

Диффузионно-тензорная трактография в диагностике изменений центральных отделов зрительного анализатора при первичной глаукоме



В.П. Еричев



Л.А. Панюшкина



И.А. Новиков



В.С. Рещикова

ФГБНУ Научно-исследовательский институт глазных болезней
Россолимо, 11А,Б, 119021, Москва, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2017;14(4):328–334

Цель. Изучить возможность диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии в диагностике изменений центральных отделов зрительного анализатора при первичной глаукоме. **Пациенты и методы.** ДТ-МРТ была проведена у 16 пациентов: 12 — с диагнозом ПОУГ различных стадий и у 4 здоровых пациентов. Обследование головного мозга включало как стандартные режимы (T1, T2, MPR), так и специальные режимы (диффузионно-взвешенные изображения с построением карт диффузионно-тензорной трактографии, морфометрия серого вещества головного мозга). Основным параметром, получаемым при данном исследовании, является фракционная анизотропия (ФА) — величина, отражающая «направленную» организацию структур головного мозга и их целостность. **Результаты.** Были вычислены 2 параметра — фракционная анизотропия (ФА) и изменчивость фракционной анизотропии (Δ ФА) для правого и левого наружного колленчатого тела и зрительной лучистости в трех срезах (15–17). Уменьшение параметра ФА и увеличение Δ ФА расценивали как критерии нарушения целостности проводящих путей вследствие изменений аксонального транспорта. Выявлено достоверное снижение параметра фракционной анизотропии в нижнем срезе (ФА 14) у пациентов с глаукомой по сравнению с данными группы контроля (медианы значений 0,74 и 0,77, соответственно, $p < 0,01$ критерий Манна-Уитни). Продольная изменчивость ФА в среднем срезе (Δ ФА 13) левого полушария тесно коррелировала со стадией глаукомы и морфометрическими параметрами сетчатки и зрительного нерва. **Заключение.** Установлена статистически достоверная связь параметра продольной изменчивости ФА, определяемого с помощью ДТ-МРТ, с морфометрическими и функциональными параметрами сетчатки и зрительного нерва, определяемыми с помощью НРТ, ОНТ и САП, при глаукоме. Высокая корреляция параметра Δ ФА со стадией глаукомы свидетельствует о распространении нейродегенеративного процесса на зрительные центры при прогрессировании заболевания.

Ключевые слова: глаукома, магнитно-резонансная томография, зрительные центры, нейродегенерация.

Для цитирования: Еричев В.П., Панюшкина Л.А., Новиков И.А., Рещикова В.С. Диффузионно-тензорная трактография в диагностике изменений центральных отделов зрительного анализатора при первичной глаукоме. *Офтальмология.* 2017;14(4):328–334. DOI: 10.18008/1816-5095-2017-4-328-334

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах

Конфликт интересов отсутствует

Diffusion Tensor Tractography in the Diagnosis of Changes in the Central Departments of the Visual Analyzer in Primary Glaucoma

V.P. Eriчев, L.A. Panyushkina, I.A. Novikov, V.S. Reshchikova

Research Institute of Eye Diseases
11A,B, Rossolimo St., 119021 Moscow, Russia

В.П. Еричев, Л.А. Панюшкина, И.А. Новиков, В.С. Рещикова

Контактная информация: Еричев Валерий Петрович postmaster@glaucomajournal.ru

Диффузионно-тензорная трактография в диагностике изменений центральных отделов...

ABSTRACT**Ophthalmology in Russia. 2017;14(4):328-334**

Purpose. To investigate the potential of diffusion tensor MRT (DT-MRT) in diagnosing the changes of central departments of the visual analyzer in primary open angle glaucoma.

Patients and Methods. 16 patients underwent DT-MRT: 12 patients had a prior diagnosis of different stages of glaucoma and 4 acted as controls. Brain examination included both standard (T1, T2, MPR) and special modes (diffusion-weighted imaging with DT tractographic mapping, grey matter morphometry). The main parameter obtained during this exam is fractional anisotropy, which represents brain structures directional organization and integrity. **Results.** Two main parameters — fractional anisotropy (FA) and fractional anisotropy variability (Δ FA) — were obtained for left and right lateral geniculate body and optic radiation in 3 cross-sections (15–17). We considered FA decrease and Δ FA increase to be the sign of visual pathways integrity loss due to axonal transport defects. Glaucoma patients showed a statistically significant FA decrease in the lower section (FA 14) compared to the control patients (median values 0,74 and 0,77 correspondingly, $p < 0,01$, Mann-Whitney test). FA longitudinal variability of the left hemisphere in the middle section (Δ FA 13) correlated with glaucoma stage as well as retina and optic nerve head morphometric parameters.

