ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА

Ю. Н. КУКУШКИН

Санкт-Петербургский государственный технологический институт

CHEMICAL ELEMENTS IN HUMAN BODY

Yu. N. KUKUSHKIN

For human body the role of about 30 chemical elements is definitely established. In their absence human organism cannot normally exist. These elements are named vitally important. Besides, there are elements, which in small amounts have no an obvious or visible effect for human body functioning, but at the certain contents are poisons.

Для организма человека определенно установлена роль около 30 химических элементов, без которых он не может нормально существовать. Эти элементы называют жизненно необходимыми. Кроме них имеются элементы, которые в малых количествах не сказываются на функционировании организма, но при определенном содержании являются ядами.

ВВЕДЕНИЕ

Многим химикам известны крылатые слова, сказанные в 40-х годах текущего столетия немецкими учеными Вальтером и Идой Ноддак, что в каждом булыжнике на мостовой присутствуют все элементы Периодической системы. Вначале эти слова были встречены далеко не с единодушным одобрением. Однако, по мере того как разрабатывались все более точные методы аналитического определения химических элементов, ученые все больше убеждались в справедливости этих слов.

Если согласиться с тем, что в каждом булыжнике содержатся все элементы, то это должно быть справедливо и для живого организма. Все живые организмы на Земле, в том числе и человек, находятся в тесном контакте с окружающей средой. Жизнь требует постоянного обмена веществ в организме. Поступлению в организм химических элементов способствуют питание и потребляемая вода. В соответствии с рекомендацией диетологической комиссии Национальной академии США ежедневное поступление химических элементов с пищей должно находиться на определенном уровне (табл. 1). Столько же химических элементов должно ежесуточно выводиться из организма, поскольку их содержания находятся в относительном постоянстве.

Предположения некоторых ученых идут дальше. Они считают, что в живом организме не только присутствуют все химические элементы, но каждый из них выполняет определенную биологическую функцию. Вполне возможно, что эта гипотеза не подтвердится. Однако, по мере того как развиваются исследования в данном направлении, выявляется биологическая роль все большего числа химических элементов.

Организм человека состоит на 60% из воды, 34% приходится на органические вещества и 6% – на неорганические. Основными компонентами органических веществ являются углерод, водород, кислород, в их состав входят также азот, фосфор и сера. В неорганических веществах организма человека обязательно присутствуют 22 химических элемента: Ca, P, O, Na, Mg, S, B, Cl, K, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cr, Si, I, F, Se. Например, если вес человека составляет 70 кг, то в нем содержится (в граммах): кальция – 1700, калия – 250, натрия – 70, магния – 42, железа – 5, цинка – 3. Ученые договорились, что если массовая доля элемента в организме превышает

© Кукушкин Ю.Н., 1998

Таблица 1. Суточное поступление химических элементов в организм человека

Химический элемент	Суточное поступление, мг	
	взрослые	дети
K	2000–5500	530
Na	1100–3300	260
Ca	800–1200	420
Mg	300–400	60
Zn	15	5
Fe	10–15	7,0
Mn	2,0–5,0	1,3
Cu	1,5–3,0	1,0
Mo	0,075–0,250	0,06
Cr	0,05–0,2	0,04
Co	Около 0,2 (витамин B_{12})	0,001
Cl	3200	470
PO_4^{3-}	800–1200	210
SO_4^{2-}	10	–
I	0,15	0,07
Se	0,05–0,07	–
F	1,5–4,0	0,6

10^{-2} %, то его следует считать макроэлементом. Доля микроэлементов в организме составляет 10^{-3}–10^{-5} %. Если содержание элемента ниже 10^{-5} %, его считают ультрамикроэлементом. Конечно, такая градация условна. По ней магний попадает в промежуточную область между макро- и микроэлементами.

ЖИЗНЕННО НЕОБХОДИМЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Несомненно, время внесет коррективы в современные представления о числе и биологической роли определенных химических элементов в организме человека. В данной статье мы будем исходить из того, что уже достоверно известно. Роль макроэлементов, входящих в состав неорганических веществ, очевидна. Например, основное количество кальция и фосфора входит в кости (гидроксофосфат кальция $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$), а хлор в виде соляной кислоты содержится в желудочном соке.

