



- Инженерный вестник Дона. 2012. № 4 (ч. 2). URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2u2012/1299>
11. Федеральный закон РФ «О радиационной безопасности населения» от 1996 г. № 3-ФЗ. URL: [www.consultant.ru/documents/cons\\_doc\\_LAW8797](http://www.consultant.ru/documents/cons_doc_LAW8797).
  12. ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» // Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС). М., 1994. 11 с. URL: [gostrf.com/normadata/1/4294853/4294853068.pdf](http://gostrf.com/normadata/1/4294853/4294853068.pdf).
  13. МГСН 2.02-97 Допустимые уровни ионизирующего излучения и радона на участках застройки. URL: [docs.cnfd.ru/documents/1200000484](http://docs.cnfd.ru/documents/1200000484).
  14. Угланова В. З., Денисов Н. С., Панорядов В. М., Борзов В. М. Вариации радиационного фона естественных водных источников // Экономика и социум. 2015. № 2–5 (15). С. 1216–1221.
  15. Cherkasova O. A., Uglanova V. Z., Kanevez S. I. Dose di esposizione controllo delle radiazioni esterne negli edifici residenziali // Ital. Scie. Rev. 2014. № 5 (14). С. 159–162.
  16. Сидельникова О. П., Козлов Ю. Д., Сидякин П. А., Михнев И. П. Защитные материалы для снижения мощности дозы в помещениях // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 2/3. С. 57–59.
  17. Индикатор Радиоактивности РАДЭКС РД1503 (RADEX RD1503). Паспорт 10.КР.01.00.00.000ПС. Индикатор Радиоактивности РАДЭКС РД1503 Руководство по эксплуатации 10.КР.01.00.00.000РЭ. М.: Изд-во ООО «Кварта-Рад», 2005. 12 с.
  18. Дозиметр-Радиометр Бытовой АНРИ-01-02 «СО-СНА». Руководство по эксплуатации РБ -1.00.000 РЭ. Минск: Изд-во БПО «Экран», 1991. 48 с.
  19. Сидельникова О. П., Стефаненко И. В., Соколов П. Э. Радиационная безопасность в зданиях: справочник. М.: Энергоатомиздат, 2006. 325 с.
  20. Сидельникова О. П. Радиационный контроль в строительной индустрии. М.: АСВ, 2002. 208 с.

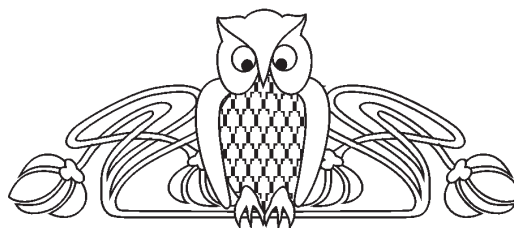
УДК 577.322:[547.962.3+547.963.4]

## КОНКУРЕНТНАЯ СОРБЦИЯ $K^+$ В ПРИСУТСТВИИ $Na^+$ БЫЧЬИМ СЫВОРОТОЧНЫМ АЛЬБУМИНОМ И ГЕМОГЛОБИНОМ

В. Г. Ребров<sup>1</sup>, Д. Г. Верхов<sup>1</sup>, С. В. Сидоренко<sup>2</sup>,  
А. Д. Усанов<sup>1</sup>, А. В. Скрипаль<sup>1</sup>, Д. А. Усанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского  
E-mail: [rebrovvg@yandex.ru](mailto:rebrovvg@yandex.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова



Показано избирательное накопление одновалентных катионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$  белками альбумином и гемоглобином. Установлена предпочтительная сорбция калия в присутствии натрия исследуемыми белками. Показано, что с ростом концентрации натрия в составе водных растворов белков возрастает количество связанного белками калия. Результаты исследований сорбции ионов калия в присутствии ионов натрия при различных концентрациях их солей хлоридов бычьим сывороточным альбумином и гемоглобином совпадают с аналогичными результатами, наблюдаемыми в исследованиях на живых мышечных клетках.