Conclusion. FA longitudinal variability parameter, obtained with DT-MRT, showed a statistically significant correlation with morphometric and functional of the retina and optic nerve head evaluated with HRT, OCT and SAP perimetry. A high correlation of Δ FA with glaucoma stage indicates the neurodegenerative process spread to the visual centers in the course of disease progression.

Keywords: glaucoma, magnetic resonance imaging, visual center, neurodegeneration

For citation: Erichev V.P., Panyushkina L.A., Novikov I.A., Reshchikova V.S. Diffusion Tensor Tractography in the Diagnosis of Changes in the Central Departments of the Visual Analyzer in Primary Glaucoma. *Ophthalmology in Russia*. 2017;14(4):328-334. DOI: 10.18008/1816-5095-2017-4-328-334

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned

There is no conflict of interests

Распространение нейродегенеративного процесса на структуры ЦНС при глаукоме подтверждается результатами магнитно-резонансной томографии (МРТ) головного мозга [1]. В экспериментальном исследовании на крысах методом протонной магнитно-резонансной томографии было показано снижение уровня холина и увеличение концентрации глутамата в зрительной коре на стороне, противоположной пораженному глаукомой глазу [2]. В ряде работ приводятся данные об уменьшении диаметра ретробульбарной части зрительного нерва у пациентов с глаукомой [3,4]. В 2009 году была опубликована работа N. Gupta, в которой было доказано наличие атрофии НКТ у пациентов с глаукомой [5]. Автор исследовала высоту НКТ по данным МРТ у 10 пациентов с ГОН и определила достоверную разницу этого параметра с данными группы контроля. Christine C. Boucard в 2009 году описал уменьшение плотности серого вещества мозга в затылочной области у пациентов с глаукомой, что коррелировало с результатами компьютерной периметрии [6].

Для оценки состояния ретробульбарной части зрительного нерва, зрительной лучистости, наружного коленчатого тела и зрительной коры у пациентов с глаукомой в последние годы распространение получила методика диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии (ДТ-МРТ).

Основными параметрами, получаемыми при ДТ-МРТ, являются средняя диффузионная способность (англ. mean diffusivity, MD), фракционная анизотропия (англ. fractional anisotropy, FA), аксиальная (англ. axial diffusivity, AD) и радиальная диффузионность (англ. radial diffusivity, RD).

По данным литературы при проведении ДТ-МРТ у пациентов с глаукомой по сравнению с группой контроля отмечено уменьшение параметра FA и увеличение — MD и RD в области зрительного нерва, НКТ и зритель-

ной лучистости [7–11]. Следует отметить, что в работе Garaci была установлена обратная корреляционная зависимость параметра между FA и стадией глаукомы [9]. В другой статье Michelson описывает различия в параметрах толщины слоя нервных волокон зрительного нерва (по данным ОКТ) и параметрах ДТ-МРТ в двух группах пациентов с глаукомой среднего ($44,8 \pm 9,6$) и пожилого возраста ($62,7 \pm 9,8$) [10]. Множественный регрессионный анализ показал наличие достоверной корреляции между параметром толщины перипапиллярных нервных волокон и параметрами FA, MD и RD во второй возрастной группе. Таким образом, изменение индексов ДТ-МРТ у пациентов с глаукомой может свидетельствовать об аксональной дегенерации на уровне ЦНС и атрофии проводящих путей зрительного анализатора.

Исходя из этого, нами была сформулирована цель исследования — используя метод ДТ-МРТ, провести прижизненную оценку распространения нейродегенеративного процесса на структуры центрального отдела зрительного анализатора у пациентов с ПОУГ.

Пациенты и методы. ДТ-МРТ была проведена у 16 пациентов: 12 — с диагнозом ПОУГ различных стадий и у 4 здоровых лиц. Клинико-демографическая характеристика пациентов представлена в Табл. 1. ДТ-МРТ выполняли в ФГБНУ «Научный центр неврологии» научным сотрудником отделения лучевой диагностики, к.м.н. Брюховым В.В. Исследование проводили с помощью магнитно-резонансного томографа Magnetom Avanto, Siemens (Германия) с величиной индукции магнитного поля 1.5 Тл.

Метод ДТ-МРТ основан на измерении величины и направления диффузии молекул воды в веществе мозга. Основным параметром, получаемым при данном исследовании, является фракционная анизотропия (ФА) — величина, отражающая «направленную» организацию структур головного мозга и их целостность, которая

принимает значения от 0 (изотропная диффузия) до 1 (полностью анизотропная диффузия). При патологических процессах в белом веществе головного мозга наблюдается снижение ФА. По данным литературы снижение ФА служит маркером аксональной дегенерации при нейродегенеративных процессах [7–11, 14].

