



УДК 544.34;544.45;544.47;577.15;577.34

В. К. Кольтовер, Р. Д. Лабынцева, А. А. Люлько,  
В. К. Карандашев, член-корреспондент НАН Украины С. А. Костерин

### Магнитный изотоп магния — $^{25}\text{Mg}$ ускоряет реакцию гидролиза АТФ миозином

*Из трех стабильных изотопов магния —  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$  (природное соотношение приблизительно 79, 10 и 11% соответственно), только  $^{25}\text{Mg}$  является магнитным изотопом (имеет ядерный спин  $I = 5/2$ ), в то время как  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$  — немагнитные изотопы (ядерный спин  $I = 0$ ). Показано, что магнитный изотоп  $^{25}\text{Mg}$  в сравнении с немагнитными изотопами  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$  существенно активизирует (в 2–2,5 раза) реакцию ферментативного гидролиза АТФ миозином, полученным из гладкой мышцы матки. Каталитический эффект ядерного спина  $^{25}\text{Mg}$  наблюдается при обычной физиологической концентрации  $\text{MgCl}_2$  — 5 мМ. Таким образом, впервые получен документированный магнитный изотопный эффект в ферментативном катализе гидролиза АТФ миозином.*

Атомы многих химических элементов, из которых построены биологические молекулы и клеточные структуры, имеют магнитные и немагнитные стабильные изотопы. В отличие от немагнитного изотопа, атомное ядро магнитного изотопа имеет ядерный спин, создающий магнитное поле. Например, из трех стабильных изотопов магния —  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$ , природное соотношение которых составляет приблизительно 79, 10 и 11%,  $^{25}\text{Mg}$  является магнитным изотопом (ядерный спин  $I = 5/2$ ), тогда как  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$  — немагнитные изотопы (ядерный спин  $I = 0$ ) [1]. Недавно было обнаружено, что магнитный и немагнитные изотопы Mg различаются по своему воздействию на живые клетки [2–5]. Так, оказалось, что клетки дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, обогащенные магнитным изотопом  $^{25}\text{Mg}$ , после облучения коротковолновым УФ светом восстанавливаются существенно эффективнее, чем клетки, обогащенные немагнитным изотопом  $^{24}\text{Mg}$  [2, 3]. В экспериментах с другой общепринятой клеточной моделью — бактериями *Escherichia coli*, было установлено, что клетки, пересаженные в новую среду роста, существенно быстрее адаптируются к этой среде, если она содержит магнитный изотоп  $^{25}\text{Mg}$ , по сравнению с адаптацией к среде, содержащей немагнитные изотопы  $^{24}\text{Mg}$  или  $^{26}\text{Mg}$  [4, 5]. Очевидно, что для ответа на вопрос, каким

© В. К. Кольтовер, Р. Д. Лабынцева, А. А. Люлько, В. К. Карандашев, С. А. Костерин, 2014

образом магнитное поле атомного ядра влияет на жизнеспособность клетки, необходимы, в частности, эксперименты с изолированными ферментами.

Общеизвестно, что катион Mg ( $Mg^{2+}$ ) — обязательный кофактор ферментов синтеза и гидролиза АТФ, он также выполняет регуляторные функции в случае других клеточных процессов [6]. Один из важнейших и наиболее изученных “молекулярных моторов” биоэнергетики — мышечный белок миозин. Этот фермент, осуществляя гидролиз концевой фосфатной связи в молекуле АТФ, использует освобождаемую энергию для осуществления мышечного сокращения, причем АТФазная активность миозина облигатно зависит от наличия ионов Mg [7], необходимых для связывания АТФ в активном центре фермента, а также играющих существенную роль в катализе гидролиза АТФ.