**Ключевые слова:** одновалентные катионы, белки, сорбция.

### Competitive Binding of $K^+$ in the Presence of $Na^+$ with Bovine Serum Albumin and Hemoglobin

V. G. Rebrov, D. G. Verkhov, S. V. Sidorenko,  
A. D. Usanov, A. V. Skripal, D. A. Usanov

Selective accumulation of monovalent cations  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$  with albumin and hemoglobin is shown. Preferential sorption of potassium in the presence of sodium with test proteins is determined. It is shown that with increasing concentrations of sodium in the composition of

aqueous solutions of the proteins, the amount of potassium bound by proteins increases. The results of investigation concerning sorption of potassium ions in the presence of sodium ions at various concentrations of their chloride salts by bovine serum albumin and hemoglobin coincide with similar results observed in studies on living muscle cells.

**Key words:** monovalent cations, proteins, sorption.

DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-3-279-284

### Введение

Известно, что в клетке существуют универсальные системы ионного гомеостаза, изменяющиеся при внешних воздействиях. Накоплен богатый экспериментальный материал о роли ионов в жизнедеятельности клетки, об изменениях параметров ионного гомеостаза при внешних воздействиях и в процессах развития. Ионные концентрации влияют на активность ферментов. Изменения концентраций ионов могут влиять не только на активность и специфичность ферментов, но и на стабильность биологических



систем [1, 2]. Так, по данным Крогера и Лецци [3–5], гены проявляют дифференциальную чувствительность к отдельным ионам в процессах транскрипции, и эти реакции генспецифичны.

Известны работы, посвященные влиянию ионов  $K^+$  и  $Na^+$  на биологические процессы. Так, в работах [6–8] показана возможность воздействия этих катионов на уровень биолюминесценции микроорганизмов при ферментативных процессах, исследованных *in vivo* и *in vitro*, с определением соотношений между регистрируемыми эффектами. При этом механизм действия связывают с влиянием на процессы переноса этих катионов [9]. В результате было установлено, что основным эффектом воздействия  $K^+$  и  $Na^+$  на ферментативную активность, связанную с генерацией свечения, являлось дозозависимое подавление интенсивности биолюминесценции бактерий в растворах солей калия и натрия. При этом различия в повышении ферментативной активности для  $K^+$  и  $Na^+$  не наблюдались.

История экспериментальных исследований состояния  $K^+$  и  $Na^+$  внутри клетки свидетельствует о многообразии подходов к изучению этой проблемы. В ранних экспериментах показано, что выделенные нативные белки не связывают значительное количество щелочных ионов [10–12] и не способны избирательно связывать в заметных количествах ионы  $K^+$  (или  $Na^+$ ) [13, 14]. Для того чтобы исследовать эту способность в опытах *in vitro*, Л. Эдельманом проведён эксперимент на мышечных клетках, в котором была найдена преимущественная аккумуляция в них  $K^+$ ,  $Cs^+$  над  $Na^+$  [15]. Неравномерное распределение катионов в клетке было также подтверждено с помощью дисперсионного рентгеновского микроанализа [16–18]. В работах [19, 20] было показано, что центрами, которые по электростатическому механизму адсорбируют  $K^+$ ,  $Cs^+$ ,  $Tl^+$  и  $Na^+$ , являются карбоксильные группы аспарагиновой и глутаминовой аминокислот всех типов белков. Также была теоретически вычислена энергия ассоциации (в ккал/моль) ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$  с однозарядной кислотной карбоксильной группой [21].