Таблица 1. Клинико-демографическая характеристика исследуемых пациентов при помощи ДТ-МРТ

Table 1. Clinical and demographic characteristics of the patients with DT-MRT

Пациент Patient	Пол Gender	Возраст Age	Стадия ПОУГ Stage of glaucoma	
			OD	OS
1	м	68	III	II
2	ж	72	-	-
3	м	78	III	III
4	м	77	III	II
5	ж	74	III	II
6	м	69	I	III
7	м	71	II	I
8	ж	77	III	I
9	ж	76	-	-
10	м	65	III	I
11	м	76	-	I
12	ж	70	III	IV
13	м	78	III	IV
14	ж	69	-	-
15	м	61	-	III
16	ж	65	-	-

Все стандартные исследования проводили в аксиальной и сагиттальной плоскости с толщиной срезов 5 мм и межсрезовым интервалом 1,5 мм. Обследование головного мозга включало в себя как стандартные режимы (T1, T2, MPR), так и специальные режимы (диффузионно-взвешенные изображения с построением карт диффузионно-тензорной трактографии; морфометрия серого вещества головного мозга). Полученные данные перенесли на рабочую станцию Syngo Siemens, где на сгенерированных картах фракционной анизотропии у каждого больного вручную были выделены симметричные области интереса, соответствующие расположению НКТ и зрительной лучистости (Рис. 1).

Несмотря на значительное количество работ в области трактографии и зонирования структур головного мозга, использующих в своей основе вычисление параметров ФА [7,9, 10,14], для исследования объектов с малыми сечениями не существует метода, позволяющего корректно описывать их состояние с позиции ФА. Основное ограничение для изучения объектов такого рода связано с соотношением физических размеров исследуемой структуры и разрешения, с которым определяется тензорная составляющая параметров, изучаемых методами МРТ.

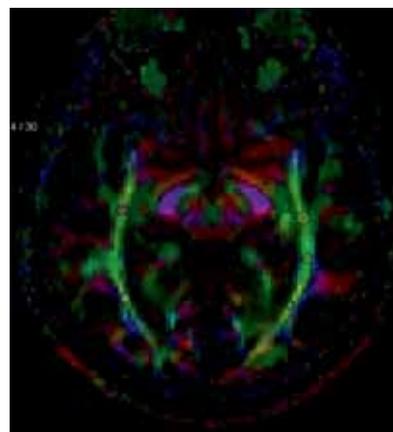


Рис. 1. Выделение области интереса в проекции НКТ и зрительной лучистости на карте фракционной анизотропии (ДТ-МРТ)

Fig. 1. The selection of the interest region in the lateral geniculate bodies projection and the optic radiation on the fractional anisotropy map (DT-MRT)

Объемная единица, описывающая состояние ФА (так наз., воксель), оказывается меньшей или соизмеримой с поперечным сечением некоторых структур головного мозга. К таким структурам можно отнести и наружное коленчатое тело, и зрительную лучистость, которые являются объектами настоящего исследования. Незначительный размер поперечного сечения изучаемого объекта, выраженный в вокселях, практически исключает возможность «ручного» определения его границ для статистического исследования ФА в его пределах. При попытке искусственного определения ограничений «тонких» контрастных объектов возникающие ошибки в накоплении данных будут заведомо превосходить полезный сигнал объекта, что легко проиллюстрировать на примере изучения модели (Рис. 2).

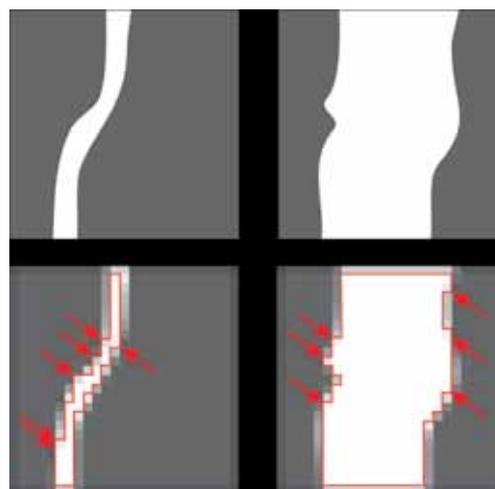


Рис. 2. Модель, иллюстрирующая влияние площади на погрешность оценки ФА. Стрелками показаны воксели, характеризующие смешение ФА структуры и «фона», но ошибочно включенные в статистическую оценку

Fig. 2. Model illustrating the influence of area on the estimation error of FA. Cursors indicate voxels, characterizing mixed FA structures and “background”, but mistakenly included in the statistical evaluation

На схеме приведено два объекта с разным сечением, объекты имеют заданную одинаковую ФА (n), в два раза отличающуюся от ФА «фона» ($0,5*n$). Ниже приведены эти же объекты в разрешении, соответствующие вокселям. Если попытаться вручную очертить объект по границе «ярких и темных» вокселей, то в статистическую выборку попадет некоторое количество данных, характеризующих не только истинную ФА модельного объекта, но и ФА «фона». Легко убедиться, что для объекта малого сечения влияние на оцениваемое среднее значение ФА условных вокселей, частично характеризующих «фон», будет существенно больше вследствие меньшей площади, занятой «чистыми» вокселями. Оцененное с учетом такой погрешности значение ФА для тонкого объекта составит $0,83*n$, тогда как для толстого — близкое к истинному $0,99*n$.

