

ТЕОРИЯ ГРАФОВ В ИММУНОМОРФОЛОГИИ

**А. И. Краюшкин, В. Л. Загребин, Л. И. Александрова,
А. И. Перепелкин, Н. Г. Краюшкина, М. А. Пикалов**

*Волгоградский государственный медицинский университет,
кафедра анатомии человека,
кафедра гистологии, эмбриологии, цитологии*

В статье приводятся данные с позиции теории графов о воздействии переменного электромагнитного поля промышленной частоты различного срока облучения на брыжеечные и паховые лимфатические узлы, особенности степени ветвления мозговых тяжей.

Ключевые слова: морфометрия, граф, лимфоузлы, мозговые тяжи.

THE THEORY OF GRAPHS IN IMMUNOMORPHOLOGY

**A. I. Krayushkin, V. L. Zagrebin, L. I. Alexandrova,
A. I. Perepelkin, N. G. Krayushkina, M. A. Pikalov**

The article provided the data on the impact of an alternating magnetic field of industrial frequency on mesenterial and inguinal lymph nodes as well as on branching of medullary cords proceeding from the theory of graphs.

Key words: morphometrics, graph, lymph nodes, medullary cords.

В качестве графа рассматривают геометрическую фигуру, состоящую из совокупности множества точек (вершин) и линий (ребер), соединяющих точки [4]. Теория графов применима не только в математике и информатике, но и в антропологии, географии, лингвистике, искусстве, музыке, физике, инженерном деле, химии, архитектуре, урбанистике, социальных сетях и других областях. Графы используют для создания представлений между элементами конечного множества, которое позволяет извлечь дополнительную информацию о структурах, имеющих подобную конфигурацию.

В иммуноморфологии, при изучении наиболее представительных органов иммуногенеза — лимфатических узлов, в качестве графов можно рассматривать такие протяженные образования, как мозговые тяжи, являющиеся В-зависимыми зонами лимфатических узлов [6].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

С позиции теории графов выявить закономерности динамики морфометрических параметров мозговых тяжей лимфатических узлов при экспериментальном воздействии переменного электромагнитного поля промышленной частоты (ПЭМП ПЧ) и напряженности 16 кА/м в зависимости от продолжительности воздействия и локализации лимфатических узлов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы висцеральные (брыжеечные) и соматические (паховые) лимфоузлы клинически здоровых половозрелых (6 мес.) кроликов-самцов породы шиншилла (10 интактных животных и 40 в экспериментальной группе по 10 кроликов, подвергаемых в различные сроки воздействию ПЭМП ПЧ — 50 Гц и

напряженности 16 кА/м). Каждые 10 опытных животных облучали в течение 1, 7, 14 и 28 суток (по 6 часов в день). Забор материала осуществляли на следующий день после завершения эксперимента. Извлеченные лимфоузлы фиксировали в жидкости Карнуа и 10%-м водном растворе формалина, изготавливали парафиновые блоки, из которых в соответствии с общепринятыми методиками готовили серийные гистологические срезы толщиной 5—7 мкм, на уровне ворот и полюсов узлов, окрашивали гематоксилин-эозином. Особенности ветвления мозговых тяжей, которое в литературе дается только описательно [6], в норме и при облучении ПЭМП ПЧ определяли способом количественной характеристики степени ветвления структур, основанной на теории графов [1, 3, 4, 5]. Продольные оси мозговых тяжей в плоскости среза представляли в виде плоских фигур-графов, вершинами которых служили места отхождения лучей — степень вершины графа (рац. предл. № 14 от 22.02.2011, ВолгГМУ). Критерием степени сложности конструкции мозговых тяжей в соответствии с теорией графов служило процентное соотношение числа вершин с различным количеством сходящихся к ним лучей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика морфометрических параметров, иллюстрирующих количественную оценку степени ветвления мозговых тяжей лимфатических узлов в норме и при облучении ПЭМП ПЧ различной экспозиции, представлена в табл.