В настоящее время актуальной является задача исследования взаимного влияния  $K^+$  и  $Na^+$  при сорбции белками при различных концентрациях их в среде. В литературе имеются сообщения о проведении подобных экспериментов на портняжной мышце и мышечных клетках лягушки. В работе [22] показана концентрационная зависимость накопления  $Na^+$  в мышечных клетках от его концентрации в омывающем растворе  $NaCl$  в присутствии ионов  $K^+$  при различных

его концентрациях в среде. Показано, что при увеличении концентрации  $K^+$  в растворе выше физиологической нормы 2,5 ммоль/л, калий полностью вытесняет  $Na^+$  из мест связывания. Однако до сих пор отсутствуют исследования о связывании этих одновалентных катионов отдельно взятыми белками. Исходя из анализа существующих в литературе данных возникает необходимость проведения исследований по изучению сорбционных процессов  $K^+$  и  $Na^+$  белками, а также влияния различных физико-химических факторов на эти процессы.

Целью настоящей работы является исследование *in vitro* конкурентного взаимодействия клеточных катионов  $K^+$  и  $Na^+$ , а также суррогатных  $Rb^+$  и  $Cs^+$  на отдельно взятых высокоочищенных белках – бычьим сывороточном альбумине (БСА) и гемоглобине, и взаимного влияния этих катионов на величину их связывания белками.

#### Материалы и методы

Эксперименты проводили в термостатируемых условиях при температуре  $25 \pm 0,5$  °C на водных растворах белков бычьего сывороточного альбумина и гемоглобина (Sigma, USA, стерильные). Чистоту препаратов определяли на пламенном фотометре ПФА-378. Степень очистки белков составляла:

– для гемоглобина содержание натрия в белке составляло 3,2 мг/л, а содержание калия 0,1 мг/л;

– для БСА содержание натрия в белке составляло 0,9 мг/л, а содержание калия 0,1 мг/л.

В опытах использовались соли хлоридов ( $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $RbCl$ ,  $CsCl$ ) с содержанием основного компонента более 99% (химически чистые). Растворы солей готовились на дистиллированной воде, в концентрациях  $10^{-1}$  –  $10^{-4}$  моль/л, методом разбавления маточного раствора.

Регистрацию концентраций исследуемых катионов  $K^+$  и  $Na^+$  в растворах проводили на преобразователе ионометрическом И-500 с электродной системой, включающей измерительный и вспомогательный электроды, предназначенные для измерения в водных растворах концентрации одно- и двухвалентных анионов и катионов. Предел допускаемого значения основной относительной погрешности измерения концентрации составил  $\pm 2\%$ .

Также для определения количества связанных катионов  $Rb^+$ ,  $Cs^+$  и  $K^+$  белками использовался рентгеновский спектрофлуориметр – спектроскан МАКС–GV. Методика пробоподготовки заключалась в следующем: к 20 мл раствора белка с концентрацией 0.5 г/л приливалось по



10 мл растворов солей щелочных металлов с концентрацией 0.25 моль/л. Затем эти 40 мл полученного раствора с концентрацией белка 0.25 г/л и концентрацией солей 0.0625 моль/л прокачивались через сорбционный фильтр ДЭ-ТАТА. После прокачивания рабочего раствора фильтр дважды тщательно промывался дистиллированной водой. Фильтр слегка подсушивали, затем проводили анализ содержания  $K^+$ ,  $Rb^+$  и  $Cs^+$  в осажденных на фильтрах белках. Результаты определения концентраций щелочных металлов обрабатывались по методу фундаментальных параметров (метод расчета химического состава образца без использования стандартных образцов и построения калибровочных кривых).

Измерения концентраций свободных катионов в водных растворах белков проводили потенциометрическим методом при постоянном перемешивании на стандартной лабораторной магнитной мешалке.

Для каждого из белков было проведено по две серии опытов. Обе серии состояли из двадцати растворов с одинаковой концентрацией исследуемых белков. В опыте, в котором определяли количество связанных катионов  $K^+$  белками в присутствии ионов  $Na^+$  при различной концентрации  $K^+$ , суммарный объем измеряемого раствора составлял 40 мл. В обеих сериях брали по:

- 20 мл раствора белка с концентрацией 0.5 г/л;
- 10 мл раствора соли  $NaCl$  с концентрацией 0.5 моль/л для первой серии и 0.05 моль/л для второй;

- 10 мл раствора соли  $KCl$  с концентрацией, зависящей от номера измеряемого раствора, и получаемой путём разведения маточного раствора с концентрацией 0.2 моль/л для обеих серий.