Тем не менее, очевидно, что воксели, выстроенные вдоль линии максимальных значений ФА, отражают истинное состояние ФА как тонкого, так и толстого объектов. Исходя из этого, было предложено опираться при сборе данных на максимальные значения в осевой части анализируемых линейных структур (Рис.3).

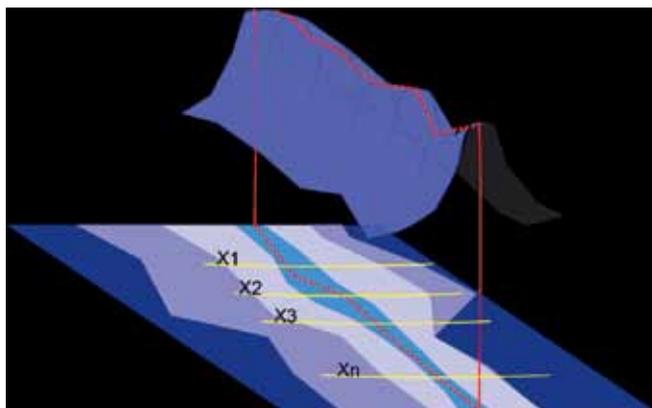


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая принцип получения данных методом трассировки «хребта»

Fig. 3. A diagram illustrating the principle of obtaining data by a tract "the ridge"

Алгоритм реализован в программе «Анализатор фракционной анизотропии», работающей с пакетными данными в формате DICOM. Программа разработана старшим научным сотрудником ФГБНУ «НИИГБ» Новиковым И. А. Программа автоматически по характеру вокселей в аксиальной проекции распознает зону, имеющую преимущественную дорсовентральную направленность.

Результаты и обсуждение. При использовании разработанной нами программы по обработке получаемых данных были вычислены 2 параметра — фракционная анизотропия (ФА) и изменчивость фракционной анизотропии (Δ ФА) для правого и левого наружного коленчатого тела и зрительной лучистости в трех срезах (15–17). Уменьшение параметра ФА и увеличение Δ ФА расценивали как критерии нарушения целостности проводящих

путей вследствие изменений аксонального транспорта.

При статистической обработке полученных данных было выявлено достоверное снижение параметра фракционной анизотропии в нижнем срезе (ФА 14) у пациентов с глаукомой по сравнению с группой контроля (медианы значений 0,74 и 0,77, соответственно, $p < 0,01$ критерий Манна-Уитни) (рис. 4).

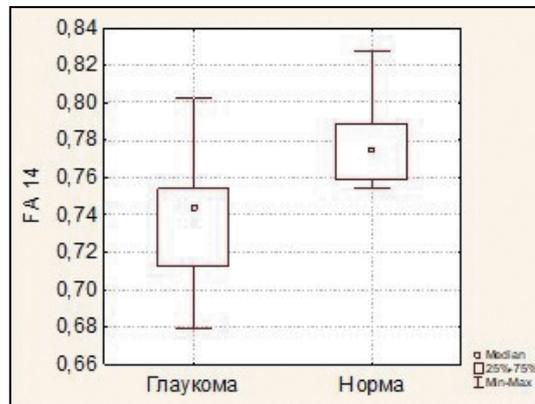


Рис. 4. Сравнение параметра фракционной анизотропии НКТ и зрительной лучистости (нижний срез) в группе с ПОУГ и группе контроля

Fig. 4. A comparison of the fractional anisotropy lateral geniculate bodies parameter and the optic radiation (lower section) in the group with glaucoma and the control group

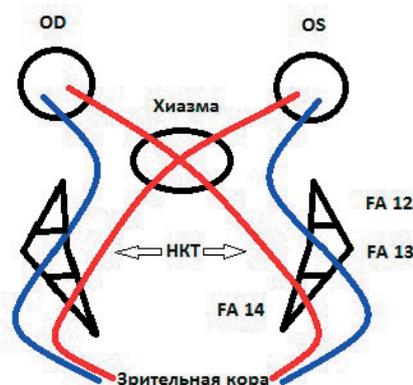


Рис. 5. Схематическое изображение топографии перекрещенных и неперекрещенных волокон зрительного тракта в наружном коленчатом теле и зрительной лучистости (аксиальный срез)