Как следует из приведенных данных таблицы, в брыжеечных лимфоузлах контрольных животных пре-

Процентное соотношение (%) вершин с различным количеством лучей графов мозговых тяжей в плоскости среза лимфоузлов интактных кроликов и при облучении ПЭМП ПЧ различной длительности

Степень вершины графа	Брыжеечные лимфоузлы			Паховые лимфоузлы		
	время экспозиции поля			время экспозиции поля		
	контроль	7 дней	28 дней	контроль	7 дней	28 дней
1	13,64 ± 0,87 [#]	77,42 ± 1,14 [♦]	27,78 ± 1,31	—	16,67 ± 1,56	—
2	54,55 ± 1,77	12,30 ± 0,73 [♦]	44,44 ± 1,36	40,63 ± 1,23	50,06 ± 1,87	40,43 ± 1,27
3	22,73 ± 0,46	6,45 ± 0,80 [♦]	22,22 ± 0,43	28,13 ± 1,27 [#]	27,77 ± 1,01	36,17 ± 1,50
4	9,08 ± 1,24	3,83 ± 0,76 [♦]	5,56 ± 0,65	25,00 ± 0,43	5,56 ± 0,77	23,40 ± 0,42
5	—	—	—	6,24 ± 0,67	—	—

^{*}*p* < 0,05 — контроль по отношению к опытной группе 7 дней облучения ПЭМП ПЧ;

[#]*p* < 0,05 — контроль по отношению к опытной группе 28 дней облучения ПЭМП ПЧ;

[♦]*p* < 0,05 — опытная группа 7 дней облучения ПЭМП ПЧ по отношению к группе 28 дней облучения ПЭМП ПЧ.

обладают двух- и трехлучевые конструкции графов [(54,55 ± 1,77)% и (22,73 ± 0,46) % соответственно]. Незначительно количество однолучевых и четырехлучевых структур. В «критический» период облучения (после 7 суток), когда утрачивается мера упорядоченности пространственного расположения мозговых тяжей, существенное преобладание получают однолучевые структуры (77,42 ± 1,14) %. Последние нередко выглядят в виде отдельных островков овоидной или несколько вытянутой формы на фоне расширенных мозговых лимфатических синусов.

После воздействия ПЭМП ПЧ в течение 28 суток (период «восстановления») степень ветвления мозговых тяжей имеет выраженную тенденцию приближения к контрольным значениям. Хотя в данный период эксперимента преобладают двух- и однолучевые композиции [(44,44 ± 1,36) и (27,78 ± 1,31) % соответственно]. Трехлучевая конструкция графов (22,22 ± 0,43) % достоверно уступает однолучевой (13,64 ± 0,87) %, *p* < 0,001.

Динамика ветвления мозговых тяжей паховых лимфоузлов при облучении ПЭМП ПЧ сходна с таковой брыжеечных лимфоузлов (табл.), но имеет также свои особенности. У контрольных животных преобладают (так же как и в брыжеечных лимфоузлах) двух- и трехлучевые конструкции графов [(40,63 ± 1,23) и (28,13 ± 1,27) % соответственно]. Вместе с тем, в паховых лимфоузлах значительно представлены трехлучевые структуры графов, хотя их количество достоверно меньше двухлучевых (*p* < 0,05). Количественной особенностью графов контрольных животных паховых лимфоузлов, в отличие от брыжеечных, является наличие пятилучевых структур графов (6,24 ± 0,67) %. При экспозиции поля в течение 7 суток в паховых лимфоузлах появляется значительный процент однолучевых структур графов (16,67 ± 1,56) %, увеличивается процент двухлучевых конструкций [(40,63 ± 1,23) % в контроле и (50,06 ± 1,87) % после 7 дней эксперимента, *p* < 0,001]. Тенденцию к уменьшению имеют трехлучевые структуры (*p* > 0,05). Существенно снижается процент четырехлучевых конструкций, с (25,00 ± 0,43) % в контроле, до

(5,56 ± 0,77) % после 7 дней облучения полей (*p* < 0,001) и отсутствуют пятилучевые конструкции графов.

После 28 дней воздействия ПЭМП ПЧ наибольший процент степени вершин графов составляют двух- и трехлучевые структуры [(40,43 ± 1,27) и (36,17 ± 1,50) % соответственно], а также существенно увеличивается процент четырехлучевых структур, с (5,56 ± 0,77) % после 7 дней эксперимента, до (23,40 ± 0,42) % после 28 дней облучения (*p* < 0,001), хотя пятилучевые структуры практически отсутствуют.

Из приведенных данных следует, что степень ветвления мозговых тяжей паховых лимфоузлов при облучении ПЭМП ПЧ проявляет более заметную реакцию, чем в брыжеечных. Более выражена динамика рассматриваемых показателей после 7 дней облучения и особенно после 28 дней облучения, когда степень вершины графов (в отличие от брыжеечных лимфоузлов) практически приближается к контрольным значениям.

