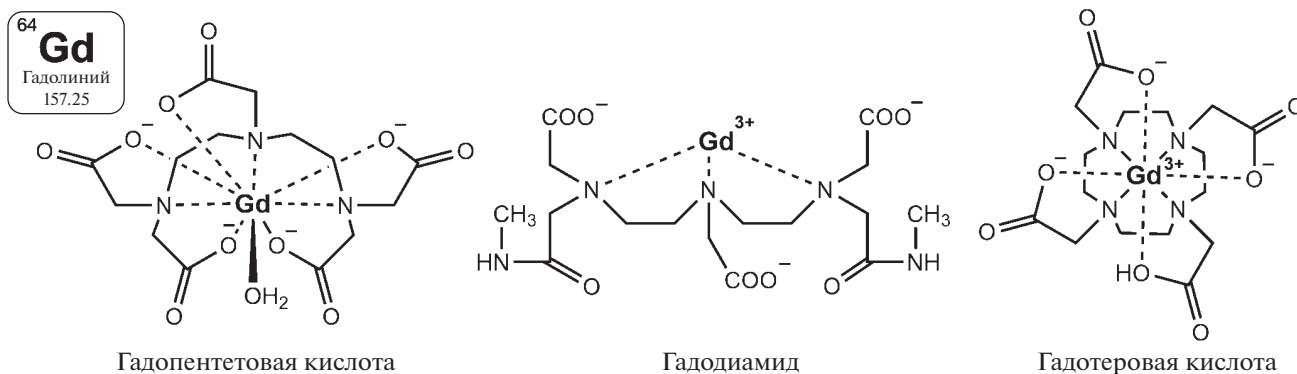


Рис. 14. Контрастные реагенты на основе комплексов гадолиния для МРТ

Диагностика	9 F Фтор 19.00	26 Fe Железо 55.85	29 Cu Медь 63.55	31 Ga Галлий 69.72	32 Ge Германий 72.59	37 Rb Рубидий 85.47	39 Y Иттрий 88.91	40 Zr Цирконий 91.22	43 Tc Технеций 98.91	49 In Индий 114.82	53 I Иод 126.90	54 Xe Ксенон 131.29	56 Ba Барий 137.33	64 Gd Гадолиний 157.25
Радиотерапия	27 Co Кобальт 58.93	38 Sr Стронций 87.62	55 Cs Цезий 132.91	83 Bi Висмут 208.98	85 At Астат (210)	88 Ra Радий (226)	62 Sm Самарий 150.36	67 Ho Гольмий 164.93	71 Lu Лютеций 174.97	89 Ac Актиний (227)				

Рис. 15. Элементы, используемые в радиодиагностике и ядерной медицине

Изотопы элементов в медицине. Важнейшим и бурно развивающимся направлением является ядерная медицина [16]. Десятки химических элементов и радиоактивных изотопов уже сегодня находят применение в диагностике или терапии различных заболеваний, и этот ряд непрерывно растёт (рис. 15) [16].

Радиоактивные изотопы отличаются по характеру излучения (альфа-, бета-распад или жёсткие гамма-кванты), широко варьируется период их полураспада (от минут и часов до многих лет), и, конечно, каждый из методов ядерной медицины имеет свою специфику. Так, в позитронно-эмиссионной томографии в качестве позитрон-излучающих изотопов используют углерод-11 ($T_{1/2} = 20.4$ мин.); азот-13 ($T_{1/2} = 9.96$ мин.); кислород-15 ($T_{1/2} = 2.03$ мин.); а также фтор-18 ($T_{1/2} = 109.8$ мин.).

ПЭТ-сканирование с использованием фтор-дезоксиглюкозы (рис. 16а) широко используется в клинической онкологии. Метод основан на том, что быстрорастущие клетки опухоли интенсивно потребляют глюкозу, что позволяет зарегистрировать при помощи ПЭТ-сканера участки накопления препарата. Препарат на основе метастабильного 99-технеция позволяет выявить функциональные нарушения в деятельности сердечной мышцы (рис. 16б). Для визуализации рака простаты эффективен препарат на основе галлия-68 (рис. 16в), который образует комплекс со специфическим пептидом. Метод ПСМА (простатический специ-

фический мембранный антиген) ПЭТ с галлием-68 позволяет классифицировать рак простаты на любой стадии.

И, конечно, новые горизонты открывают достижения альфа-терапии с использованием актиния-225, преимущество которого состоит в распаде с выделением 4 альфа-частиц.

К ядерной медицине относится также метод бор-нейтронозахватной терапии, в основе которого лежит уникальная способность ядер бора-10 к захвату нейтронов (рис. 17).