Fig. 5. Diagrammatic representation of topography the crossed and non-crossed fibers of the optic tract to the external geniculate body and optic radiation (axial slice)

Был проведен попарный корреляционный анализ во всех срезах отдельно для каждого глаза. В качестве весового параметра, показывающего среднюю значимость связей, были взяты средние абсолютные значения корреляции по Пирсону для структур мозга со всеми морфометрическими параметрами. При сопоставлении результатов ДТ-МРТ и данных офтальмологического обследования (статическая периметрия, НРТ, ОКТ) нами была выявлена следующая закономерность: ФА и Δ ФА, измеренные в среднем срезе каждого из полушарий (ФА 13 и

ДФА 13), коррелировали с показателями ипсилатерального глаза; ФА и ДФА, измеренные в нижнем срезе каждого из полушарий (ФА 14 и ДФА 14), коррелировали с показателями контрлатерального глаза [16,17]. Обнаруженные закономерности позволили нам говорить о топографии перекрещенных и неперекрещенных волокон зрительного тракта в НКТ и зрительной лучистости по результатам ДТ-МРТ и ожидать соответствующей взаимосвязи морфофункциональных и морфометрических параметров сетчатки и зрительного нерва с параметрами ДТ-МРТ (Рис. 5).

Для установления возможной зависимости функциональных изменений при глаукоме и изменений, выявленных при ДТ-МРТ, была выполнена статическая автоматическая периметрия (САП) у пациентов с верифицированным диагнозом первичной глаукомы (Табл. 2).

Таблица 2. Результаты компьютерной периметрии у пациентов с глаукомой и группы контроля

Table 2. The results of visual field analyser in patients with glaucoma and control groups

Параметр САП SAP	Статистический показатель Statistical index	Группа контроля Control group	ПОУГ Glaucoma
Суммарная светочувствительность ЦПЗ (дБ) Sensitivity central visual field (dB)	Квартиль 25 quartile 25	2046	1316
	Медиана median	2135	1989*
	Квартиль 75 quartile 75	2201	2133
Суммарная светочувствительность ППЗ (дБ) Sensitivity peripheral visual field (dB)	Квартиль 25 quartile 25	1109	785
	Медиана	1199	1046*
	Квартиль 75 quartile 75	1227	1190
MD (дБ) MD (dB)	Квартиль 25 quartile 25	-1,08	-10,58
	Медиана	0,76	-1,69**
	Квартиль 75 quartile 75	2,13	-0,48
PSD (дБ) MD (dB)	Квартиль 25 quartile 25	1,13	1,99
	Медиана median	1,93	3,6**
	Квартиль 75 quartile 75	2,71	11,24

* — $p < 0,05$; ** — $p < 0,001$ — достоверность отличия параметра от группы нормы (критерий Манна-Уитни)

С этой же целью была проведена оптическая когерентная томография сетчатки у больных глаукомой, результаты которой выявили наличие корреляционной зависимости между стадиями глаукомы и данными ДТ-МРТ.

В группе пациентов с глаукомой при исследовании с помощью ОКТ мы наблюдали как клинически, так и статистически значимые различия морфометрических параметров сетчатки и зрительного нерва относительно группы контроля. У всех пациентов было выявлено истончение сетчатки в пара- и перифовеолярной зоне за счет ее внутренних слоев, а также истончение комплекса ГКС и СНВС и увеличение индексов объема фокальных и глобальных потерь ($p < 0,001$; критерий Манна-Уитни). Все эти параметры высоко коррелировали со стадией глаукомы (Рис. 6, 7, 8).

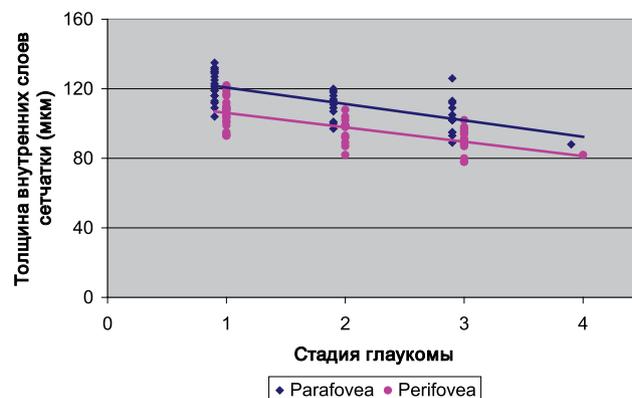


Рис. 6. Корреляционная связь толщины внутренних слоев сетчатки в парафовеолярной и перифовеолярной области со стадиями глаукомы (значимая корреляция: $r = -0,69$ и $r = -0,7$ соответственно; $p < 0,05$).

Fig. 6. Correlation of the retina inner layers thickness in parafovea and perifovea areas with stages of glaucoma (significant correlation: $r = -0,69$ and $r = -0,7$, respectively; $p < 0,05$).