Значения концентраций связанных катионов калия и натрия белками определяли путём вычитания концентрации свободного катиона, измеренного с помощью ионоселективного электрода, из значения его исходной концентрации в измеряемом растворе.

### 1. Результаты исследований конкурентного взаимодействия $K^+$ в присутствии $Na^+$ при равных концентрациях их солей хлоридов в водных растворах белков

В настоящем исследовании приведены результаты экспериментов по сорбции одновалентных катионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$  наиболее изученными белками – альбумином и гемоглобином (табл. 1). В опытах использовались растворы белков с одинаковой концентрацией в них солей хлоридов щелочных металлов.

Таблица 1

**Сорбция одновалентных катионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$  в водных растворах бычьего сывороточного альбумина и гемоглобина при одинаковых концентрациях в них солей  $KCl$ ,  $NaCl$ ,  $RbCl$ ,  $CsCl$  попарно**

Составы солей в растворах белков	Катион	Концентрация сорбированных катионов белками, моль/л	
		БСА	Гемоглобин
$NaCl = KCl$	$Na^+$	$2.55 \cdot 10^{-2}$	$2.25 \cdot 10^{-2}$
	$K^+$	$3.18 \cdot 10^{-2}$	$2.91 \cdot 10^{-2}$
$KCl = RbCl$	$K^+$	$1.08 \cdot 10^{-2}$	$2.56 \cdot 10^{-2}$
	$Rb^+$	$2.07 \cdot 10^{-2}$	$4.60 \cdot 10^{-2}$
$RbCl = CsCl$	$Rb^+$	$2.33 \cdot 10^{-2}$	$2.58 \cdot 10^{-2}$
	$Cs^+$	$3.74 \cdot 10^{-2}$	$3.65 \cdot 10^{-2}$

Как видно из результатов проведенных исследований, представленных в табл. 1, концентрации связанных катионов белками располагаются согласно лиотропному ряду  $Na^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+$  [23], где последовательность в сорбционном процессе ионов в этом ряду соответствует уменьшению энергии гидратации. В этом же порядке возрастает сродство катионов к сильнокислотным анионам [24], т.е. наблюдается предпочтительная сорбция элемента, имеющего больший порядковый номер. Причиной такой избирательности центров связывания белков к катионам  $K^+$  в присутствии  $Na^+$ ,  $Rb^+$  в присутствии  $K^+$ , а также  $Cs^+$  в присутствии  $Rb^+$  являются либо величины гидратных радиусов элементов, либо их структура и атомная масса. Известно, что в ряду одновалентных катионов с ростом атомной массы элемента их гидратные радиусы уменьшаются (например, величина гидратированного иона  $Na^+$  на 40 % больше, чем у  $K^+$ ). Объяснение такой закономерности для одновалентных ионов имеется в литературе [25–27].

В работе [28] показано, что согласно явлению диэлектрического насыщения при электростатическом взаимодействии между кислородом остатка аминокислотной группы и свободным одновалентным катионом ( $K^+$  или  $Na^+$ ) лишь гидратированный ион  $K^+$ , имеющий меньший радиус, может войти в область с большей напряжённостью электростатического поля заряда (3–4 Å), не только в силу закона Кулона, но и из-за меньшего значения диэлектрической постоянной среды и, в результате адсорбироваться, тогда как центр более крупного гидратированного иона  $Na^+$  остаётся за пределом этой области (дальше 4 Å от атома кислорода [29]). Так, имеет место конкурентное взаимодействие за места связывания с анионными центрами



белка, и натрий для калия помехой быть не может. Использование суррогатных ионов  $Rb^+$  и  $Cs^+$  в эксперименте подтверждает такой механизм взаимодействия одновалентных катионов с исследуемыми белками. Представленные результаты эксперимента, проведенного на отдельно взятых высокоочищенных белках, полностью согласуются с проведенными ранее исследованиями на мышечных клетках [15], что подтверждает единый механизм взаимодействия одновалентных катионов с клеточными белками.

