DOI: 10.17117/na.2016.08.01.257

<http://ucom.ru/doc/na.2016.08.01.257.pdf>

Поступила (Received): 28.08.2016

Артемова Д.Г.**Транспорт ионов через мембрану. Расчет характерных размеров гидратированных ионов****Artemova D.G.****Transport of ions through the biological membrane.
The calculation of the characteristic dimensions of hydrated ions**

Согласно современным представлениям, селективность канала, прежде всего, определяется радиусом транспортируемого иона. В статье приводится расчет радиусов основных ионов, составляющих ионный транспорт

Ключевые слова: ионный транспорт, ион, мембрана

According to the modern concepts, channel selectivity is mainly determined by the radius of the transported ion. The article provides a calculation of the main sizes of ions constituting the ion transport

Key words: ion transport, ion, membrane

Артемова Диана Георгиевна

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
г. Москва, ул. Вавилова, 38

Artemova Diana Georgievna

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Prokhorov general physics institute RAS
Moscow, Vavilov st., 38

Через гидрофильные липидные и белковые поры сквозь мембрану проникают молекулы нерастворимых в липидах веществ и водорастворимые гидратированные ионы, окруженные молекулами воды. Для жиронерастворимых веществ и ионов мембрана выступает как молекулярное сито: чем больше размер частицы, тем меньше проницаемость мембраны для этого вещества. Избирательность переноса обеспечивается набором в мембране пор определенного радиуса, соответствующих размеру проникающей частицы. Это распределение зависит от мембранного потенциала. Так, избирательные для ионов калия поры в мембране эритроцитов имеют сравнительно низкий коэффициент проницаемости, равный 4 пм/с при мембранном потенциале 80 мВ, который уменьшается в четыре раза с понижением потенциала до 40 мВ.

Согласно современным представлениям, селективность канала, прежде всего, определяется радиусом транспортируемого иона. Ионы, радиус которых превышает радиус канала, не способны проходить через канал вследствие такого несоответствия. Ионы, обладающие меньшим радиусом, по сравнению с радиусом канала, также не всегда могут пройти через канал. Чем меньше радиус иона по сравнению с радиусом канала, тем меньше вероятность прохождения

иона через этот канал. Этот эффект объясняется тем, что ионы в водном растворе всегда находятся в гидратированном состоянии. Перенос же через канал требует сброса нескольких гидратных оболочек, в результате которого ион остается лишь в одной гидратной «одежке». Сброшенная гидратная оболочка заменяется другими полярными соединениями, в роли которых выступают фиксированные дипольные группы канала. Размер иона должен быть таковым, чтобы он мог взаимодействовать с оптимальным числом этих полярных групп. Например, ион калия в своем селективном канале взаимодействует со всеми пятью атомами кислорода, а меньший по размеру ион натрия может связаться в калиевом канале только с двумя атомами кислорода. Следовательно, прочность связи канала с ионом натрия будет минимальна. А если связи иона с дипольными группами нет совсем, то и пройти он через этот канал не может. Следовательно, лучше всего проходит через канал тот ион, который имеет радиус (вместе с одинарной гидратной «одежкой») равный радиусу канала.

Проникновение иона в пору облегчается тем, что возрастание свободной энергии, обусловленное потерей гидратной оболочки (500–700 кДж/моль), компенсируется понижением энергии при взаимодействии с дипольными группами канала. Другим важным фактором, облегчающим проникновение иона в канал, является кулоновское взаимодействие транспортируемого катиона с фиксированным анионным центром внутри канала. Наличие дипольных групп в канале и фиксированных зарядов приводит к тому, что энергия перехода иона из раствора в канал не превышает $\sim 30,5$ кДж/моль.

Наблюдаемая в опытах резкая зависимость проницаемости ионов от их геометрии и размеров говорит о том, что она определяется топографией селективного фильтра, соответствующего наиболее узкому месту. Когда размер иона достигает критического значения, его проницаемость падает до нуля. В целом, однако, структурные факторы, определяющие проницаемость, не (водятся лишь к геометрии иона и селективного фильтра, а должны включать детали химического строения макромолекул канала, а также сопряженных с перемещением ионов движений молекул воды в поре [1].