Микроэлементы вошли в отмеченный выше ряд 22 элементов, обязательно присутствующих в организме человека. Заметим, что большинство из них – металлы, а из металлов больше половины являются d-элементами. Последние в организме образуют координационные соединения со сложными органическими молекулами. Так, установлено, что многие биологические катализаторы – ферменты содержат ионы переходных металлов (d-элементов). Например, известно, что марганец входит в состав 12 различных ферментов, железо – в 70, медь – в 30, а цинк – более чем в 100. Микроэлементы называют жизненно необходимыми, если при их отсутствии или недостатке нарушается нормальная жизнедеятельность организма. Характерным признаком необходимого элемента является колоколообразный вид кривой доза (n) – ответная реакция (R, эффект) (рис. 1).

При малом поступлении данного элемента организму наносится существенный ущерб. Он функционирует на грани выживания. В основном это объясняется снижением активности ферментов, в состав которых входит данный элемент. При повышении дозы элемента ответная реакция возрастает и достигает нормы (плато). При дальнейшем увеличении дозы проявляется токсическое действие избытка данного элемента, в результате чего не исключается и летальный исход. Кривую на рис. 1 можно трактовать так: все должно быть в меру и очень мало и очень много вредно. Например, недостаток в организме железа приводит к анемии, так как оно входит в состав гемоглобина крови, а точнее, его составной части – гема. У взрослого человека в крови содержится около 2,6 г железа. В процессе жизнедеятельности в организме происходят постоянный распад и синтез гемоглобина. Для восполнения железа, потерянного с распадом гемоглобина, человеку необходимо суточное поступление в организм с пищей в среднем около 12 мг этого элемента. Связь анемии с недостатком железа была известна врачам давно, так как еще в XVII веке в некоторых европейских странах при малокровии прописывали настой железных опилок в красном вине. Однако избыток железа в организме тоже вреден. С ним связан сидероз глаз и легких – заболевания, вызываемые отложением соединений железа в тканях этих органов. Главный регулятор содержания железа в крови – печень.

Недостаток в организме меди приводит к деструкции кровеносных сосудов, патологическому росту костей, дефектам в соединительных тканях. Кроме того, считают, что дефицит меди служит одной из причин раковых заболеваний. В некоторых случаях поражение легких раком у людей пожилого возраста врачи связывают с возрастным снижением содержания меди в организме. Однако избыток меди в организме приводит к нарушению психики и параличу некоторых органов (болезнь Вильсона).

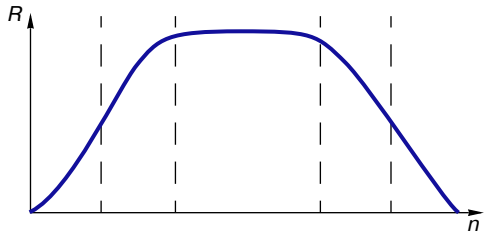

Рис. 1. Зависимость ответной реакции (R) от дозы (n) для жизненно необходимых элементов

Человеку причиняют вред лишь относительно большие количества соединений меди. В малых дозах их используют в медицине как вяжущее и бактериостазное (задерживающее рост и размножение бактерий) средство. Так, например, сульфат меди (II) применяют при лечении конъюктивитов в виде глазных капель (25%-ный раствор), а также для прижиганий при трахоме в виде глазных карандашей (сплав сульфата меди(II), нитрата калия, квасцов и камфоры). При ожогах кожи фосфором проводят ее обильное смачивание 5%-ным раствором сульфата меди (II).

Жизненно необходимые элементы натрий и калий функционируют в паре. Надежно установлено, что всем живым организмам присуще явление ионной асимметрии – неравномерное распределение ионов внутри и вне клетки. Например, внутри клеток мышечных волокон, сердца, печени, почек имеется повышенное содержание ионов калия по сравнению с внеклеточным. Концентрация ионов натрия, наоборот, выше вне клетки, чем внутри ее. Наличие градиента концентраций калия и натрия – экспериментально установленный факт. Теперь исследователей волнует вопрос о природе калий-натриевого насоса и его функционировании (см. статьи В.А. Опритова "Электричество в жизни животных и растений": Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 9. С. 40–46; В.Ф. Антонова "Биофизика мембран": Там же. 1997. № 6. С. 14–20). Интересно, что по мере старения организма градиент концентраций ионов калия и натрия на границе клеток падает. При наступлении смерти концентрации калия и натрия внутри и вне клетки сразу же выравниваются.

Биологическая функция других щелочных металлов в здоровом организме пока неясна. Однако имеются указания, что введением в организм ионов лития удается лечить одну из форм маниакально-депрессивного психоза. Приведем табл. 2, из которой видна важная роль других жизненно необходимых элементов.