Мы видим, какой широкий круг элементов (металлы, неметаллы, радиоизотопы) находит применение в медицине. Даже инертным газам, которые, как известно, обладают наркотическим эффектом, отводится важное место в лечебной практике. По силе своего воздействия наркотический эффект благородных газов убывает в следующем ряду: ксенон-54 – криптон-36 – аргон-18 – неон-10 – гелий-2. Известно также, что гелий в смеси с кислородом используется в медицине для лечения бронхиальной астмы и других заболеваний дыхательных путей.

Полимеры в медицине. В жизни нас всё в большей мере окружают изделия из полимерных материалов. Конечно, они проникли и в медицину, где используются для изготовления протезов костей, зубов, искусственных клапанов, сосудов, других медицинских изделий и материалов [17]. Особое значение имеют биodeградируемые полимеры, которые используются для производства

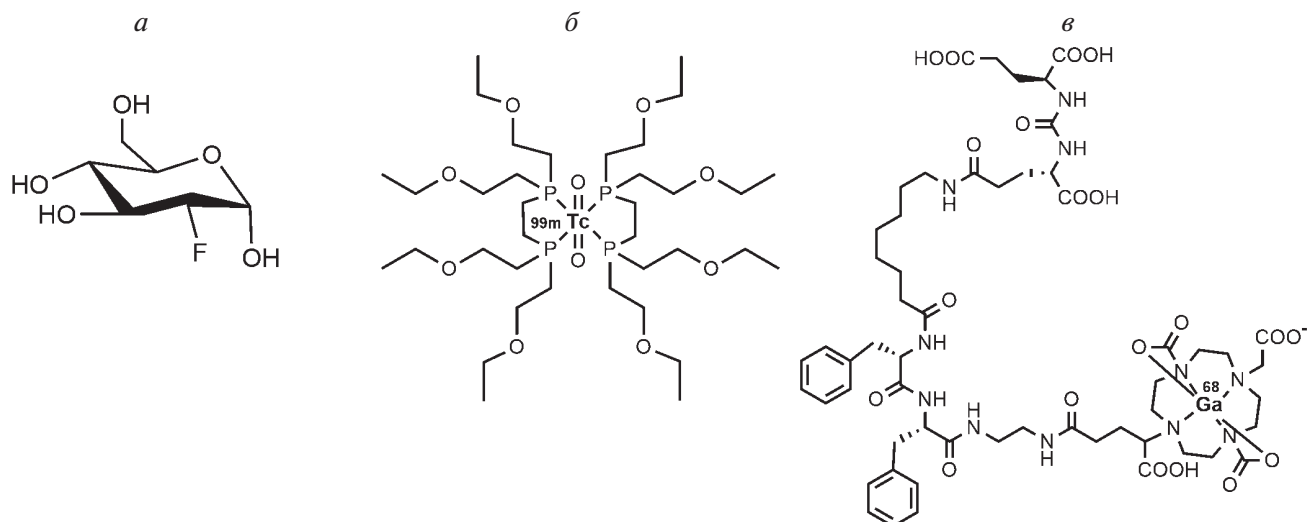


Рис. 16. Примеры радиоактивных веществ, используемых в ядерной медицине:

a – фтордезоксиглюкоза (радиоактивный индикатор – ^{18}F); *б* – препарат на основе метастабильного технеция-99; *в* – препарат на основе галлия-68

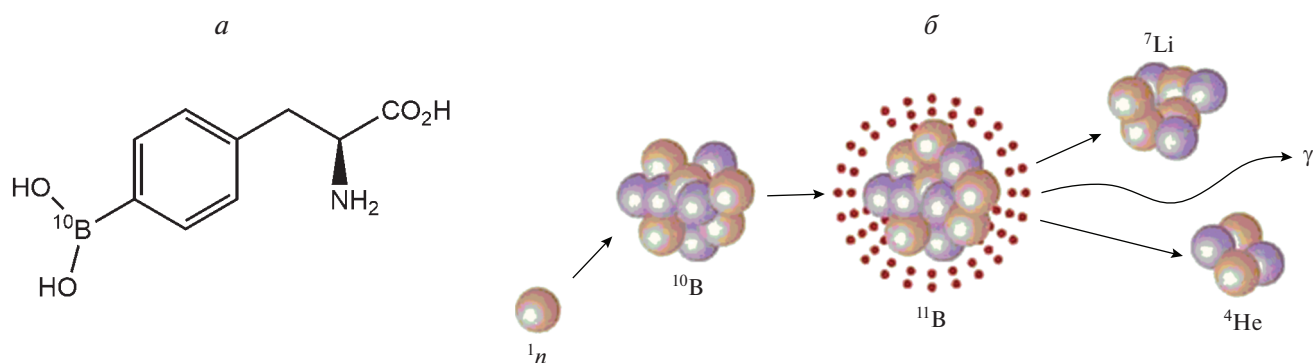


Рис. 17. Иллюстрация метода бор-нейтронозахватной терапии:

a – структура L-борфенилаланина – ^{10}B -содержащего препарата; *б* – схема захвата нейтронов соединениями бора, ведущего к выделению гамма-квантов и разрушению опухоли

рассасываемых хирургических нитей и других медицинских материалов. Большинство из них относится к полимерам органической природы, таким как поливинилпирролидон, карбоксилатные сополимеры, сульфовинол, сульфодекстран, N-окись поливинилпиридина [18].