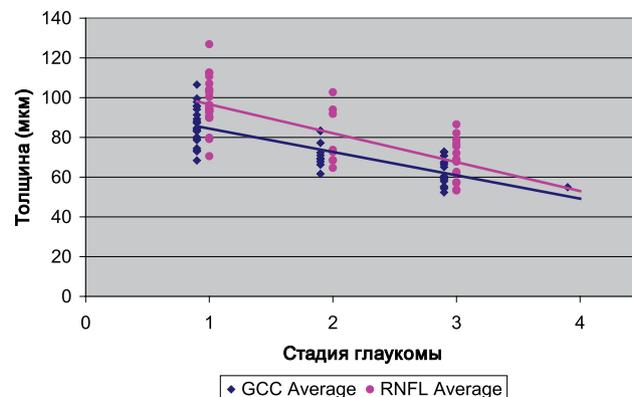


Рис. 7. Корреляционная связь средней толщины комплекса ГКС и средней толщины СНВС со стадиями глаукомы (значимая сильная корреляция: $r = -0,84$ и $r = -0,7$, соответственно; $p < 0,05$).

Fig. 7. Correlation of the complex GCC average thickness and average thickness RNFL with stages of glaucoma (significant strong correlation: $r = -0,84$ and $r = -0,77$, respectively; $p < 0,05$).

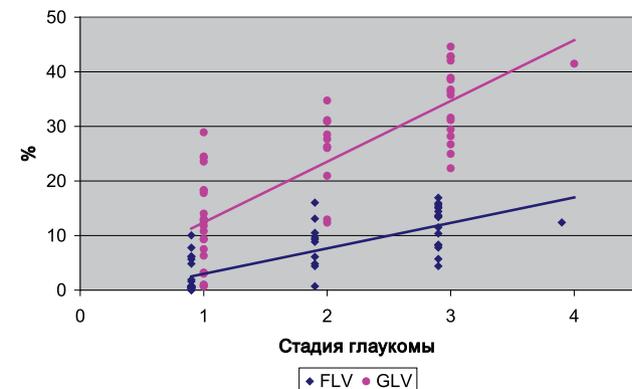


Рис. 8. Корреляционная связь индексов объема фокальных (FLV) и глобальных (GLV) потерь со стадиями глаукомы (значимая сильная корреляция: $r = 0,77$ и $r = 0,81$ соответственно; $p < 0,05$).

Fig. 8. Correlation indexes of the focal volume (FLV) and global (GLV) loss from glaucoma stages (significant strong correlation: $r = 0,77$ and $r = 0,81$, respectively; $p < 0,05$).

Коэффициенты корреляции рассчитывали для Δ ФА 13 и Δ ФА 14, измеренных в НКТ и зрительной лучистости каждого полушария, стереопараметров НРТ и ОКТ, а также для индексов компьютерной периметрии MD и PSD для каждого глаза. Результаты представлены в Табл. 3 и Табл. 4.

Таблица 3. Корреляционные связи морфометрических и морфофункциональных параметров правого глаза с результатами ДТ-МРТ у пациентов с глаукомой

Table 3. Correlation of morphometric and morphofunctional parameters of the right eye with the results of DT-MRT in patients with glaucoma

ОД OD	Левое полушарие the left hemisphere		Правое полушарие the right hemisphere	
	Δ ФА 13/ Δ ФА 13	Δ ФА 14/ Δ ФА 14	Δ ФА 13/ Δ ФА 13	Δ ФА 14/ Δ ФА 14
Стадия ПОУГ/Stage of glaucoma	0,09	0,7*	0,03	0,29
Площадь НРП/Rim Area	0,01	-0,63*	0,21	-0,14
Объем НРП /Rim volume	0,05	-0,57	0,16	-0,21
Толщина СНВС /Thickness RNFL	0,11	-0,59	0,16	-0,19
GCC Average	0,07	-0,71*	0,33	-0,28
FLV	-0,05	0,53	-0,36	0,12
GLV	-0,08	0,65*	-0,36	0,26
RNFL Average	0,01	-0,63*	0,26	-0,16
MD	-0,01	-0,47	0,17	0,07
PSD	-0,26	0,62*	-0,26	0,3

* — $p < 0,05$ — значимая корреляция, * — $p < 0,05$ — significant correlation

Таблица 4. Корреляционные связи морфометрических и морфофункциональных параметров левого глаза с результатами ДТ-МРТ у пациентов с глаукомой

Table 4. Correlation of morphometric and morphofunctional parameters of the left eye with the results of DT-MRT in patients with glaucoma