Таблица 2. Характерные симптомы дефицита химических элементов в организме человека

Дефицит элемента	Типичный симптом
Ca	Замедление роста скелета
Mg	Мускульные судороги
Fe	Анемия, нарушение иммунной системы
Zn	Повреждение кожи, замедление роста, замедление сексуального созревания
Cu	Слабость артерий, нарушение деятельности печени, вторичная анемия
Mn	Бесплодность, ухудшение роста скелета
Mo	Замедление клеточного роста, склонность к кариесу
Co	Злокачественная анемия
Ni	Учащение депрессий, дерматиты
Cr	Симптомы диабета
Si	Нарушение роста скелета
F	Кариес зубов
I	Нарушение работы щитовидной железы, замедление метаболизма
Se	Мускульная (в частности, сердечная) слабость

ПРИМЕСНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Имеется большое число химических элементов, особенно среди тяжелых, являющихся ядами для живых организмов, – они оказывают неблагоприятное биологическое воздействие. В табл. 3 приведены эти элементы в соответствии с Периодической системой Д.И. Менделеева.

За исключением бериллия и бария, эти элементы образуют прочные сульфидные соединения. Существует мнение, что причина действия ядов связана с блокированием определенных функциональных групп (в частности, сульфгидрильных) протеина или же с вытеснением из некоторых ферментов ионов металлов, например меди и цинка. Элементы, представленные в табл. 3, называют примесными. Их диаграмма доза – эффект имеет другую форму по сравнению с жизненно необходимыми (рис. 2). До определенного содержания этих элементов организм не испытывает вредного воздействия, но при значительном увеличении концентрации они становятся ядовитыми.

Встречаются элементы, которые в относительно больших количествах являются ядами, а в низких концентрациях оказывают полезное влияние. Например, мышьяк – сильный яд, нарушающий сердечно-сосудистую систему и поражающий почки и печень, в небольших дозах полезен, и врачи прописывают его для улучшения аппетита. Кислород, необходимый человеку для дыхания, в высокой концентрации (особенно под давлением) оказывает ядовитое действие.

Из этих примеров видно, что концентрация элемента в организме играет весьма существенную, а порой и катастрофическую роль. Среди примесных

Таблица 3. Расположение токсических элементов в периодах и группах системы Д.И. Менделеева

Период	Группа						
	VIII	I	II	III	IV	V	VI
II	–	–	Be	–	–	–	–
IV	Ni			–	–	As	Se
V	Pd	Ag	Cd	–		Sb	Te
VI	Pt	Au	Ba Hg	Tl	Pb	Bi	–

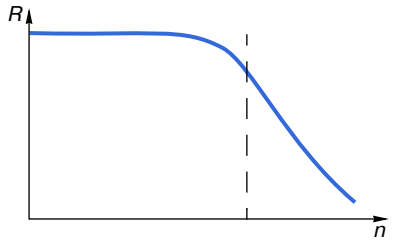

Рис. 2. Зависимость ответной реакции (R) от дозы (n) для примесных химических элементов

элементов имеются и такие, которые в малых дозах обладают эффективными лечащими свойствами. Так, давно было замечено бактерицидное (вызывающее гибель различных бактерий) свойство серебра и его солей. Например, в медицине раствор коллоидного серебра (колларгол) применяют для промывания гнойных ран, мочевого пузыря, при хронических циститах и уретитах, а также в виде глазных капель при гнойных конъюктивитах и бленнорее. Карандаши из нитрата серебра применяют для прижигания бородавок, грануляций. В разбавленных растворах (0,1–0,25%) нитрат серебра используют как вяжущее и противомикробное средство для примочек, а также в качестве глазных капель. Ученые считают, что прижигающее действие нитрата серебра связано с его взаимодействием с белками тканей, что приводит к образованию белковых солей серебра – альбуминатов. Серебро пока не относят к жизненно необходимым элементам, однако уже экспериментально установлено его повышенное содержание в мозгу человека, в железах внутренней секреции, печени. В организм серебро поступает с растительной пищей, например с огурцами и капустой.

В табл. 4 приведена Периодическая система, в которой охарактеризована биоактивность отдельных элементов [1]. Оценка основана на проявлении симптомов дефицита или избытка определенного элемента. Она учитывает следующие симптомы (в порядке возрастания эффекта): 1 – снижение аппетита; 2 – потребность в изменении диеты; 3 – значительные изменения состава тканей; 4 – повышенная повреждаемость одной или нескольких биохимических систем, проявляющаяся в специальных условиях; 5 – недееспособность этих систем в специальных условиях; 6 – субклинические признаки недееспособности; 7 – клинические симптомы недееспособности и повышенная повреждаемость; 8 – заторможенный рост; 9 – отсутствие репродуктивной функции. Крайней формой проявления дефицита или избытка элемента в организме является смертельный исход. Оценка биоактивности элемента сделана по девятибальной шкале в зависимости от характера симптома, для которого выявлена специфичность.