## 2. Результаты исследований конкурентного взаимодействия $K^+$ в присутствии $Na^+$ при различных концентрациях их солей хлоридов в водных растворах белков

В данном исследовании показано влияние на накопление исследуемыми белками ионов  $K^+$  при различных их концентрациях в рас-

творе при фиксированных нагрузках  $Na^+$ . На рис. 1 и 2 представлены зависимости количества сорбированного  $K^+$  бычьим сывороточным альбумином и гемоглобином от концентрации этого катиона в растворе. Концентрацию  $K^+$  варьировали в пределах от  $2.5 \cdot 10^{-3}$  моль/л до 0.05 моль/л, в то время как концентрация  $Na^+$  поддерживалась на постоянном уровне в зависимости от условий опыта – при максимальной (0.5 моль/л) и минимальной его концентрациях (0.05 моль/л).

Как видно из результатов, представленных на рис. 1 и 2, увеличение концентрации  $Na^+$  в среде от 0.05 до 0.5 моль/л влияет на эффективность процесса сорбции  $K^+$  для каждого исследованного белка. Наблюдаемые различия в значениях предельных концентраций аккумулированного  $K^+$  альбумином и гемоглобином, очевидно, связано с количеством центров сорбции для этого катиона.

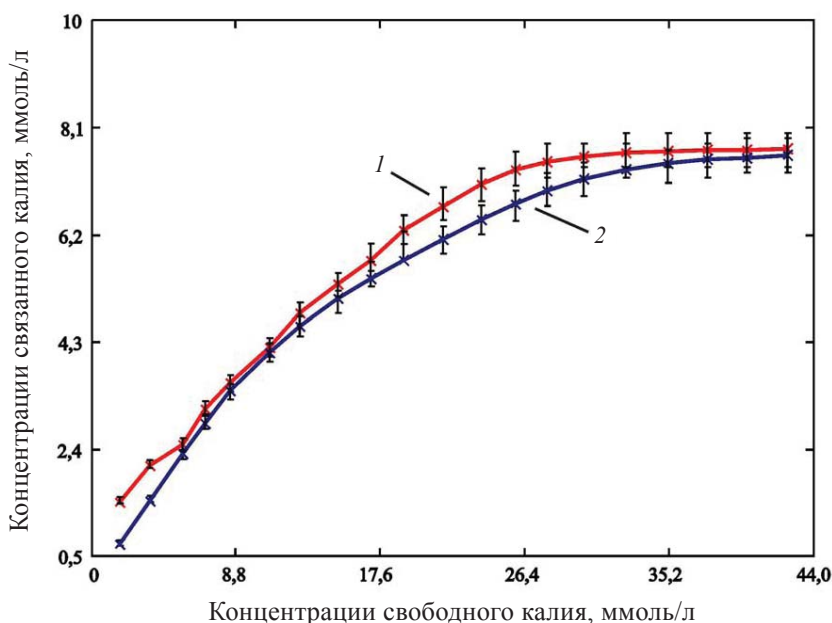


Рис. 1. Зависимость количества связанного  $K^+$  с бычьим сывороточным альбумином от концентрации свободного  $K^+$  в растворе: кривая 1 – при максимальной концентрации  $Na^+$  (0.5 моль/л); кривая 2 – при минимальной концентрации  $Na^+$  (0.05 моль/л)

К настоящему времени расшифрована первичная структура почти всех типов клеточных белков с указанием всех аминокислотных остатков в их структуре. Так, для альбумина общее число остатков аспарагиновой и глутаминовой аминокислот – рецепторов, связывающих эти катионы, составляет 99, и большинство полярных боковых групп аминокислотных остатков нахо-

дится на поверхности глобулы. У гемоглобина, имеющего более высокий уровень организации, тем не менее, общее число связывающих центров для этих катионов 54. Большее количество центров связывания на альбумине по сравнению с гемоглобином подтверждает то, что значение предельной концентрации связанного  $K^+$  альбумином больше, чем гемоглобином.