ОС OS	Левое полушарие The left hemisphere		Правое полушарие The right hemisphere	
	Δ ФА 13/ Δ ФА 13	Δ ФА 14/ Δ ФА 14	Δ ФА 13/ Δ ФА 13	Δ ФА 14/ Δ ФА 14
Стадия ПОУГ/Stage of glaucoma	0,72**	0,32	0,16	0,52
Площадь НРП/Rim Area	-0,15	-0,07	0,42	-0,37
Объем НРП/Rim volume	0,17	-0,16	0,3	-0,47
Толщина СНВС/Thickness RNFL	-0,11	-0,38	0,07	-0,54
GCC Average	-0,81**	-0,39	-0,04	-0,62*
FLV	0,81**	0,16	0,02	0,58*
GLV	0,81**	0,37	0,06	0,63*
RNFL Average	-0,79**	-0,31	-0,06	-0,62*
MD	-0,85**	-0,06	-0,14	-0,49
PSD	0,88**	0,09	0,21	0,48

* — $p < 0,05$ — значимая корреляция, ** — $p < 0,01$ — высокая значимая корреляция.

Как видно из данных, приведенных в Таблицах 2 и 3, наблюдается сильная значимая корреляционная связь продольной изменчивости ФА в нижнем срезе (Δ ФА 14) левого полушария и стадии глаукомы и средней толщины комплекса ГКС правого глаза, а также средняя значимая корреляционная связь Δ ФА 14 и площади НРП (по данным НРТ), толщины слоя перипапиллярных нервных волокон (по данным ОКТ), и индекса MD (по данным САП), определяемых на правом глазу ($p < 0,05$).

Продольная изменчивость ФА в среднем срезе (Δ ФА 13) левого полушария тесно коррелировала со стадией

глаукомы и морфометрическими параметрами сетчатки и зрительного нерва, определяемыми с помощью ОКТ (средняя толщина комплекса ГКС, индексы фокальных и глобальных потерь ГКС, толщина перипапиллярных нервных волокон), а также с индексами MD и PSD (по данным САП) левого глаза ($p < 0,01$). Кроме того, прослеживалась средняя значимая корреляция продольной изменчивости ФА в нижнем срезе правого полушария (Δ ФА 14) и толщины комплекса ГКС, индексов фокальных и глобальных потерь и толщины перипапиллярных нервных волокон (по данным ОКТ) левого глаза ($p < 0,05$).

Таким образом, можно говорить о статистически достоверной связи параметра продольной изменчивости ФА, полученного с помощью ДТ-МРТ, с морфометрическими и функциональными параметрами сетчатки и зрительного нерва, определяемыми с помощью НРТ, ОКТ и САП, при глаукоме. Высокая корреляция параметра Δ ФА со стадией глаукомы свидетельствует о распро-

странении нейродегенеративного процесса на зрительные центры при прогрессировании заболевания.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Еричев В.П. — концепция и дизайн исследования, редакция статьи
Панюшкина Л.А. — сбор и обработка данных, написание статьи
Новиков И.А. — статистическая обработка, написание статьи
Решикова В.С. — сбор и обработка материала.

