

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЦЕНАРИЕВ ИМПУЛЬСНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЯДЕРНОЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА

*И. М. Енягина^{а,б,в,1}, А. Н. Поляков^а, С. И. Карташов^а,
В. Л. Ушаков^в, Е. В. Милев^в, А. И. Баранова^в*

^а Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^в Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

¹ Институт перспективных исследований мозга
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Описываются работы, направленные на определение степени влияния изменения параметров сценария радиочастотных импульсных последовательностей магнитно-резонансного (МР) томографа на модель головного мозга человека, получаемую вследствие математической обработки выходных экспериментальных данных ядерной магнитно-резонансной томографии. Разработан алгоритм сравнительного анализа моделей, полученных для одного испытуемого в разных режимах МР-томографа. Программная реализация алгоритма выполнена как сервис системы «Нейровизуализация» ИАП «Цифровая лаборатория» НИЦ «Курчатовский институт».

We describe the work aimed at determining the degree of influence of changing the parameters of the scenario of radio frequency pulse sequences of a magnetic resonance (MR) tomograph on a 3D model of the human brain obtained as a result of mathematical processing of the output experimental data of nuclear magnetic resonance imaging. An algorithm for comparative analysis of 3D models obtained for one subject in different modes of the MR tomograph has been developed. The software implementation of the algorithm was made as a service of the “Neuroimaging” system of the IAP “Digital Laboratory” of the National Research Centre “Kurchatov Institute”.

PACS: 42.30.Wb; 87.57.Q–

ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологии эксперимента ядерной магнитно-резонансной томографии увеличивается объем выходных экспериментальных МРТ-данных. В частности, увеличение мощности постоянного сверхпроводящего магнита, являющегося основой

¹E-mail: irina_enyagina@mail.ru

МР-томографа, позволяет уменьшить размерность единицы измерения данных. Если еще несколько лет назад стандартный размер одного воксела составлял 3 мм^3 , то сейчас это, как правило, 1 мм^3 . Как следствие, появляется возможность построения по результатам анализа экспериментальных данных все более точной математической модели головного мозга [1, 2]. Полученная модель используется затем как самостоятельный объект исследования или же в качестве основы для наложения результатов экспериментов другого типа (фМРТ, ЭЭГ, ПЭТ и др.) в научно-исследовательской деятельности и в медицинской практике.

Повышение точности параметров модели позволяет решать более широкий круг задач. В том числе появляются новые возможности для задач диагностики опухолевых процессов и планирования протонной терапии, раннего выявления нейрокогнитивных отклонений на основе оценки объемов основных анатомических структур головного мозга испытуемого и др. Повышаются требования к достоверности результатов, соответствию реальных параметров головного мозга испытуемого параметрам модели, полученной в результате обработки экспериментальных МРТ-данных. При этом любое изменение исходных экспериментальных МРТ-данных повлечет за собой изменение математической модели. Отсюда возникает вопрос: приводит ли смена сценария разночастотных (РЧ) импульсных последовательностей МР-томографа к изменению исходных экспериментальных МРТ-данных? И если да, то какова степень и характер таких изменений? Таким образом, возникает задача определения степени влияния смены режима МР-томографа на выходные экспериментальные МРТ-данные, в рамках решения которой были выполнены работы, описываемые в данной статье.

Было выбрано два сценария РЧ импульсных последовательностей МР-сканера [3]. Затем для экспериментальной группы испытуемых были проведены парные МРТ-сканирования головного мозга (по два сканирования в выбранных режимах для каждого испытуемого). Полученные данные были обработаны в системе «Нейровизуализация» ИАП «Цифровая лаборатория» НИЦ КИ [4, 5] с использованием специализированного программного пакета FreeSurfer [7]. Таким образом, для каждого испытуемого из экспериментальной группы было получено по две математические модели головного мозга. Для выполнения последующего сравнительного анализа полученных моделей был разработан алгоритм, позволяющий выполнять следующие вычисления: 1) попарное сравнение двух моделей, полученных для одного испытуемого, с целью определения степени влияния смены режима МР-томографа на результат сканирования, 2) групповой анализ, с целью выявления общих закономерностей колебаний при смене режима МР-томографа. Программная реализация алгоритма выполнена в виде сервиса системы «Нейровизуализация» ИАП «Цифровая лаборатория».

