

Для плоской границы раздела  $\eta^2 \xi = \sigma(\infty)$  [2], и тогда (4) можно переписать в виде

$$W = 4\pi R^2 \sigma(R), \quad (5)$$

$$\sigma(R) = \frac{\sigma(\infty)}{\text{sh}^2(R/\xi)} \left( \frac{1}{2} \text{sh}(2R/\xi) + \frac{\xi}{2R} (1 - \text{ch}(2R/\xi)) \right). \quad (6)$$

Заметим, что при  $R \gg \xi$   $\sigma(R) = \sigma(\infty)$ , а при  $R \ll \xi$   $\sigma(R) = R \sigma(\infty) / (3\xi)$ , т. е. с уменьшением радиуса капли поверхностное натяжение уменьшается и при  $R=0$ ,  $\sigma=0$ . На границе макроскопических фаз  $\sigma(\infty) = 50$  эрг/см<sup>2</sup> [3], а для капли с  $R=5 \text{ \AA}$  из формулы (6) получим  $\sigma = 8,3$  эрг/см<sup>2</sup>. Поверхностная энергия согласно (5) будет при этом составлять 6,2 кТ (где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура), если же использовать макроскопическое значение  $\sigma$ , то получим 37,1 кТ. Эти числа показывают, что вероятность образования микроскопических капель с реальным значением  $\sigma$  на 13 порядков выше, чем оценки по макроскопическим значениям  $\sigma$ .

Выражаю благодарность Ю. А. Чизмаджеву и В. Ф. Пастушенко за полезные дискуссии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пастушенко В. Ф. Биофизика, 19, 2, 227—231, 1984.
2. Лейкиш С. Л., Глазер Р. В., Черноморских Л. В. Биол. мембраны, 3, 9, 944—951, 1986.
3. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М., 1979.
4. Träubel H. J. Membrane Biol., 4, 193—209, 1971.
5. Israelachvili J. N., Pashley R. M. J. Colloid and Interface Sci., 93, 500—514, 1984.
6. Marcelja S. Croat. Chem. Acta, 49, 347—377, 1977.

Получено 14.XI.1988 г.

Биолог. ж. Армения, № 1, (12), 1989

УДК 612.35:537.2

### ИОННАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ БИСЛОЙНЫХ МЕМБРАН ИЗ ЛИПИДОВ ЭРИТРОЦИТОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Г. Г. АРЦРЯНИ, Р. А. МАНУКЯН, С. А. БАДЖИЯН

Ереванский медицинский институт

Мембраны бислоиные липидные — эритроциты — электростатическое поле

Сильные электрические поля вызывают значительное увеличение проницаемости эритроцитарных мембран для моновалентных катионов в результате образования и увеличения размеров гидрофильных пор [5, 6, 9]. Ранее нами было показано, что воздействие ЭСП *in vivo* приво-

Сокращения: БЛМ — бислоиные липидные мембраны, ЭСП — электростатическое поле

дит к повышению кислотной и осмотической резистентности эритроцитов крыс, что свидетельствует об упрочении эритроцитарных мембран [4]. Изучение липидного компонента эритроцитарных мембран после воздействия ЭСП представляет для нас определенный интерес, поскольку, являясь основой структурной организации мембран, липидный бислой обеспечивает эффективный транспорт ионов и без участия белковых транспортных систем. В настоящей работе представлены результаты исследования проводимости БЛМ, приготовленных из эритроцитарных липидов, для катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  после воздействия ЭСП.

**Материал и методика.** Опыты проводили на беспородных крысах-самцах массой 120—150 г. Кровь после декапитации животных собирали в пробирки с 3%-ным раствором натрия. Эритроциты осаждали при 1000 об/мин в течение 10 мин и трижды отмывали изотоническим раствором (150 мМ NaCl, 10 мМ трис, pH 7,3). Липиды экстрагировали по методу Фолча [7]. Из высушенного липидного экстракта формировали бислоиные мембраны по методу Мюллера [10]. Электрические измерения проводили при помощи высокоомного электрометра, используя пару хлорсеребряных электродов, погруженных в растворы KCl, NaCl,  $\text{CaCl}_2$  (0,1 М) [2], при температуре 22—24°. Проводимость определяли по формуле  $g^{-1}a$ , где  $\rho$ —удельное сопротивление мембраны (ом·см<sup>2</sup>). Результаты измерений представлены в виде графиков зависимости  $\lg g$  от исследованных экпозиций поля.