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

- Dai H., Mu K.T., Qi J.P., Wang C.Y., Zhu W.Z., Xia L.M., Chen Z.Q., Zhang H., Ai F., Morelli J.N. Assessment of lateral geniculate nucleus atrophy with 3 T MR imaging and correlation with clinical stage of glaucoma. *American Journal of Neuroradiology*. 2011;32(7):1347–1353. DOI: 10.3174/ajnr.A2486
- Chan K.C., So K.F., Wu E.X. Proton magnetic spectroscopy revealed choline reduction in the visual cortex in an experimental model of chronic glaucoma. *Experimental Eye Research*. 2009;88(1):65–70. DOI: 10.1016/j.exer.2008.10.002.
- Kashiwagi K., Okubo T., Tsukahara S. Association of magnetic resonance imaging of anterior optic pathway with glaucomatous visual field damage and optic disc cupping. *Journal of Glaucoma*. 2004;13(3):189–95. DOI: 10.1097/00061198-200406000-00003.
- Lagreze W.A., Gaggi M., Weigel M., Schulte-Mönting J., Bühler A., Bach M., Munk R.D., Bley T.A. Retrobulbar optic nerve diameter measured by high-speed magnetic resonance imaging as a biomarker for axonal loss in glaucomatous optic atrophy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2009;50(9):4223–4228. DOI: 10.1167/iovs.08-2683.
- Gupta N., Greenberg G., Noel de Tilly L., Gray B., Polemidiotis M., Yucel Y.H. Atrophy of the lateral geniculate nucleus in human glaucoma by Magnetic Resonance Imaging. *British Journal of Ophthalmology*. 2009;93(1):56–60. DOI: 10.1136/bjo.2008.138172.
- Christine C. Boucard, Aditya T. Hernowo, R. Paul Maguire, Nomdo M. Jansonius, Jos B. T. M. Roerdink, Johanna M. M. Hooymans, Frans W. Cornelissen. Changes in cortical grey matter density associated with long-standing retinal visual field defects. *Brain*. 2009;132(7):1898–1906. DOI: 10.1093/brain/awp119.
- El-Rafei A., Engelhorn T., Warntges S., Dorfler A., Hornegger J., Michelson G. A framework for voxel-based morphometric analysis of the optic radiation using diffusion tensor imaging in glaucoma. *Magnetic Resonance Imaging*. 2011;29(8):1076–1087. DOI: 10.1016/j.mri.2011.02.034.
- Engelhorn T., Michelson G., Waerntges S., Otto M., El-Rafei A., Struffert T., Doerfler A. Changes of radial diffusivity and fractional anisotropy in the optic nerve and optic radiation of glaucoma patients. *The Scientific World Journal* 2012;ID 849632. DOI: 10.1100/2012/849632.
- Garaci F.G., Bolacchi F., Cerulli A., Melis M., Spanò A., Cedrone C., Floris R., Simonetti G., Nucci C. Optic nerve and optic radiation neurodegeneration in patients with glaucoma: in vivo analysis with 3-T diffusion-tensor MR imaging. *Radiology*. 2009;252(2):496–501. DOI: 10.1148/radiol.2522081240.
- Michelson G., Engelhorn T., Warntges S., El Rafei A., Hornegger J., Doerfler A. DTI parameters of axonal integrity and demyelination of the optic radiation correlate with glaucoma indices. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. 2012;251(1):243–253. DOI: 10.1007/s00417-011-1887-2.
- Wang M.Y., Wu K., Xu J.M., Dai J., Qin W., Liu J., Tian J., Shi D. Quantitative 3-T diffusion tensor imaging in detecting optic nerve degeneration in patients with glaucoma: association with retinal nerve fiber layer thickness and clinical severity. *Neuroradiology*. 2013;55(4):493–498. DOI: 10.1007/s00234-013-1133-1.
- Еричев В.П., Панюшкина Л.А., Фомин А.В. Оптическая когерентная томография сетчатки и зрительного нерва в диагностике болезни Альцгеймера. *Национальный журнал глаукома*. 2013;1:5–10. [Erichew V.P., Panyushkina L.A., Fomin A.V. Optical coherence tomography of the retina and the optic nerve in the diagnosis of Alzheimer's disease. *Natsional'nyi zhurnal glaucoma*. 2013;1:5–10. (in Russ.)].
- Еричев В.П., Туманов В.П., Панюшкина Л.А., Федоров А.А. Сравнительный анализ морфологических изменений в зрительных центрах при первичной глаукоме и болезни Альцгеймера. *Национальный журнал глаукома*. 2014;13(3):5–13. [Erichew V.P., Tumanov V.P., Panyushkina L.A., Fedorov A.A. Comparative analysis of morphological changes in the optic centers in patients with glaucoma and Alzheimer's disease. *Natsional'nyi zhurnal glaucoma*. 2014;13(3):5–13 (in Russ.)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФГБНУ Научно-исследовательский институт глазных болезней
Еричев Валерий Петрович
доктор медицинских наук, профессор, руководитель отдела глаукомы
Россолимо, 11А,Б, 119021, Москва, Российская Федерация

ФГБНУ Научно-исследовательский институт глазных болезней
Панюшкина Людмила Александровна
кандидат медицинских наук, младший научный сотрудник отдела глаукомы
Россолимо, 11А,Б, 119021, Москва, Российская Федерация

ФГБНУ Научно-исследовательский институт глазных болезней
Новиков Иван Александрович
старший научный сотрудник лаборатории фундаментальных методов исследований в офтальмологии
Россолимо, 11А,Б, 119021, Москва, Российская Федерация

ФГБНУ Научно-исследовательский институт глазных болезней
Решикова Валерия Сергеевна
младший научный сотрудник отдела глаукомы
Россолимо, 11А,Б, 119021, Москва, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Research Institute of Eye Diseases
Erichew Valerij P.
MD, professor, Head of Glaucoma Department
11A,B, Rossolimo St.,119021 Moscow, Russia

Research Institute of Eye Diseases
Panyushkina Ludmila A.
PhD, Research Assistant of Glaucoma Department
11A,B, Rossolimo St.,119021 Moscow, Russia

Research Institute of Eye Diseases
I.A. Novikov
Senior Research Officer of the laboratory of fundamental research methods in ophthalmology
11A,B, Rossolimo St.,119021 Moscow, Russia

Research Institute of Eye Diseases
Reshchikova Valerija S.
Research Assistant of Glaucoma Department
11A,B, Rossolimo St.,119021 Moscow, Russia