Как результат, подтверждена гипотеза о прямом влиянии изменения сценария РЧ импульсных последовательностей МР-томографа на выходные экспериментальные данные МР-сканирования головного мозга человека, а также описан характер изменений основных анатомических параметров модели головного мозга при смене сценария.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Формирование группы испытуемых. В целях выполнения данного исследования была сформирована экспериментальная группа из 15 здоровых (без хронических заболеваний) испытуемых, мужчин и женщин, в возрасте 18–35 лет. От каждого

испытуемого получено письменное согласие на проведение МР-сканирований. Для проведения экспериментов использовался МР-томограф Siemens Verio Magnetom 3T Ресурсного центра «Когнимед» НИЦ «Курчатовский институт».

Генерация экспериментальных МРТ-данных. Процесс формирования исходных экспериментальных МРТ-данных можно представить следующим образом:

1. Перед началом эксперимента формируется сценарий РЧ импульсных последовательностей, определяющий порядок функционирования во время проведения МР-сканирования трех наборов градиентных катушек и радиочастотной катушки МР-томографа. Сценарий РЧ импульсных последовательностей также называют режимом МР-томографа.

2. Результатом исполнения утвержденного сценария РЧ импульсных последовательностей является возбуждение ядер атомов водорода (протонов) организма испытуемого в заданный момент времени, в заданной локации.

3. Далее следует стадия релаксации, возвращения системы в равновесное состояние, в результате чего протоны атомов водорода организма испытуемого испускают ответный сигнал, считываемый приемной РЧ-катушкой МР-сканера.

4. Полученный ответный сигнал затем путем математической обработки (с использованием преобразования Фурье) переводится в числовой формат, записываемый в виде каталога формата DICOM, количество файлов которого соответствует количеству выполненных виртуальных срезов во время МР-сканирования (один файл содержит информацию об одном двумерном срезе).

Таким образом, на первом шаге необходимо было решить вопрос выбора двух сценариев РЧ импульсных последовательностей МР-томографа для выполнения парных МР-сканирований и последующего сравнительного анализа моделей, полученных для каждого испытуемого в каждом из этих режимов.

Выбор сценариев РЧ импульсных последовательностей МР-томографа. Простейший сценарий импульсных последовательностей представлен на рис. 1 [3]. Базовые параметры сценария РЧ импульсных последовательностей представлены в табл. 1. Изменение базовых параметров МРТ-эксперимента влечет за собой изменение получаемого ответного сигнала.

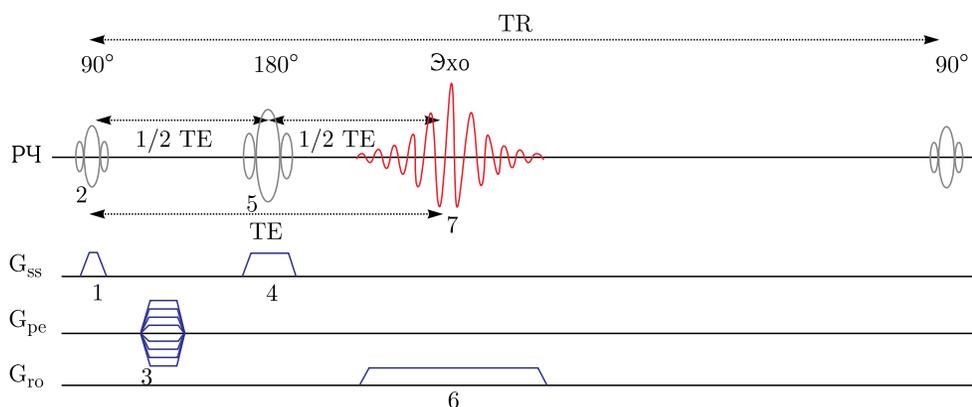


Рис. 1. Простейший сценарий импульсных последовательностей [1]