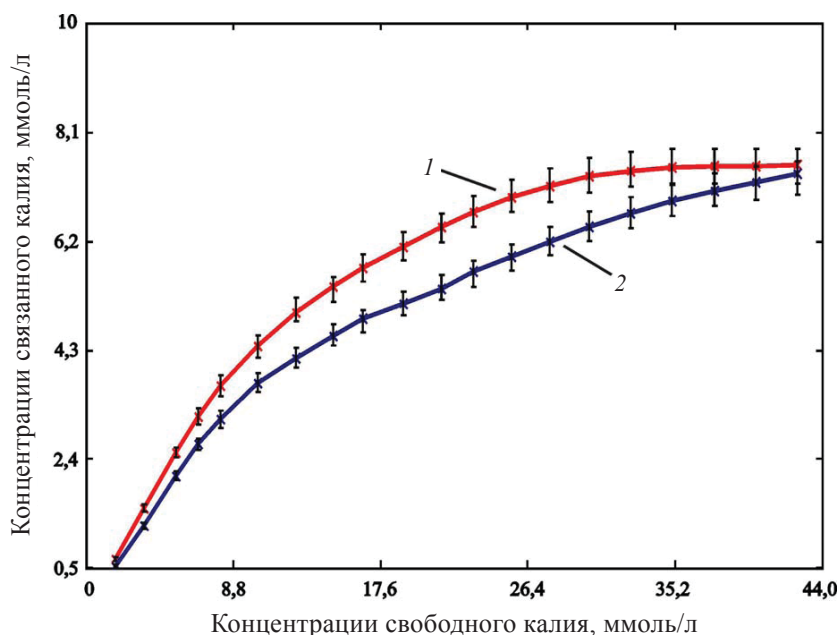


Рис. 2. Зависимость количества связанного  $K^+$  с гемоглобином от концентрации свободного  $K^+$  в растворе: кривая 1 – при максимальной концентрации  $Na^+$  (0.5 моль/л); кривая 2 – при минимальной концентрации  $Na^+$  (0.05 моль/л)

В табл. 2 приведены значения максимальных концентраций для сорбированного  $K^+$  белками при максимальной (0.5 моль/л) и минимальной (0.05 моль/л) нагрузках  $Na^+$ .

Таблица 2

**Концентрации сорбированного  $K^+$  бычьим сывороточным альбумином и гемоглобином при максимальной и минимальной концентрациях  $Na^+$  в среде инкубации**

Концентрация $Na^+$ в растворах белков, моль/л	Концентрация сорбированного белками $K^+$ , моль/л	
	БСА	Гемоглобин
0.5	$7.7 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$
0.05	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$7.36 \cdot 10^{-3}$

На основании значений концентраций  $K^+$  в белках, полученных из анализа рис. 1 и 2 и представленных в табл. 2, видно, что при большей концентрации в среде натрия сорбция калия исследуемыми белками происходит более эффективно, чем при минимальных его значениях. Подобный результат был показан в работе [30], где была получена зависимость содержания калия в портняжной мышце лягушки от его концентрации в среде инкубации при постоянной нагрузке натрия 100 ммоль/л.

Таким образом, полученные нами результаты исследований сорбции  $K^+$  в присутствии  $Na^+$  при различных концентрациях их солей хлоридов в модельных системах на примере белков бычьего сывороточного альбумина и гемоглобина

полностью подтверждаются аналогичными результатами, наблюдаемыми в исследованиях на мышцах, что свидетельствует в пользу единого механизма взаимодействия клеточных катионов.