Мы изучили влияние катионов магнитного изотопа ( $^{25}Mg$ ) и немагнитных изотопов ( $^{24}Mg$ ,  $^{26}Mg$ ) магния на  $Mg^{2+}$ -зависимую АТФ-гидролазную активность каталитического фрагмента (субфрагмента-1) миозина, изолированного из миомерия, и впервые обнаружили магнитно-изотопный эффект в катализируемой им реакции гидролиза АТФ.

Биохимические исследования проводили в Институте биохимии им. А. В. Палладина НАН Украины. Препарат субфрагмента-1 миозина получали из клеток гладкой мышцы матки свиньи по методике A. G. Weeds, R. S. Teaylor [8] с модификациями, описанными в работе [9]. Субфрагмент-1 идентифицировали по молекулярной массе (около 100 тыс. кДа) [10], величине среднего гидродинамического диаметра (22 нм) (метод фотон-корреляционной спектроскопии с применением лазерного корреляционного спектрометра “Malvern Instruments “ZetaSizer-3” (Великобритания), оснащенного He-Ne лазером ЛГН-111 (мощность 25 мВт,  $\lambda = 633$  нм) [11], удельная АТФ-гидролазная активность составляла 50–70 мкмоль  $P_i$  за 1 мин на 1 мг белка. АТФазную активность определяли при 37 °С в среде инкубации (объем 1 мл), содержащей (мМ): 20 трис-буфер (рН 7,2), 100 KCl, 0,01 CaCl<sub>2</sub>, 5 MgCl<sub>2</sub>, 4 АТФ; концентрация субфрагмента-1 миозина в среде инкубации составляла 20 мкг/мл, время инкубации — 1 мин. Контролем на неферментативный гидролиз АТФ служили пробы, содержавшие все компоненты среды инкубации, за исключением препарата ферментативного белка. Количество неорганического фосфата  $P_i$ , отщепленного от нуклеозидтрифосфата в ходе реакции гидролиза АТФ, определяли методом Fiske & Subbarow в модификации P. S. Chen [12]. Статистический анализ результатов проводили стандартными методами с помощью программного обеспечения “MS Office” и “Statistica 4.5”.

В экспериментах использовали оксиды магния  $^{24}MgO$ ,  $^{25}MgO$  и  $^{26}MgO$  с изотопным обогащением 99,8, 98,8 и 97,7 атом. % соответственно производства комбината “Электрохимприбор”, Россия. Из этих оксидов по стандартной методике были приготовлены растворы хлоридов магния  $^{24}MgCl_2$ ,  $^{25}MgCl_2$  и  $^{26}MgCl_2$  в концентрации 100 мМ каждый. Элементный и изотопный состав растворов хлоридов магния и среды для определения АТФазной активности определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с использованием квадрупольного масс-спектрометра X-7 (“Thermo Scientific”, США).

Результаты экспериментов по влиянию различных изотопов магния — магнитного изотопа  $^{25}Mg$  и немагнитных изотопов  $^{24}Mg$  и  $^{26}Mg$  — на АТФазную активность субфрагмента-1 миозина миомерия представлены на рис. 1. Субфрагмент-1 миозина считается достаточной функциональной единицей миозина, поскольку в изолированном виде сохраняет все его нативные свойства, а именно — АТФазную активность и способность взаимодействовать с актином [7–10].

Были выполнены три серии независимых экспериментов с тремя препаратами фермента, выделенными в разное время из трех разных животных (общее количество экспери-