Таблица 1. Базовые параметры сценария РЧ импульсных последовательностей

Repetition time (TR)	Время между двумя РЧ импульсами
Echo time (TE)	Время между импульсом возбуждения и эхо
Flip angle (FA)	Определяет, насколько повернут вектор суммарной намагниченности по направлению к плоскости X-Y
Inversion time (TI)	Время между 180 и 90° импульсами возбуждения
Number of acquisitions (NA)	Определяет количество повторений полного сканирования
Matrix (MX)	Определяет пространственное разрешение МРТ-изображения
Field of view (FOV)	Определяет размер исследуемой области пациента
Image rows (IR)	Количество столбцов матрицы кодирования сигнала
Image columns (IC)	Количество строк матрицы кодирования сигнала
Slice thickness (ST)	Толщина среза, влияет на количество сигнала и на резкость изображения
Slice gap (SG)	Описывает количество пространства (в % от толщины среза) между срезами
Phase encoding (PE)	Кодирование спинов для выявления места происхождения сигнала
Bandwidth (BW)	Отображает частоту дискретизации приемника ответного сигнала
PixelBandwidth (PBW)	Обратная величина эффективного периода дискретизации в герцах на пиксель

Таблица 2. Отличия РЧ сценариев Anatomy и Freesurfer

Базовый параметр	Anatomy	Freesurfer
Image rows	320	256
Image columns	320	256
PixelBandwidth	289	320
Flip angle	9	7
Inversion time, ms	900	1200
Repetition time (TE), ms	1470	2530

Для данной работы были выбраны два РЧ-сценария импульсных последовательностей МР-томографа:

1) Anatomy — рекомендован производителем МР-томографа как стандартный для выполнения МР-сканирований режим;

2) Freesurfer — рекомендован разработчиками свободно распространяемого специализированного программного пакета FreeSurfer.

Отличия РЧ-сценариев Anatomy и Freesurfer представлены в табл. 2.

Выполнение МР-сканирований. Для каждого испытуемого выполнено по два последовательных МР-сканирования головного мозга в режимах Anatomy и Freesurfer соответственно. В результате данного этапа работ для каждого испытуемого было получено по два набора экспериментальных данных в виде каталогов DICOM (рис. 2). Таким образом, всего было получено 28 наборов «сырых» экспериментальных данных в формате каталогов DICOM.

Обработка и анализ данных. Построение моделей и визуализация. Полученные исходные экспериментальные данные затем были конвертированы с использованием специализированной программы-конвертера MRI Convert. В результате конвер-

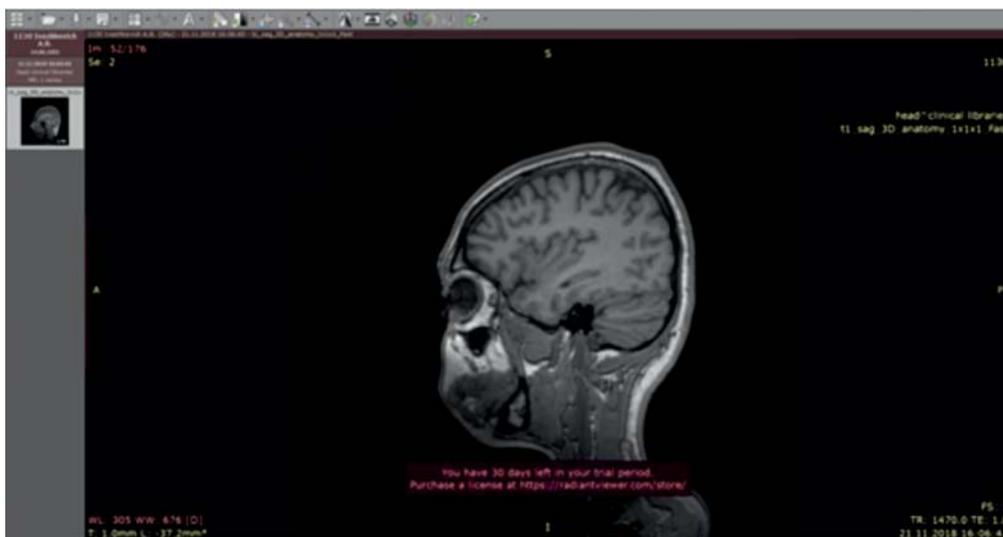


Рис. 2. Первичная визуализация экспериментальных МРТ-данных (RadiAnt DICOM Viewer)