Были проведены 2 серии экспериментов. В I серии исследовали проницаемость БЛМ из липидов эритроцитов крыс, подвергшихся воздействию ЭСП напряженностью 2 кВ/см, длительностью час, сутки, 6 сут по 6 ч ежедневно. ЭСП создавали при помощи установки, описанной в работе [1]. Во II серии опытов липиды, полученные из эритроцитов интактных животных, и чистый лецитин подвергали часовому воздействию ЭСП, после чего определяли проводимость БЛМ, приготовленных из этих липидов. Методом ТСХ проводили качественный анализ эритроцитарных липидов, разлагаемых в системе хлороформ—метанол—вода в соотношении 65:25:4.

**Результаты и обсуждение.** Результаты исследований (рис., а) показали, что часовая экпозиция *in vivo* приводит к увеличению проницаемости для  $\text{Ca}^{2+}$  на полтора порядка, для  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ —более чем на порядок. При суточной экпозиции изменений не наблюдается, а после длительного пробного воздействия имеет место увеличение проводимости для  $\text{Ca}^{2+}$  по сравнению с контролем на порядок.

Часовая экпозиция ЭСП *in vitro* (рис., б) приводит к увеличению проницаемости для всех катионов на порядок. В опытах с лецитином, подвергшимся часовому воздействию поля, наблюдался противоположный эффект. Здесь имел место уменьшение проницаемости для  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  в 10 раз.

Хроматография липидов не выявила изменений в качественном составе эритроцитарных липидов после воздействия ЭСП.

Как показали результаты наших исследований, часовое воздействие *in vivo* и *in vitro* приводит к разнонаправленным сдвигам проводимости БЛМ. Следует отметить, что воздействию *in vitro* липиды подвергались в атмосфере азота с целью ингибирования возможных процессов окисления [3]. Говорить о конкретных механизмах изменения проницаемости липидного бислоя после воздействия ЭСП преждевременно. Однако мы можем предположить, что наблюдаемые эффекты являются следствием модификации полярных головок фосфолипидов из-за перераспределения заряда на них. Последнее в свою очередь

представляет собой истаточный эффект поляризации и деполяризации липидных молекул при наложении и снятии внешних ЭСП. Перераспределение и изменение заряда полярных головок в бислое может привести к фазовому переходу, образованию в бислое сквозных ионных каналов, изменению проницаемости, о чем свидетельствуют литературные данные [8, 11].

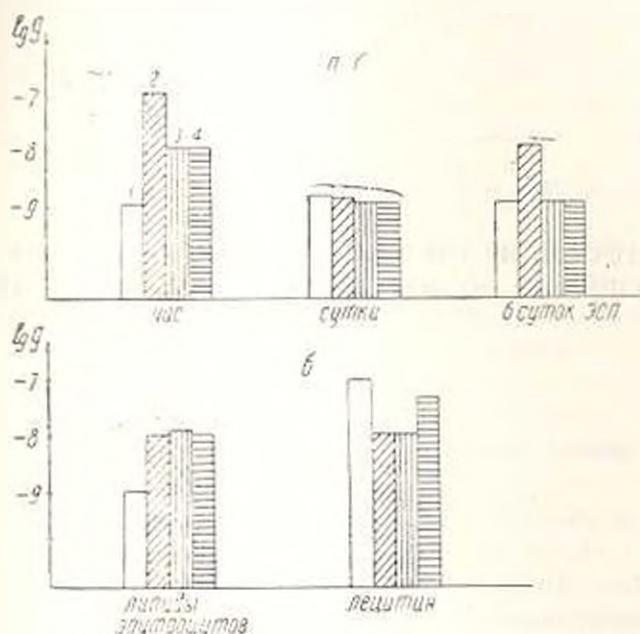


Рис а. Проницаемость БЛМ из липидов эритроцитов после воздействия ЭСП *in vivo*; б. проницаемость БЛМ из липидов эритроцитов и лецитина, подвергшихся часовому воздействию ЭСП *in vitro*. 1—контроль; 2—проницаемость Ca<sup>2+</sup>; 3—Na<sup>+</sup>; 4—K<sup>+</sup>.

