

Б. А. АЛЛАХВЕРДОВ, И. В. БУРОВИНА, В. И. ГОВАРДОВСКИЙ,
К. А. КОЙЧЕВ

ИОННЫЙ СОСТАВ РЕЦЕПТОРНЫХ КЛЕТОК ЛАБИРИНТА И ОКРУЖАЮЩЕЙ ИХ СРЕДЫ

(Представлено академиком Е. М. Крепом 29 VII 1974)

Полости перепончатого лабиринта позвоночных заполнены эндолимфой, резко отличающейся по своему ионному составу от большинства внеклеточных жидкостей организма. Эндолимфа содержит 120—150 мэкв/л ионов калия и всего 5—20 мэкв/л ионов натрия (^{1, 2}). Высокое содержание калия характерно также для внеклеточной жидкости других механорецепторных органов — каналов боковой линии и телец Пачини (³). Предполагается, что рецепторная мембрана, соприкасающаяся со средой с высоким содержанием калия, приобретает повышенную чувствительность к механическим воздействиям (⁴). Однако в большинстве случаев ответственным за генерацию рецепторного потенциала считается натрий, содержание которого во внеклеточной среде обычно намного выше, чем в клетке. Если механорецепторные волосковые клетки органа слуха и вестибулярного аппарата находятся в своеобразной среде, содержащей мало ионов натрия и много калия, то должны существовать иные объяснения механизма их работы.

Электрическая разность потенциалов между эндолимфой и перилимфой в улитке достигает 80 мв (^{5, 6}). Можно предположить, что движущей силой для ионов в этом случае может служить не градиент концентраций, а указанная разность потенциалов. Не исключено также, что сами рецепторные клетки, находясь в среде с высоким содержанием калия, имеют ионный состав, сильно отличающийся от состава клеток, находящихся в натриевой среде. В то же время ряд авторов предполагают, что рецепторные клетки не соприкасаются непосредственно с эндолимфой, а находясь в среде с обычной внеклеточной концентрацией натрия и калия, которая отделяется от эндолимфы вспомогательными структурами — текториальной мембраной в кортиевом органе, отолитовой мембраной в саккулюсе и утрикулюсе и купулой в ампулах полукружных каналов (²). Однако существование такой специфической субмембранной или субкупулярной лимфы до сих пор не доказано.

Для выяснения этого вопроса мы изучали распределение натрия и калия, а также кальция и фосфора в утрикулюсе при помощи рентгеноспектального микроанализа.

Изолированные лабиринты лягушек *Rana temporaria* замораживали в изопентане, охлажденном жидким азотом до -160° , высушивали в вакууме при -30° и заливали в эпон-812 (⁷). Эпоновые срезы толщиной 5 мкм анализировали в сканирующем электронном микроскопе JEM-U-3 с приставкой для рентгеноспектального микроанализа при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе образца 40 нА. Идентификацию структур проводили по параллельным срезам, окрашенным метиленовым синим (рис. 1А*), и по изображению анализируемого среза во вторичных электронах (рис. 1Б). На рис. 1В—Е приведены фотографии этого же участка среза в характеристических лучах исследуемых элементов. Большая плотность белых точек соответствует более высокой концентрации элемента.

* Рис. 1 см. вклейку к стр. 709.

Рецепторные клетки макулы богаты калием и фосфором и содержат мало натрия по сравнению с перилимфой, приближающейся по составу к плазме крови. Высокое содержание калия и фосфора и низкая концентрация натрия наблюдается и в остальных клетках эпителия, причем калий и фосфор распределены внутри клеток неравномерно, область повышенной концентрации этих двух элементов совпадает с областью эпителия, содержащей ядра клеток. Корреляция между распределением калия и фосфора внутри клеток наблюдалась нами ранее в клетках сетчатки ⁽⁸⁾ и в нейронах моллюсков ⁽⁹⁾.

Границы зоны с высоким содержанием фосфора четко совпадают с границами зоны, занятой клетками эпителия. Высокая концентрация фосфора в пикней части среза (рис. 1Д) и отдельные мелкие участки, богатые фосфором, относятся к костной ткани, содержащей фосфат кальция. В этих участках наблюдается соответственно высокая концентрация кальция. Кальция так же много в отокониях, состоящих из арагонита ⁽¹⁰⁾.