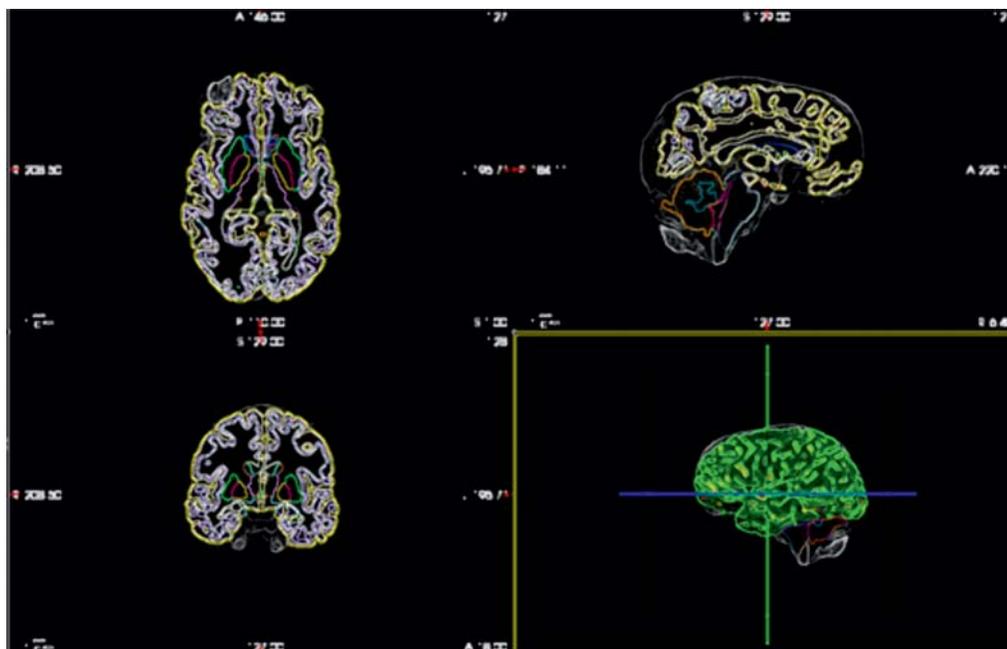


Рис. 3. Визуализация модели головного мозга испытуемого (FreeView)

тации каждый каталог DICOM (содержит файлы .IMA по количеству срезов) был преобразован в два файла: файл формата NifTI (содержит чистые экспериментальные данные) и файл формата .txt (содержит метаданные эксперимента). Далее, с использованием сценария geson_all специализированного программного обеспечения Freesurfer были выполнены обработка и анализ чистых экспериментальных данных (файл NifTI) с последующим построением математической модели головного мозга испытуемого. Для визуализации полученных моделей использовались визуальные редакторы (вьюверы) FreeView (рис. 3) и BrainBrowser.