Как следует из полученных результатов, изменение липидной проницаемости имеет место после кратковременного воздействия ЭСП *in vivo* и *in vitro*. Это, по-видимому, является следствием непосредственного действия ЭСП на липиды, о чем свидетельствует также отсутствие изменений в липидном составе эритроцитов после воздействия ЭСП всех исследованных экспозиций.

Анализируя результаты наших исследований и некоторые литературные данные, мы можем заключить, что ЭСП является физическим фактором, воздействие которого приводит к модификации липидного компонента эритроцитарных мембран.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арцруни Г. Г. Мат-лы научн. конф. мол. уч., посвящ. 25-му съезду КПСС. 32, Ереван, 1975.
2. Баджигян С. С. Биолог. ж. Армении, 2, 6. 1976.
3. Владжиров Ю. А., Арчаков А. И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М., 1972.
4. Манукян Р. А., Арцруни Г. Г. Тез. докл. II конф. по пробл. физ-хим биологии и биотехнологии в медицине. 39, Ереван, 1986.

5. Ben-Sasson Sh., Naaman J., Grover N. B. *Analyt. Quant. Cytol.*, 1, 4, 309—314, 1982.
6. Deuticke B. Hoop—Seyler's *Z. Physiol.*, 365, 3, 229—230, 1984.
7. Folch P. J., Lees M., Sloane—Stanley G. H. *J. Biol. Chem.*, 226, 1, 497—509, 1957.
8. Kimura J., Ikegami A. In *Abstr. 6th Internat. Biophys. Congress.*, 131, 1978.
9. Kinosita K., Tsong T. Y. *Biochim et Biophys. acta.* 554, 2, 479—497, 1979.
10. Mueller R., Rudin R., Tien G. *Nature*, 3, 1963.
11. Trauble H., Eibl H. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 71, 214—219, 1974.

## СВОБОДНОРАДИКАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ ПЕЧЕНИ КРЫС, ПОДВЕРГШИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Г. Г. АРЦРУНИ, А. Г. ОГАНОВА

*Печень—свободные радикалы—электростатическое поле*

В литературе [3, 4, 7] приводятся данные, свидетельствующие о влиянии ЭСП на окислительно-восстановительные процессы в биологических системах. Переносчиком электронов в окислительно-восстановительных процессах является соединения свободнорадикального типа (СР), дающие характерный сигнал ЭНР с  $g$ -фактором, близким к  $g$ -фактору свободного электрона [1]. Соответственно уровень свободнорадикальной активности (концентрация СР) может служить показателем интенсивности окислительно-восстановительных процессов.

В настоящей работе приводятся результаты исследования методом ЭНР-спектроскопии свободнорадикальной активности целостной ткани печени крыс, подвергшихся воздействию ЭСП.

*Материал и методика.* Эксперименты проводили на белых беспородных крысах-самцах массой 150—180 г, которых подвергали воздействию ЭСП напряженностью 2000 в/см. Продолжительность воздействия составляла один час, сутки, и 6 дней в 6 ч ежедневно. ЭСП создавали при помощи установки, описанной в работе [2]. Сразу после воздействия ЭСП животных декапитировали, извлеченную печень помещали в специальную форму, которую погружали в жидкий азот [5]. Получаемая таким образом таблетка служила образцом для ЭНР-измерений. Образцы хранили при температуре жидкого азота. Во избежание влияния циркадных ритмов контрольные и экспериментальные заборы проводили в один и то же время.

Спектры ЭНР регистрировали на ЭНР-спектрометре типа ЭНР-В X-диапазона в специальной кварцевой ювенте при температуре паров жидкого азота. Концентрацию свободных радикалов в образце оценивали по относительной интенсивности наибольшей компоненты спектра с  $g$ -фактором 2,004. В качестве репера относительной интенсивности сигнала использовали третью и четвертую компоненты спектра  $Mn^{2+}$  в полукристаллической решетке  $MgO$ , стационарно закрепленного в боковом отверстии резонатора. Относительная ошибка измерения не превышала 10%. Полученные результаты обрабатывали статистически с использованием критерия Фишера-Стьюдента.