### Заключение

На основании результатов проведенных исследований можно сделать заключение о том, что при равной концентрации солей хлоридов  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $RbCl$ ,  $CsCl$  попарно в водных растворах бычьего сывороточного альбумина и гемоглобина наблюдалась предпочтительная сорбция исследуемыми белками элемента, имеющего больший порядковый номер:  $K^+$  – в присутствии  $Na^+$ ,  $Rb^+$  – в присутствии  $K^+$ , а также  $Cs^+$  – в присутствии  $Rb^+$ . При исследовании сорбционных процессов клеточных катионов  $K^+$  и  $Na^+$  при различных концентрациях их солей в растворах отмечалось, что с ростом концентрации  $Na^+$  в составе водных растворов белков количество сорбированного  $K^+$  белками возрастает. Полученные результаты по сорбции отдельно взятыми высокоочищенными белками ионов калия в присутствии различной концентрации ионов натрия полностью соответствуют данным по связыванию одновалентных клеточных катионов в мышечных клетках.

Авторы выражают благодарность В. В. Матвееву (Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург) за ценные замечания и предложения при написа-



нии настоящей работы, а также сотрудникам кафедры аналитической химии и химической экологии СГУ профессору, доктору хим. наук Р. К. Черновой и аспирантке А. И. Данчук за проверку чистоты препаратов белков, использованных нами в экспериментах.