Index	SegId	NVoxels	Volume_mm3	StructName	normMean	normStdDev	normMin	normMax	normRange
1	4	12614	12894.4	Left-Lateral-Ventricle	25.3736	11.4750	1.0000	85.0000	84.0000
2	5	472	513.4	Left-Inf-Lat-Vent	42.1737	13.6481	9.0000	78.0000	67.0000
3	7	11650	12290.4	Left-Cerebellum-White-Matter	88.0567	6.0216	39.0000	103.0000	64.0000
4	8	42416	42076.3	Left-Cerebellum-Cortex	65.8808	10.4574	13.0000	99.0000	86.0000
5	10	6299	6054.6	Left-Thalamus-Proper	89.4036	9.8070	31.0000	110.0000	79.0000
6	11	3559	3538.4	Left-Caudate	79.9598	7.7291	38.0000	104.0000	66.0000
7	12	4440	4362.3	Left-Putamen	90.1354	5.8674	57.0000	106.0000	49.0000
8	13	1981	1989.2	Left-Pallidum	101.2867	4.3412	72.0000	119.0000	47.0000
9	14	1521	1609.3	3rd-Ventricle	27.4793	11.4588	6.0000	85.0000	79.0000
10	15	1646	1757.2	4th-Ventricle	27.4635	11.8721	6.0000	72.0000	66.0000
11	16	19484	19205.1	Brain-Stem	80.5536	9.4537	7.0000	117.0000	110.0000
12	17	3741	3603.6	Left-Hippocampus	69.2392	8.0353	28.0000	102.0000	74.0000
13	18	1487	1427.1	Left-Amygdala	71.8514	6.0786	50.0000	96.0000	46.0000
14	24	1483	1390.3	CSF	38.7013	14.0183	7.0000	99.0000	92.0000
15	26	319	337.1	Left-Accumbens-area	77.4483	5.6665	49.0000	87.0000	38.0000
16	28	3710	3548.4	Left-VentralDC	90.8930	11.2528	38.0000	120.0000	82.0000
17	30	5	12.2	Left-vessel	68.2000	6.4962	61.0000	76.0000	15.0000
18	31	754	707.0	Left-choroid-plexus	51.4151	12.7262	15.0000	83.0000	68.0000
19	43	13170	13387.7	Right-Lateral-Ventricle	26.0699	11.8744	5.0000	94.0000	89.0000
20	44	249	305.9	Right-Inf-Lat-Vent	40.4819	12.3938	16.0000	72.0000	56.0000
21	46	10757	11583.9	Right-Cerebellum-White-Matter	86.0363	5.6876	39.0000	102.0000	63.0000
22	47	41853	41217.0	Right-Cerebellum-Cortex	66.0447	10.3831	15.0000	99.0000	84.0000
23	49	6701	6431.5	Right-Thalamus-Proper	87.4740	10.0949	27.0000	110.0000	83.0000
24	50	3731	3681.2	Right-Caudate	79.3492	8.1789	40.0000	100.0000	60.0000
25	51	4225	4213.1	Right-Putamen	87.8845	5.9106	67.0000	105.0000	38.0000
26	52	1823	1810.9	Right-Pallidum	99.3829	4.2403	68.0000	115.0000	47.0000
27	53	3487	3409.0	Right-Hippocampus	69.9707	7.5291	29.0000	120.0000	91.0000
28	54	1486	1485.5	Right-Amygdala	71.0935	5.6994	43.0000	87.0000	44.0000
29	58	462	442.1	Right-Accumbens-area	79.0887	5.3949	52.0000	98.0000	46.0000
30	60	3539	3304.8	Right-VentralDC	88.1164	11.7193	29.0000	112.0000	83.0000
31	62	36	44.5	Right-vessel	52.9167	10.9763	30.0000	68.0000	38.0000
32	63	815	735.2	Right-choroid-plexus	46.7423	11.7483	21.0000	77.0000	56.0000
33	72	0	0.0	5th-Ventricle	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	77	909	742.5	WM-hypointensities	67.5699	10.5729	28.0000	101.0000	73.0000
35	78	0	0.0	Left-WM-hypointensities	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36	79	0	0.0	Right-WM-hypointensities	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37	80	0	0.0	non-WM-hypointensities	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38	81	0	0.0	Left-non-WM-hypointensities	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39	82	0	0.0	Right-non-WM-hypointensities	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	85	126	124.8	Optic-Chiasm	75.3810	17.5981	37.0000	106.0000	69.0000
41	251	1119	1042.9	CC_Posterior	101.8168	15.8608	42.0000	123.0000	81.0000
42	252	489	423.5	CC_Mid_Posterior	93.3967	17.7805	35.0000	114.0000	79.0000
43	253	471	426.5	CC_Central	94.3652	16.8743	33.0000	114.0000	81.0000
44	254	535	471.5	CC_Mid_Anterior	94.7626	17.7385	42.0000	114.0000	72.0000
45	255	1066	1001.3	CC_Anterior	101.4512	15.7948	11.0000	140.0000	129.0000