Проницаемость мембраны аксона кальмара для ионов калия при уровне потенциала возбуждения определяется калиевыми каналами, радиус которых численно оценивается как сумма кристаллического радиуса иона калия и толщины одной гидратной оболочки ($0,133 \text{ нм} + 0,272 \text{ нм} = 0,405 \text{ нм}$). Следует подчеркнуть, что селективность ионных каналов неабсолютна, каналы доступны и для других ионов, но с меньшими значениями P (таблица 1) [2]. Из таблицы 1 следует, что максимальная величина P соответствует ионам калия. Ионы с большими кристаллическими радиусами (рубидий, цезий) имеют меньшие P , по-видимому, потому, что их размеры с одной гидратной оболочкой превышают размер канала.

Менее очевидна причина сравнительно низкого P для ионов лития и натрия, имеющих меньший сравнительно с калием радиус. Исходя из представления о мембране, как молекулярном сите, можно было бы думать, что они должны свободно проходить через калиевые каналы. Одно из возможных решений этого противоречия предложено Л. Муллинзом [2].

Таблица 1. Отношение проницаемостей для одновалентных ионов в калиевом канале аксона кальмара

$\frac{P_{\text{ион}}}{P_{\text{калий}}}$	Ион	Кристаллический радиус, нм
0,018	Литий	0,060
0,010	Натрий	0,095
1,000	Калий	0,133
0,910	Рубидий	0,148
0,077	Цезий	0,169

Он предполагает, что в растворе вне поры каждый ион имеет гидратную оболочку, состоящую из трех сферических слоев молекул воды. При вхождении в пору гидратированный ион “раздевается”, теряя воду послойно. Пора будет проницаема для иона, если ее диаметр точно соответствует диаметру любой из этих сферических оболочек. Как правило, в пору ион остается с одной гидратной оболочкой. Расчет, приведенный выше, показывает, что радиус калиевой поры составит в этом случае 0,405 нм. Гидратированные ионы натрия и лития, размеры которых не кратны размерам поры (0,095 нм + 0,272 нм = 0,367 нм (для Na) и 0,060 нм + 0,272 нм = 0,332 нм (для Li)), будут испытывать затруднение при прохождении через нее. Отмечено своеобразное “квантование” гидратированных ионов по их размерам при прохождении через поры.

Диффузия является медленным процессом, особенно в тех случаях, когда осуществляется через клеточные мембраны, но, несмотря на это, она имеет большое физиологическое значение. Поскольку на поверхности клеток присутствуют поры, размером до 8 нм, через которые свободно проходят только молекулы воды и очень малых размеров водорастворимые ионы и молекулы, это позволяет водному обмену в клетке совершаться с большой скоростью.

Согласно Solomon [3], поверхность пор имеет белковые молекулы с положительным зарядом (рисунок 1), в результате чего ионы с положительным зарядом проходят с трудом. Избыток ионов Ca во внеклеточной жидкости понижает проницаемость мембраны, а его уменьшение увеличивает ее.

Рис. 1. Прохождение ионов через мембрану при наличии белковых молекул на поверхности поры

Независимо от специфической проницаемости мембраны степень „чистой диффузии“ зависит от концентрационного градиента вещества по обе стороны мембраны.

Если по обе стороны мембраны имеется электрический потенциал, то заряженные частицы будут передвигаться в направлении противоположного заряда, даже если не существует разницы в концентрации.

Список используемых источников:

1. Голант М.Б., Виленская Р.Л., Зюлина Е.А. Серия широкодиапазонных генераторов малой мощности ММ и СбММ диапазоне // ПТЭ. 1965. N4. С. 136-139.
2. Антонов В.Ф. Липидные поры: стабильность и проницаемость мембран // Соросовский образовательный журнал. 1998. №10. С. 10-17.
3. Staalworthy W., Fensom D.J. *Physiol. Pharmacol.*, 1966. P. 44.

© 2016, Артемова Д.Г.

Транспорт ионов через мембрану. Расчет
характерных размеров гидратированных ионов

© 2016, Artemova D.G.

Transport of ions through the biological membrane.
The calculation of the characteristic dimensions of
hydrated ions