При такой оценке наиболее высоким баллом характеризуются жизненно необходимые элементы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявление биологической роли отдельных химических элементов в функционировании живых организмов (человека, животных, растений) – важная и увлекательная задача. Минеральные вещества, как и витамины, часто действуют как коферменты при катализе химических реакций, происходящих все время в организме.

Таблица 4. Характеристика биологической активности химических элементов [1]

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB			IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
H 9																	He
Li 4	Be											B	C 9	N 9	O 9	F 6	Ne
Na 9	Mg 9											Al	Si 7	P 9	S 9	Cl 9	Ar
K 9	Ca 9	Sc 3	Ti 1	V 8	Cr 8	Mn 9	Fe 9	Co 9	Ni 8	Cu 9	Zn 9	Ga 1	Ge 1	As 2	Se 8	Br	Kr
Rb 2	Sr 5	Y 1	Zr	Nb 3	Mo 9	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag 1	Cd 1	In	Sn 6	Sb 1	Te	I 9	Xe
Cs	Ba 2	La 3	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au 1	Hg 1	Tl 1	Pb 1	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															
				Ce 1	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy 1	Ho 1	Er	Tm	Yb	Lu
				Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lo

Усилия специалистов направлены на раскрытие механизмов проявления биоактивности отдельных элементов на молекулярном уровне (см. статьи Н.А. Улахновича "Комплексы металлов в живых организмах": Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 8. С. 27–32; Д.А. Леменовского "Соединения металлов в живой природе": Там же. № 9. С. 48–53). Нет сомнения, что в живых организмах ионы металлов находятся в основном в виде координационных соединений с "биологическими" молекулами, которые выполняют роль лигандов. В статье из-за ограниченности объема приведен материал, относящийся главным образом к организму человека. Выяснение роли металлов в жизнедеятельности растений, несомненно, окажется полезным для сельского хозяйства. Работы в этом направлении широко ведутся в лабораториях различных стран.

Весьма интересен вопрос о принципах отбора природой химических элементов для функционирования живых организмов. Не вызывает сомнения, что их распространенность не является решающим фактором. Здоровый организм сам способен регулировать содержание отдельных элементов. При наличии выбора (пищи и воды) животные инстинктивно могут вносить лепту в это регулирование. Возможности растений в данном процессе ограничены. Сознательное регулирование человеком содержания микроэлементов в почве сельскохозяйственных угодий также одна из важных задач, стоящих перед исследователями. Знания, полученные учеными в этом направлении, уже оформились в новую отрасль химической науки – бионеорганическую химию. Поэтому уместно напомнить слова выдающегося ученого XIX века А. Ампера: "Счастливы те, кто развивает науку в годы, когда она не завершена, но когда в ней уже назрел решительный поворот". Эти слова могут быть особенно полезны тем, кто стоит перед выбором профессии.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Ершов Ю.А.*, *Плетенева Т.В.* Механизмы токсического действия неорганических соединений. М.: Медицина, 1989.

2. *Кукушкин Ю.Н.* Соединения высшего порядка. Л.: Химия, 1991.

3. *Кукушкин Ю.Н.* Химия вокруг нас. М.: Высш. шк., 1992.

4. *Лазарев Н.В.* Эволюция фармакологии. Л.: Изд-во Воен.-мед. акад., 1947.

5. Неорганическая биохимия. М.: Мир, 1978. Т. 1, 2 / Под ред. Г. Эйхгорна.

6. Химия окружающей среды / Под ред. Дж.О. Бокриса. М.: Химия, 1982.

7. *Яцимирский К.Б.* Введение в бионеорганическую химию. Киев: Наук. думка, 1973.

8. *Kaim W.*, *Schwederski B.* Bioinorganic Chemistry: Inorganic Elements in the Chemistry of Life. Chichester: John Wile and Sons, 1994. 401 p.

* * *

Юрий Николаевич Кукушкин, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой неорганической химии Санкт-Петербургского государственного технологического института, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии им. Л.А. Чугаева АН СССР, академик РАЕН. Область научных интересов – координационная химия и химия платиновых металлов. Автор и соавтор более 600 научных статей, 14 монографий, учебников и научно-популярных книг, 49 изобретений.