Для интерпретации полученных данных нами проанализированы результаты работы кафедры факультетской хирургии и кафедры анатомии человека ВолгГМУ [2], изучавших пространственную структуру печеночных лимфоузлов в условиях портально-лимфатической гипертензии, которая создавалась в лимфатическом узле сальникового отверстия (узел Клермона) у собак блокадой портального кровотока. При рассмотрении мозговых тяжей узла Клермона контрольных собак отмечалась преимущественная ориентировка продольных осей этих структур в направлении ворот лимфоузла. Спустя 2 недели после блокады портального кровотока мозговые тяжи, как протяженные структурные образования, утрачивали преимущественную ориентацию в направлении ворот. Было заметно уменьшение их «ветвистости». Значительная часть мозговых тяжей в плоскости гистологического препарата располагалась в виде отдельных островков. На основании изложенных данных можно предположить, что дезорганизующее влияние на пространственное расположение и, соответственно степень «ветвистости» мозговых тяжей при воздействии ПЭМП ПЧ связано с особенностями динамики содержимого дренажной системы лимфатическо-

го узла и, прежде всего, с лимфостазом и лимфатической гипертензией.

Поскольку уменьшение степени ветвления мозговых тяжей после 7 дней эксперимента более характерно для паховых лимфоузлов (резкое уменьшение 2-, 3- и 4-лучевых структур графов и увеличение однолучевых композиций), можно предположить, что лимфостаз и лимфогипертензия (обуславливающие пространственную дезорганизацию этих В-зависимых зон лимфоузла) более выражены при этом в лимфоузлах соматической группы. После 28 дней эксперимента цифровые данные, количественно иллюстрирующие графы мозговых тяжей, приближались к таковым в контрольной группе животных, причем более заметно в паховых лимфоузлах. Это свидетельствует о более мобильных адаптивных и восстановительных процессах в лимфоузлах соматической группы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на теории графов, как инновационном подходе в иммуноморфологии, мы получили новые научные данные, иллюстрирующие реакции лимфатических узлов на воздействие ПЭМП ПЧ. В условиях постоянно усиливающегося в настоящее время «электромагнитного смога» результаты приобретают особый смысл, позволяющий сделать вывод об иммуносупрессирующем воздействии рассматриваемого дестабилизирующего фактора антропогенной природы и о необходимости разработки мер, предотвращающих негативные последствия влияния этого фактора на биологические объекты. Подтверждением вывода служат новые данные о пространственной дезорганизации мозговых тяжей лимфоузлов, как В-зависимых зон и нарушениях лимфоциркуляции в них при облучении ПЭМП ПЧ. Получены конкретные цифровые результаты, обосновывающие сделанный вывод. В брыжеечных лимфоузлах контрольных животных преобладает двух-

трехлучевая композиция графов [(41,0 ± 1,26) и (25,1 ± 1,0) % соответственно]. В «критический» период облучения (после 7 суток) начинает преобладать одной и двухлучевая степень ветвления мозговых тяжей [(71,1 ± 0,85) и (27,0 ± 0,37) % соответственно]. Сходную направленность имеет степень ветвления мозговых тяжей паховых лимфоузлов, однако она более выражена, чем в брыжеечных. Динамика морфометрических данных, по мере облучения ПЭМП ПЧ экспериментальных животных в направлении к исходным величинам, может свидетельствовать о мобилизации адаптационных ресурсов в условиях отсутствия протекторных механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуцол А. А. Практическая морфометрия органов и тканей: Для врачей-патологоанатомов / А. А. Гуцол, Б. Ю. Кондратьев. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1988. — 136 с.
2. Краюшкин А. И., Ширяева Г. С., Бебуришвили А. Г., и др. // Экспериментальная лимфология. — М., 1991. — С. 32—35.
3. Краюшкина Н. Г., Александрова Л. И., Загребин В. Л. и др. // Вестник ВолгГМУ. — 2013. — № 3 (47). — С. 81—84.
4. Краюшкина Н. Г., Александрова Л. И., Загребин В. Л. и др. // Вестник ВолгГМУ. — 2013. — № 3 (43). — С. 104—107.
5. Мир математики: в 40 т. Т 11: Клауди Альсини. Карты метро и нейронные сети. Теория графов / Пер. с исп. — М.: Де Агостини, 2014. — 144 с.
6. Сапин М. Р., Юрина Н. А., Этиген Л. Е. Лимфатический узел (структура и функции). — М.: Медицина, 1978. — 272 с.

Контактная информация

Краюшкин Александр Иванович — д. м. н., профессор, зав. кафедрой анатомии человека, Волгоградский государственный медицинский университет, e-mail: krayushkin_ai@mail.ru