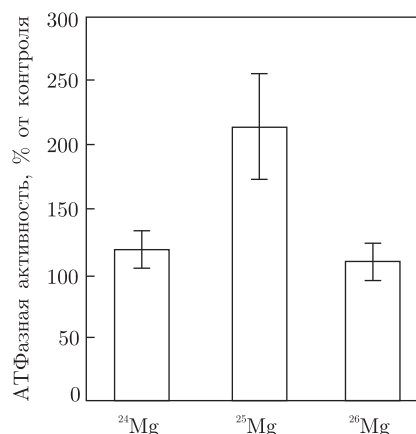


Рис. 1. АТФазная активность субфрагмента-1 миозина в присутствии различных изотопов магния (5 мМ  $^{24}\text{MgCl}_2$ , 5 мМ  $^{25}\text{MgCl}_2$  или 5 мМ  $^{26}\text{MgCl}_2$ ) ( $M \pm m$ ,  $n = 10$ ). За 100% принимали значение ферментативной активности в присутствии 5 мМ  $\text{MgCl}_2$  природного изотопного состава, производства “Merck” (контроль). Отличия средних значений активности в опытах с  $^{25}\text{Mg}$  (магнитный изотоп) по сравнению с полученными данными в опытах с  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$  (немагнитные изотопы) и контролем статистически достоверны,  $P < 0,01$

ментов  $n = 10$ ). Несмотря на вариабельность средних значений АТФазной активности от одной экспериментальной серии к другой, во всех сериях наблюдались одни и те же изотопные эффекты. А именно, в каждой из независимых экспериментальных серий опытов активность фермента в присутствии магнитного изотопа  $^{25}\text{Mg}$  оказалась в 2–2,5 раза выше, чем активность того же фермента в присутствии немагнитных изотопов  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$  или обычной природной смеси изотопов магния. При этом не обнаружено существенных различий в АТФ-гидролазной активности в случае использования немагнитных изотопов  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$ . Важно также подчеркнуть, что эффект наблюдается при стандартных, физиологических концентрациях хлоридов магния (5 мМ).

Можно было бы предположить, что причиной различий в АТФазной активности субфрагмента-1 миозина в присутствии магнитного изотопа  $^{25}\text{Mg}$  и немагнитных изотопов  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$  является различие в содержании примесей каких-либо посторонних элементов, поступающих с хлоридами разных изотопов магния в реакционную среду. Однако такого рода артефакты, вызванные примесями, мало вероятны. Согласно данным масс-спектрометрии, содержание примесей в базовых растворах хлорида магния не превышало одного микромоля на литр, а содержание таких элементов, как литий, бериллий, ванадий, хром, марганец, кобальт, молибден, ртуть, редкоземельные элементы и ураниты, не превышало нескольких наномолей на литр или было даже ниже порога определения (табл. 1). Из табл. 1 можно видеть также, что  $^{25}\text{MgCl}_2$  и  $^{26}\text{MgCl}_2$  содержат, например, одинаковые количества примеси свинца, тогда как  $^{24}\text{MgCl}_2$  содержит этой примеси в 5 раз меньше. Между тем по влиянию на активность фермента изотопы  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Mg}$  не отличаются один от другого, тогда как эффект  $^{25}\text{Mg}$  вдвое больше, чем у немагнитных изотопов. По тем же причинам можно игнорировать и другие примеси. Более того, следует принять во внимание, что исходные (базовые) растворы хлорида магния, концентрации 100 мМ каждый, разбавлялись в 20 раз для получения конечной концентрации хлорида магния — 5 мМ, в среде инкубации для определения АТФазной активности. Соответственно, количество примесей, поступавших в эту среду с добавками изотопов магния, было существенно меньше, чем количество тех же примесей, поступавших в эту же среду из других реактивов. Так, например, согласно

Таблица 1. Элементный состав примесей в среде для определения АТФазной активности (данные масс-спектрометрии с использованием квадрупольного масс-спектрометра X-7 ("Thermo Scientific", США))