Известны комплексы полимеров с йодом, которые обладают высокой бактерицидной активностью. Их применяют как в виде водных растворов, так и в виде гелей, пленок, нитей. Препарат *йодинол* (раствор йодного комплекса поливинилового спирта) используется в медицине и ветеринарии, а йодные комплексы поливинилпирролидона служат эффективными антисептиками.

Важно также отметить особую роль веществ, содержащих кремний, учитывая близость кремния к углероду и совместимость этих веществ с

биотканями. Полимеры на основе кремнийорганических соединений – олиго- и полиорганосилоксаны используются в пластической хирургии, как имплантанты, шунты и катетеры, в виде силиконовых жидкостей и как антикоагулянты.

* * *

В заключение хотелось бы отметить, что невозможно переоценить роль всех химических элементов (более 80) и соединений на их основе, применяемых в современной лечебной практике. Тем более что медицина давно уже не ограничивается использованием экстрактов природных органических соединений, построенных из органических элементов (что было характерно для

медицины в древности), или их использованием в чистом виде.

В последние десятилетия сформировалось новое междисциплинарное направление науки – медицинская химия. Устойчивое существование и интенсивное развитие данного направления обусловлено активным выходом на мировой фармацевтический рынок низкомолекулярных лекарственных препаратов, полученных химическим путём.

В арсенале современных лекарственных средств доминируют синтетические или полусинтетические препараты как органической, так и неорганической природы. В целом грань между органической и неорганической ветвями медицинской химии постепенно стирается, вовлекая в медицинскую диагностику и терапию все большее разнообразие химических элементов и соединений на их основе.

Сегодня перед научным сообществом стоят новые вызовы, связанные с возникновением резистентности к антибиотикам, появлением новых и мутацией известных вирусов. Это, в свою очередь, диктует необходимость уделять большее внимание развитию органического синтеза и медицинской химии, а также консолидировать усилия химиков, биологов и фармакологов в рамках междисциплинарных программ, чтобы общими усилиями найти адекватные ответы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Популярная библиотека химических элементов / Под ред. И.В. Петрянова-Соколова. 2-е изд., в 2 кн. М.: Наука, 1977.
2. *Нельсон Д., Кокс М.* Основы биохимии Ленинджера. В 3-х томах. М.: Лаборатория знаний, 2019.
3. Биохимия человека / Под ред. Р. Марри, Д. Гренера, П. Мейеса, В. Родуэлла. М.: Мир, 2004.
4. *Уильямс Д.* Металлы жизни. М.: Мир, 1975.
5. Биологическая неорганическая химия / Под ред. И. Бертини. В 2-х томах. М.: БИНОМ, 2013.
6. *Солдатенков А.Т., Колядина Н.М., Шендрик И.В.* Основы органической химии лекарственных веществ. М.: БИНОМ, 2007.
7. *Граник В.Г.* Основы медицинской химии. М.: Вузовская книга, 2001.
8. *Pozarskii A.F., Soldatenkov A.T., Katritzky A.R.* Heterocycles in Life and Society. An Introduction to Heterocyclic Chemistry, Biochemistry and Applications. John Wiley and Sons, 2011.
9. *Пожарский А.Ф., Солдатенков А.Т.* Молекулы – перстни. М.: Химия, 1993.
10. *Гудман М., Морхауз Ф.* Органические молекулы в действии. М.: Мир, 1977.
11. Fluorine in Heterocyclic Chemistry. V. I and II / Ed. V. Nenajdenko. Heidelberg-New York-Dodrecht-London: Springer, 2014.
12. *Чарушин В.Н., Носова Э.В., Липунова Г.Н., Чупахин О.Н.* Фторхинолоны. Синтез и применение. М.: Физматлит, 2014.
13. Medicinal Inorganic Chemistry / Eds. J.L. Sessler, S.R. Doctrow, T.J. McMurry, S.J. Lippard. New York: Acad. Press. 2004.
14. *Dabrowiak J.C.* Metals in Medicine. New York: Wiley, 2009.
15. Биометаллоорганическая химия / Под ред. Ж. Жазузена. М.: БИНОМ, 2017.
16. *Бекман И.Н.* Ядерная медицина. Физические и химические основы. М.: Юрайт, 2018.
17. *Марьчев С.Н., Калинин Б.А.* Полимеры в медицине. Владимир: ВГУ, 2001.
18. Полимеры в биологии и медицине / Под ред. М. Дженкинса. М.: Научный мир, 2011.