Рис. 4. Таблица статистических данных подкорковой сегментации (aseg.stats)

Index	Значения А и F совпадают		Значения А и F различны		Значения А больше, чем F		Значения F больше, чем А		
	anatomy	freesurfer	anatomy	freesurfer	anatomy	freesurfer	anatomy	freesurfer	
1	5790.00	1589.00	-320	6200.6	6265	-48.4	12695	13157	
2	54.00	90.00	-36	74.2	118.7	44.5	12082	98929	
3	13885.00	12820.00	1065	14555	13609.6	444.9	812114	663098	
4	81123.00	58320.00	2593	60992	58386.3	2006	734918	853396	
5	10805.00	1767.00	538	8091.8	7458.7	633.1	921369	872083	
6	3745.00	3070.00	-225	3763.8	3916.1	162.3	842967	772083	
7	5400.00	5553.00	-150	5650.6	5773.9	-143.3	912002	862498	
8	2268.00	2309.00	-41	2189.9	2160.8	29.1	100978	98388	
9	1851.00	1994.00	-143	1957.3	1028.7	-71.4	404838	282515	
10	162083.00	22532.00	551	22599	22123.6	476.5	784888	718988	
11	1727.00	1699.00	-72	1727.00	1699.00	0	761208	687643	
12	4622.00	4569.00	-57	4451.1	4504.5	-53.4	738621	723514	
13	1817.00	1807.00	-80	1851.9	1716.8	64.9	574602	439041	
14	1078.00	1064.00	14	1059.8	1077.7	-17.9	574602	439041	
15	283.00	419.00	-136	298.6	445	-146.4	874618	847945	
16	288.00	4400.00	63	4174.2	4143.3	30.9	7025	8225	
17	30.00	4.00	0	11.2	10.2	1	8	3.594	
18	31.00	527.00	-157	373	496.5	123.5	606243	531366	
19	5604.00	5553.00	51	5949.2	5926.7	22.5	439618	305194	
20	97.00	130.00	-33	124	163.7	-38.7	822002	529109	
21	17654.00	12705.00	4928	17746	13341.5	404.8	860086	852515	
22	58639.00	58744.00	895	60054	58398	656	715652	661027	
23	497841.00	8011.00	-70	7854.6	7736	-81.4	898464	850683	
24	3632.00	4010.00	-378	3638.1	3946.8	-308.7	847803	762643	
25	5540.00	5959.00	-419	5680	5964.1	-284.1	906005	842005	
26	2159.00	1933.00	226	2087	1999.2	177.8	101825	975711	
27	4366.00	4236.00	132	4307.5	4158.6	48.9	760385	689483	
28	1776.00	1689.00	87	1751.4	1632.4	119	767179	692593	
29	550.00	582.00	-32	541.1	568.3	-27.2	827627	761649	
30	4246.00	4329.00	-83	4001.8	4093.4	-91.6	873029	841846	
31	62.00	1.00	-1	0	3.1	-3.1	0	60	
32	322.00	490.00	-168	310.3	472	-161.7	607484	551663	
33	72	166	0	0	0	0	0	0	
34	77	857.00	164.00	-247	644.2	766.4	-322.2	749604	1688681
35	78	0.00	0	0	0	0	0	0	
36	79	0.00	0	0	0	0	0	0	
37	80	0.00	0	0	0	0	0	0	
38	81	0.00	0	0	0	0	0	0	
39	82	0.00	0	0	0	0	0	0	
40	85	39.00	115.00	-96	43.3	135.1	-91.8	819487	755556
41	251	1244.00	1209.00	35	177.8	1143.4	-44.4	101922	1023093
42	252	742.00	718.00	24	674.1	642.2	31.9	153418	132825
43	253	747.00	827.00	120	668.6	585.8	82.8	964431	975215
44	254	859.00	636.00	223	767.6	585.5	181.1	964319	953192
45	255	1278.00	1491.00	-213	1152.6	1391.6	-239	978122	900791