Элемент	Порог определения (ПО), мкг/л	Исходный раствор (до введения хлорида магния), мкг/л	Добавка из раствора		
			<sup>24</sup> MgCl <sub>2</sub> , мкг/л	<sup>25</sup> MgCl <sub>2</sub> , мкг/л	<sup>26</sup> MgCl <sub>2</sub> , мкг/л
1	2	3	4	5	6
Li	0,009	0,67	0,0274	0,0258	0,0487
Be	0,002	<ПО	<ПО	0,0127	0,0088
B	1	12	4,5	7,0	5,3
Na	18	173000	9	25,4	49,2
Al	1	74	3,1	2,4	18,0
Si	46	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
P	36	275000	<ПО	<ПО	<ПО
S	56	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
K	19	6166000	<ПО	<ПО	12,8
Ca	14	12600	27,5	300	162
Sc	0,1	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Ti	1	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
V	0,1	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Cr	1	64	<ПО	<ПО	<ПО
Mn	0,1	15	4,4	3,6	39
Fe	15	260	<ПО	<ПО	10,2
Co	0,1	<ПО	<ПО	<ПО	0,28
Ni	0,6	23	<ПО	0,36	<ПО
Cu	0,2	8	3,1	1,0	12,1
Zn	0,4	130	4,2	1,8	3,0
Ga	0,1	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Ge	0,1	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
As	0,1	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Se	0,5	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Br	14	3500	<ПО	<ПО	<ПО
Rb	0,013	123	0,0203	0,0170	0,0204
Sr	0,1	30	0,32	1,6	0,29
Y	0,006	<ПО	<ПО	<ПО	0,0079
Zr	0,014	<ПО	0,0319	0,0484	0,856
Nb	0,008	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Mo	0,016	50,0	0,0532	0,0456	0,0284
Ru	0,011	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Rh	0,008	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Pd	0,012	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Ag	0,004	<ПО	0,0059	0,0073	0,0043
Cd	0,007	0,45	0,0433	1,03	0,414
In	0,002	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Sn	0,017	0,44	0,0569	0,0532	0,0587
Sb	0,007	0,48	0,0600	0,0467	0,0258
Te	0,008	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Cs	0,001	0,033	<ПО	<ПО	<ПО
Ba	0,05	11	0,0009	0,0017	0,0145
La	0,004	<ПО	0,0050	<ПО	0,436
Ce	0,003	<ПО	0,0044	<ПО	0,0530
Pr	0,0005	<ПО	0,0005	<ПО	0,0037
Nd	0,002	<ПО	0,002	0,002	0,030
Sm	0,002	<ПО	0,002	<ПО	0,0150
Eu	0,0004	<ПО	<ПО	0,00085	0,189

Таблица 1. Продолжение

1	2	3	4	5	6
Gd	0,0007	<ПО	0,0025	0,0061	0,0154
Tb	0,0001	<ПО	0,00028	0,0020	0,00040
Dy	0,0007	<ПО	0,0012	0,0041	0,0092
Ho	0,0001	<ПО	<ПО	0,0041	0,00019
Er	0,0003	<ПО	0,00092	0,0052	0,0151
Tm	0,0004	<ПО	<ПО	0,0067	<ПО
Yb	0,0004	<ПО	0,00064	0,0056	0,0048
Lu	0,0002	<ПО	0,0074	0,0082	0,354
Hf	0,003	<ПО	0,0033	0,0128	<ПО
Ta	0,008	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
W	0,006	0,29	0,0083	0,0170	<ПО
Re	0,001	<ПО	<ПО	0,0056	<ПО
Os	0,001	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Ir	0,001	<ПО	0,0017	0,0018	0,0134
Pt	0,001	<ПО	0,334	0,0575	0,741
Au	0,006	<ПО	0,0332	0,0289	0,0254
Hg	0,02	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Tl	0,001	<ПО	0,118	0,0245	0,0560
Pb	0,03	43	0,2	1,2	1,0
Bi	0,002	<ПО	<ПО	0,0080	0,0019
Th	0,004	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
U	0,001	<ПО	<ПО	0,0052	0,0011

данным табл. 1, “добавки” кальция, цинка и свинца из базовых растворов хлорида магния не превышали 2–3% количества этих элементов, уже содержавшихся в реакционной среде.