Высокая концентрация калия характерна не только для клеток эпителия, но и для эндолимфы, находящейся над отолитовой мембраной, и для желеобразной массы самой мембраны, остатки которой видны над компактной массой отолитов. Пространство между отолитами и поверхностью рецепторных клеток также заполнено жидкостью с высокой концентрацией калия и низким содержанием натрия. Отолитовая мембрана содержит много натрия, однако область высокой концентрации натрия совпадает с кристаллами отоконий, не распространяясь на свободную от них желеобразную часть мембраны. Свободные ионы натрия и калия, находящиеся в клетках и внеклеточной жидкости, могут быть легко отмыты даже с эпоновых срезов. При этом высокая концентрация натрия в области отоконий сохраняется, указывая на то, что здесь мы имеем дело со связанным натрием, возможно, входящим в состав самих отоконий.

Полученные данные показывают, что субмембранное пространство содержит жидкость, по ионному составу подобную эндолимфе, с высокой концентрацией калия и относительно низким содержанием натрия. Рецепторные клетки также имеют обычный ионный состав. Иногда предполагается, что желеобразные вспомогательные структуры внутреннего уха, содержащие много мукополисахаридов, могут накапливать натрий из эндолимфы и служить источником этого иона при генерации рецепторного потенциала ⁽¹¹⁾. Эти структуры обнаруживают большое количество осадка при электронно-микроскопическом исследовании срезов ткани, обработанной пироантимонатом калия ⁽¹¹⁾, однако известно, что пироантимонат выявляет, кроме натрия, и двухвалентные катионы — кальций и магний, и некоторые биогенные амины ⁽¹²⁾. По нашим данным, отолитовая мембрана не накапливает сколько-нибудь заметно ионы натрия. По предварительным результатам, это справедливо и для текториальной мембраны кортиева органа.

Таким образом, в волосковых клетках утрикулуса отсутствует обычный для других рецепторов значительный ионный градиент между клеточным содержимым и внеклеточной средой. К тому же разность потенциалов между эндолимфой и перилимфой вестибулярной части лабиринта, в отличие от улитки, практически равна нулю ⁽¹³⁾. Это делает особенно интересным вопрос о механизмах генерации здесь рецепторного потенциала.

Институт эволюционной физиологии и биохимии
Академии наук СССР
Ленинград

Институт биофизики
Академии наук СССР
Пущино-на-Оке

Медицинская академия
София, НРБ

Поступило
24 V 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ S. A. Smith, O. H. Lowry, M. I. Wu, Laryngoscope, v. 64, 141 (1954).
- ² S. Rauch, Biochemie des Hörorganes, Stuttgart, 1964.
- ³ О. Б. Ильинский, Т. Л. Красникова, В сб. Механизмы работы рецепторных элементов органов чувств, «Наука», 1973, стр. 146.
- ⁴ J. Tasaki, In: Neural Mech. of Auditor. and Vest. System, 1960, p. 40.
- ⁵ G. von Bekesy, Experiments in Hearing, London, 1960.
- ⁶ S. K. Bosher, R. Z. Warren, Proc. Roy. Soc., B., v. 171, 227 (1968).
- ⁷ И. В. Буровина, Э. Н. Гахова и др., Цитология, т. 14, 1057 (1972).
- ⁸ И. В. Буровина, В. И. Говардовский, А. Ф. Сидоров, ДАН, т. 206, 222 (1972).
- ⁹ И. В. Буровина, А. Ф. Сидоров, Журн. эволюцион. биохим. и физиол. т. 7, 576 (1971).
- ¹⁰ D. Carlström, Biol. Bull., v. 125, 441, (1963).
- ¹¹ Ya A. Vinnikov, K. A. Kojchev, Nature, v. 223, 641 (1969).
- ¹² R. E. Bulger, J. Cell Biol., v. 40, 79 (1969).
- ¹³ D. Trinker, Arch. Ges. Physiol., B. 246, 351 (1957).