### Список литературы

1. Phillips L. A., Hotham-Iglewski B., Franklin R. M. Polyribosomes of *Escherichia coli*: I. Effects of monovalent cations on the distribution of polysomes, ribosomes and ribosomal subunits // J. Mol. Biol. 1969. Vol. 40, № 2. P. 279–288.
2. Reisner A. H., Bucholtz C. Studies on polyribosomes of *Paramecium*: I. Effect of Monovalent Ions // Exp. Cell. Res. 1972. Vol. 73, № 2. P. 441–455.
3. Kroeger H. Zellphysiologische Mechanismen bei der Regulation von Genaktivitäten in den Riesenchromosomen von *Chironomus thummi* // Chromosoma. 1964. Vol. 15, № 1. P. 36–70.
4. Lezzi M. Differential gene activation in isolated chromosomes // Intern. Rev. Cytol. 1970. Vol. 29, № 1. P. 127–168.
5. Lezzi M., Gilbert L. J. Differential effects of K<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup> on specific bands of isolated polytene chromosomes of *Chironomus tentans* // J. Cell Sci. 1970. Vol. 6. P. 615–627.
6. Витухновская Л. А., Исмаилов А. Д. Влияние ионов Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> на люминесцентную активность интактных клеток *Vibrio harveyi* при различных pH // Микробиология. 2001. Т. 70, № 4. С. 525–530.
7. Бояндин А. Н., Попова Л. Ю. Зависимое от минеральных солей ингибирование свечения люминесцентного микроорганизма *Escherichia coli* Z905 // Биофизика. 2001. Т. 26, № 2. С. 251–255.
8. Дерябин Д. Г., Алешина Е. С., Каримов И. Ф. Влияние катионов K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> на активность бактериальных биолюминесцентных систем *in vitro* и *in vivo* // Вестн. ОГУ. Прил. Биоэлементология. 2006. № 12. С. 77–82.
9. Fujiwara-Nagata E., Kogure K., Kita-Tsukamoto K., Wada M., Eguchi M. Characteristics of Na<sup>+</sup>-dependent respiratory chain in *Vibrio anguillarum*, a fish pathogen, in comparison with other marine *Vibrios* // FEMS Microbiol. Ecology. 2003. Vol. 44, № 2. P. 225–230.
10. Szent-Györgyi A. Studies on muscle // J. Acta Physiol. Scandinavica. 1945. № 9. Suppl. 25. P. 115.
11. Lewis M. S., Saroff H. A. The Binding of Ions to the Muscle Proteins. Measurements on the Binding of Potassium and Sodium Ions to Myosin A, Myosin B and Actin // J. Amer. Chem. Soc. 1957. № 79. P. 2112–2117.
12. Szenkuti L., Giese W. Studies on the Binding Capacity of the Skeletal Muscle Constituents For Cesium-134 // J. Health Physics. 1974. № 26. P. 343–347.
13. Beatley E. H., Klotz I. M. Interaction of sodium and potassium ions with hemoglobin and with hemerythrin // J. Biol. Bull. 1951. № 101. P. 215.
14. Carr C. W. Studies on the binding of small ions in protein solutions with the use of membrane electrodes. VI. The binding of sodium and potassium ions in solutions of various proteins // J. Arch. Biochem. Biophys. 1956. № 62. P. 476–484.
15. Edelmann L. Potassium adsorption sites in frog muscle visualized by cesium and thallium under the transmission electron microscope // J. Physiol. Chem. Phys. 1977. № 9. P. 313–317.
16. Trombitás C., Tigy-Sebes A. X-ray microanalytical studies on native myofibrils and mitochondria isolated by microdissection from honey-bee flight muscle // Acta Biochimica et Biophysica; Academiae Scientiarum Hungaricae. 1979. № 14. P. 271–277.
17. Edelmann L., Fresenius Z. Selective Accumulation of Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, and Cs<sup>+</sup> at Protein Sites of Freeze-Dried Embedded Muscle Detected by LAMMA // J. Anal. Chem. 1981. № 308. P. 218–220.
18. Zglinicki T. von. Monovalent Ions are Spatially Bound within the Sarcomere // J. Gen. Physiol. Biophys. 1988. № 7. P. 495–504.
19. Ling G. N. A revolution in the Physiology of the Living Cell. Malabar: Fl. Krieger Publ. Co., 1992. 404 p.
20. Ling G. N., Ochsenfeld M. M. Studies on ion accumulation in muscle cells // J. Gen. Physiol. 1966. Vol. 49, № 4. P. 819–843.
21. Eisenman G. Glass Electrodes for Hydrogen and Other Cations: Principles and Practices. N.Y.: Marcel Dekker, 1967. 344 p.
22. Ling G. N. A new model for the living cell: a summary of the theory and recent experimental evidence in its support // J. Intern. Rev. Cytology. 1969. № 26. P. 1–61.
23. Гордон Дж. Органическая химия растворов электролитов. М.: Мир, 1979. 712 с.
24. Мархол М. Ионообменники в аналитической химии. Свойства и применение в неорганической химии: в 2 ч. Ч. 1. М.: Мир, 1985. 264 с.
25. Ling G. N. A Physical Theory of the Living State: The Association-Induction Hypothesis. Waltham, Massachusetts: Blaisdell Publ. Co., 1962. 680 p.
26. Балданов М. М., Балданова Д. М., Жигжитова С. Б., Танганов Б. Б. К проблеме радиусов гидратированных ионов // ДАН ВШ России. 2006. № 2. С. 32–34.
27. Широбоков И. Б., Вельма Н. А. Моделирование строения гидратных оболочек ионов щелочных металлов и галогенид-ионов статистическими методами // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Физика. Химия. 2008. Вып. 2. С. 37–57.
28. Debye P., Pauling L. The inter-ionic attraction theory of ionized solutes. IV. The influence of variation of dielectric constant on the limiting law for small concentrations // J. Amer. Chem. Soc. 1925. № 47. P. 2129–2134.
29. Ling G. N. Quantitative relationships between the concentration of proteins and the concentration of K<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup> in red cell ghosts // Phosphorus Metabolism. Vol. II / eds. W. D. McElroy, B. Glass. Baltimore: The Johns Hopkins Univ. Press., 1952. P. 748–795.
30. Ling G. N. All-or-none adsorption by living cells and model protein-water systems: discussion of the problem of «permease-induction» and determination of secondary and tertiary structures of proteins // Fed. Proc. 1966. Vol. 25, № 3. P. 958–970.