Интересно отметить, что в экспериментах, проведенных с другими  $Mg^{2+}$ -зависимыми АТФ-гидролазами и выполненными на фракции плазматических мембран клеток миомерия (транспортные  $Na^+$ ,  $K^+$ -АТФаза,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ -АТФаза, “базальная”  $Mg^{2+}$ -АТФаза), мы не выявили ускорения реакции гидролиза АТФ магнитным изотопом  $^{25}Mg$ .

Таким образом, обнаруженная значительная, в 2–2,5 раза, стимуляция АТФ-гидролазной активности миозина при замене немагнитного изотопа магния на магнитный изотоп и отсутствие различий в действии немагнитных изотопов ( $^{24}Mg$  и  $^{26}Mg$ ) однозначно свидетельствуют о том, что нами выявлен эффект магнитного момента ядра — магнитный изотопный эффект, а не классический изотопный эффект массы атомного ядра. Это значит, что реакция  $Mg^{2+}$ -зависимого гидролиза АТФ, катализируемая субфрагментом-1 миозина, лимитируется такой кинетической стадией, эффективность которой существенно выше в случае, когда атомное ядро магния ( $^{25}Mg$ ) имеет ядерный магнитный момент (спин), чем в случаях, когда атомное ядро ( $^{24}Mg$  или  $^{26}Mg$ ) не имеет магнитного момента.

В химии магнитно-изотопный эффект известен для многих элементов, имеющих магнитные и немагнитные изотопы. Например, магнитно-изотопный эффект отчетливо проявляется в реакциях рекомбинации свободных радикалов. Этот эффект является прямым следствием закона сохранения электронного углового момента (спина): суммарный спин продуктов химической реакции должен быть равен суммарному спину исходных реагентов [13]. В свободных радикалах спиновый момент ядра и спиновый момент электрона связаны магнитным сверхтонким (фермиевским) взаимодействием, достаточно сильным для того, чтобы изменить электронный спин реагентов и тем самым существенно повлиять на

скорость реакции. Соответственно, различаются скорости реакций радикалов, содержащих магнитные и немагнитные ядра (см., например, [13, 14]).

На первый взгляд, возникновение свободнорадикальной пары в качестве промежуточного продукта (“интермедиата”) в реакции гидролиза АТФ представляется маловероятным. Действительно, экзотермическая реакция гидролиза АТФ с образованием АДФ и неорганического фосфата в водном растворе идет по обычному кислотно-основному механизму. Иная ситуация, однако, возникает при ферментативном гидролизе АТФ. Фермент, будь то миозин, транспортная АТФаза, ДНК полимераза или иной “молекулярный мотор”, гидролизует не АТФ, но комплекс АТФ с ионом  $Mg^{2+}$  [7]. В активном центре миозина катион Mg координируется с боковыми цепями аминокислотных остатков Thr-186 и Ser-237 миозина,  $\beta$ - и  $\gamma$ -фосфатными группами молекулы АТФ (с образованием  $\beta,\gamma$ -бидентатного комплекса) и с активными молекулами воды, одна из которых осуществляет нуклеофильную атаку на  $\gamma$ -фосфат АТФ.  $Mg^{2+}$  вступает во взаимодействие с отрицательно заряженными фосфатными группами АТФ, поляризует их и, таким образом, облегчает нуклеофильную атаку на терминальный  $\gamma$ -фосфат [7–11]. Кроме того, в активном центре миозина имеются сульфгидрильные группы, при титровании которых гидролитическая активность фермента ингибируется [7].