Рис. 5. Индивидуальный сравнительный анализ

Сегментация основных анатомических структур. Результатом обработки для каждого файла NifTI является каталог, содержащий подкаталоги и файлы различного формата. В том числе в подкаталоге stats генерируются выходные файлы со статистическими данными для подкорковой сегментации (aseg) и корковой парцелляции (aragc), предоставляющие информацию о каждой помеченной области для отдельного субъекта. Для выполнения сравнительного анализа мы использовали статистические выходные данные подкорковой сегментации (файл aseg.stats), которые могут быть представлены в виде таблицы, содержащей характеристики основных анатомических структур построенной модели головного мозга (рис. 4). Соответственно, для каждого испытуемого было получено по две таблицы aseg.stats — в режиме Anatomy и режиме Freesurfer.

Алгоритм сравнительного анализа. Разработанный алгоритм включает в себя следующие шаги:

1. Индивидуальный сравнительный анализ. На данном этапе сравниваются две математические модели головного мозга одного испытуемого, построенные в результате обработки двух наборов экспериментальных МРТ-данных, полученных для данного испытуемого в двух разных режимах МР-томографа. Сравнение выполняется на основе таблиц статистических данных подкорковой сегментации (aseg.stats) путем вычисления delta и ее направленности (рис. 5):

$$D(i) = a^1(j) - a^2(j),$$

где $i = 1, \dots, 7$; $j = 1, \dots, 45$; a^1 — значение в режиме 1; a^2 — значение в режиме 2.

2. Групповой анализ. На этапе группового сравнительного анализа данные, полученные на этапе индивидуального анализа, группируются по типу delta с целью анализа общей динамики и направленности изменений (рис. 6, а, б).

В результате группового анализа выявлены следующие закономерности.

— Параметры структур с нулевыми значениями в норме стабильны по всем delta, вне зависимости от выбранного режима МР-томографа.

— Ни одна ненулевая в норме структура не показала стабильного результата при смене режима по всем delta. Для разных delta большие значения получены при разных режимах.

— По каждой из delta выявлен набор структур, показывающий стабильное числовое преимущество либо режима Anatomy, либо режима Freesurfer.

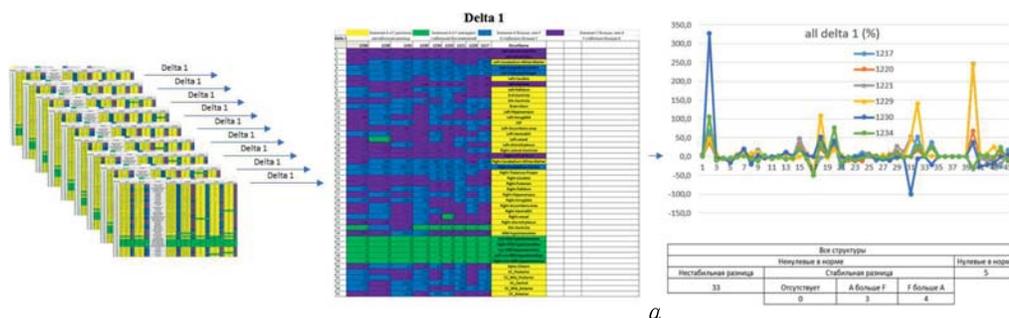


Рис. 6а. Групповой анализ данных (delta 1)



6

Рис. 6б. Групповой анализ данных (delta 2–7)

— Delta 3 и delta 5 для значительной части ненулевых в норме структур показывают стабильно большие значения на режиме Anatomy.

— Delta 4 и delta 7 для значительной части ненулевых в норме структур показывают стабильно большие значения на режиме FreeSurfer.

Программный сервис системы «Нейровизуализация». Программная реализация описанного выше алгоритма выполнена в виде сервиса системы «Нейровизуализация» [4] ИАП «Цифровая лаборатория» [5, 6, 8]. Обработка и анализ данных осуществляются с использованием специализированного программного обеспечения Freesurfer [7].