Известно также, что при ферментативном гидролизе АТФ возникают электронно-конформационные взаимодействия и неравновесная возбужденная конформация макромолекулы [15]. Так как энергия, выделяющаяся при гидролизе молекулы АТФ, невелика ( $\approx 0,54$  эВ), то эта возбужденная конформация характеризуется, по-видимому, низко лежащим триплетным состоянием. Можно предположить, что при электронно-конформационном возбуждении макромолекулы в активном центре фермента происходит перенос электронной спиновой плотности от электронно-донорной гидроксильной группы триптофана или серина либо сульфгидрильной группы миозина на комплекс  $Mg^{2+}$ -АТФ. Принимая во внимание известные факты, что титрование, например, сульфгидрильных групп приводит к ингибированию фермента [7], надо полагать, что возникновение ион-радикальной пары ведет к снижению гидролитической активности. Между тем спонтанная релаксация триплетного состояния (суммарный электронный спин  $S = 1$ ) в основное синглетное состояние ( $S = 0$ ) запрещена законом сохранения спина. Магнитное поле ядерного спина  $^{25}Mg$ , воздействуя на электронный спин ион-радикальной пары, снимает спиновый запрет и, таким образом, ускоряет переход комплекса из триплетного состояния в основное синглетное. Благодаря этому освобождается “занятая” гидроксильная или сульфгидрильная группа и, соответственно, ускоряется реакция гидролиза АТФ. По сути дела, ядерный спин ускоряет подготовку фермента к приему и гидролизу следующей молекулы АТФ.

Таким образом, нами обнаружен магнитно-изотопный эффект  $Mg^{2+}$  (ядерный спиновый катализ) в реакции гидролиза АТФ, катализируемой миозином. Выяснение деталей механизмов ядерного спинового катализа в ферментативном гидролизе АТФ — задача дальнейших исследований.

1. *Encyclopedia of nuclear magnetic resonance* / Eds. D. M. Grant, R. K. Harris. – Chichester: Wiley, 1996. – Vol. 8. – P. 6490.
2. Гродзинский Д. М., Евстюхина Т. А., Кольцов В. К. и др. Влияние магнитного изотопа магния-25 на пострадиационное восстановление клеток *Saccharomyces cerevisiae* // Доп. НАН України. – 2011. – № 12. – С. 153–157.

3. *Koltover V. K., Korolev V. G., Kutlakhmedov Y. A.* Antioxidant prophylaxis of radiation stress // *Ionizing Radiation: Applications, Sources and Biological Effects* / Eds. E. Belotserkovsky, Z. Ostaltsov. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2012. – P. 117–128.
4. *Кольтовер В. К., Шевченко У. Г., Авдеева Л. В. и др.* Магнитно-изотопный эффект магния в живой клетке // *Докл. АН.* – 2012. – **442**, № 2. – С. 272–274.
5. *Кольтовер В. К.* Ядерный спиновый катализ в нанореакторах живых клеток // *Биофизика.* – 2013. – **58**, № 2. – С. 257–263.
6. *Romani A. M. P.* Cellular magnesium homeostasis // *Arch. Biochem. Biophys.* – 2011. – **512**, No 1. – P. 1–23.
7. *Страйер Л.* Биохимия: В 3-х т. Т. 3. – Москва: Мир, 1985. – 400 с.
8. *Weeds A. G., Taylor R. S.* Separation of subfragment-1 isoenzymes from rabbit skeletal muscle myosin // *Nature.* – 1975. – **257**, No 1. – P. 54–56.
9. *Лабинцева Р. Д., Бевза А. А., Бевза О. В., Черенок С. О., Кальченко В. І., Костерін С. О.* Структурно-функціональні основи міжмолекулярної взаємодії калікс[4]арену С-97 із субфрагментом-1 міозину міометрія // *Укр. біохім. журн.* – 2012. – **84**, № 1. – С. 34–44.
10. *Iwane A. H., Kitamura K., Tokunaga M. et al.* Myosin subfragment – 1 fully equipped with factors essential for motor function // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* – 1997. – **230**, No 1. – P. 46–80.
11. *Burgess S. A., Yu S., Walker M. L. et al.* Structures of smooth muscle myosin and heavy meromyosin in the folded, shutdown state // *J. Mol. Biol.* – 2007. – **372**, No 5. – P. 1165–1178.
12. *Chen P. S., Toribara Jr. T. Y., Warner H.* Microdetermination of phosphorus // *Analyt. Chem.* – 1956. – **28**, No 11. – P. 1756–1758.
13. *Зельдович Я. Б., Бучаченко А. Л., Франкевич Е. Л.* Магнитно-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике // *Успехи физ. наук.* – 1988. – **155**, № 1. – С. 3–45.
14. *Koltover V. K.* Stable magnetic isotopes as a new trend in biomedicine // *Biomedicine, Rijeka: InTech-Europe.* – 2012. – С. 105–122. Available from: <http://www.intechopen.com/books/biomedicine>.
15. *Волькенштейн М. В.* Общая биофизика. – Москва: Наука, 1978. – 592 с.

*Институт проблем химической физики РАН,*

*Черноголовка, Россия*

*Институт биохимии им. А. В. Палладина*

*НАН Украины, Киев*

*Институт проблем технологии микроэлектроники*

*и особо чистых материалов РАН,*

*Черноголовка, Россия*

*Поступило в редакцию 18.07.2013*

**В. К. Кольтовер, Р. Д. Лабинцева, А. О. Люлько, В. К. Карандашев,**  
член-корреспондент НАН України **С. О. Костерін**

### **Магнітний ізотоп магнію — $^{25}\text{Mg}$ прискорює реакцію гідролізу АТФ міозином**

*З трьох стабільних ізотопів магнію —  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$  та  $^{26}\text{Mg}$  (природне співвідношення приблизно 79, 10 та 11% відповідно), тільки  $^{25}\text{Mg}$  є магнітним ізотопом (має ядерний спин  $I = 5/2$ ), тоді як  $^{24}\text{Mg}$  і  $^{26}\text{Mg}$  — немагнітні ізотопи (ядерний спин  $I = 0$ ). Показано, що магнітний ізотоп  $^{25}\text{Mg}$  порівняно з немагнітними ізотопами  $^{24}\text{Mg}$  та  $^{26}\text{Mg}$  істотно активує (в 2–2,5 раза) реакцію ензиматичного гідролізу АТФ міозином, одержаним з гладенького м'яза матки. Каталітичний ефект ядерного спіна  $^{25}\text{Mg}$  спостерігається при звичайній фізіологічній концентрації  $\text{MgCl}_2$  — 5мМ. Таким чином, вперше одержано документований магнітний ізотопний ефект у ферментативному каталізі гідролізу АТФ міозином.*

V. K. Koltover, R. D. Labyntseva, A. A. Lul'ko, V. K. Karandashev,  
Corresponding Member of the NAS of Ukraine S. A. Kosterin

### Magnetic isotope of magnesium $^{25}\text{Mg}$ accelerates the reaction of ATP hydrolysis catalyzed by myosin

*Among three stable magnesium isotopes  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ , and  $^{26}\text{Mg}$  with natural abundance 79, 10, and 11%, only  $^{25}\text{Mg}$  has the nuclear spin ( $I = 5/2$ ) and, therefore, the nuclear magnetic moment. Two other isotopes,  $^{24}\text{Mg}$  and  $^{26}\text{Mg}$ , are spinless ( $I = 0$ ) and, hence, have no magnetic moment. In this work, we have revealed that magnetic isotope  $^{25}\text{Mg}$ , by comparison to nonmagnetic isotopes  $^{24}\text{Mg}$  and  $^{26}\text{Mg}$ , essentially stimulates, by 2–2.5 times, the enzyme ATP hydrolysis reaction catalyzed by myosin isolated from smooth muscles of uterus. The catalytic effect of the nuclear spin of  $^{25}\text{Mg}$  has been observed at the usual physiological concentrations of  $\text{MgCl}_2$ , at 5 mM. Thus, we have, for the first time, documented the magnetic isotope effect in the enzyme hydrolysis of ATP by myosin.*