При создании сервиса использовалось следующее программное обеспечение:

- Java, JavaScript, HTML [9, 10];
- MySQL 5.7 [11];
- J2EE [9];
- Apache, Tomcat;
- MRI Convert;
- Freesurfer, FreeView, BrainBrowser.

Доступ пользователей к системе осуществляется удаленно, с использованием веб-интерфейса.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм сравнительного анализа основных анатомических структур математических моделей головного мозга человека, получаемых по результатам обработки и анализа данных МР-сканирований в разных режимах МР-томографа. Выполнена программная реализация алгоритма в качестве дополнительного сервиса Системы «Нейровизуализация» ИАП «Цифровая лаборатория» НИЦ «Курчатовский институт». Проведена апробация алгоритма на экспериментальных данных группы из 15 испытуемых, полученных на МР-томографе Siemens Verio Magnetom 3T ресурсного центра «Когнимед» НИЦ «Курчатовский институт».

По результатам выполненных работ экспериментально подтверждено, что изменение сценария РЧ импульсных последовательностей приводит к изменению выходных экспериментальных данных и, как следствие, к изменению математической 3D-модели головного мозга испытуемого; выявлены некоторые общие закономерности и тенденции таких изменений. Сделаны следующие выводы: структуры с нулевым значением в норме полностью стабильны по отношению к смене режима томографа; структуры с ненулевым значением в норме разнонаправленно нестабильны по отношению к смене режима; на фоне общей нестабильности ненулевых в норме структур выявлены подмножества локальной стабильности.

Работы выполнены в рамках тематического плана КК НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт» (приказ НИЦ КИ №87 от 20.01.2023 г.), подтема 1ф.1.3 «Разработка системы неинвазивных методов построения структурных, функциональных и эффективных коннектомов крупномасштабных сетей мозга».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меллер Торстен Б., Райф Э. Укладки и режимы при магнитно-резонансной томографии. М.: МЕДпресс-информ, 2014.

2. Анисимов Н. В., Батова С. С., Пирогов Ю. А. Магнитно-резонансная томография: управление контрастом и междисциплинарные приложения. М.: Maks Press, 2013.
3. Evert Blink “MRI: PHYSICS”. 2004.
4. Енягина И. М., Polyakov A. N., Poyda A. A., Ushakov V. L. System for Automatic Processing and Analysis of MRI/iMRI Data on the Kurchatov Institute Supercomputer // Math. Model. Comput. Phys. 2019; Eur. Phys. J. Web Conf. 2020. V. 226. P. 03006.
5. Поляков А. Н. и др. Распределенная модульная платформа «Цифровая лаборатория» как среда для проведения научных исследований и разработок НИЦ «Курчатовский институт» // Тр. Ин-та системного программирования РАН. 2020. Т. 32, вып. 5. С. 132–152.
6. Polyakov A., Kokovin D., Poyda A., Zhizhin M., Andreev A., Govorov A., Ilyin V. Toolkit for Intensive Work with Metadata in Specialized Information Systems // Proc. Comput. Sci. 2017. V. 119. P. 59–64.
7. FreeSurferWiki. <https://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/fswiki>.
8. Bubenko Janis A., Jr. From Information Algebra to Enterprise Modelling and Ontologies — a Historical Perspective on Modelling for Information Systems // Conceptual Modelling in Information Systems Engineering / Eds.: J. Krogstie, A. L. Opdahl, S. Brinkkemper. Springer, 2007. P. 1–18.
9. Java EE Overview. <http://www.oracle.com/technetwork/java/javaee/overview/index.html>. Accessed 20.11.2020.
10. An Open Source Framework for Creating Java EE Web Applications. <https://struts.apache.org/>. Accessed 20.11.2020.
11. MySQL 5.7 Release Notes. https://docs.oracle.com/cd/E17952_01/mysql-5.1-relnotesen/index.html. Accessed 20.11.2020.

Получено 2 мая 2023 г.