

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧИ

УДК 004.9

Э.В. Снежко¹, П. Карлье², Н. Аззабу², В.А. Ковалев¹, А.А. Дмитрук¹,
А.В. Шукелович^{1,2}

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НЕРВНО-МЫШЕЧНЫХ НАРУШЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ**

Предлагаются результаты исследований по использованию базовой концепции методики анализа медицинских изображений посредством адаптации универсальных дескрипторов изображений и их использования для количественной интерпретации областей мышц на изображениях магнитно-резонансной томографии.

Введение

В настоящей работе рассматриваются характеристические признаки текстур с целью количественной оценки уровня дегенерации мышц по изображениям магнитно-резонансной томографии (МРТ). Эксперименты по оценке эффективности характеристических признаков проводились на изображениях мышц животных и человека.

Всего были протестированы следующие группы признаков: интегральные признаки текстур, матрицы совместной встречаемости Харалика, групповые матрицы, обобщенные матрицы совместной встречаемости различных типов с использованием значений яркостей элементов изображений, обобщенные матрицы совместной встречаемости различных типов с использованием значений производных первого и второго порядков, признаки на основе анизотропии текстур изображений и анизотропии матриц совместной встречаемости текстур.

По результатам полученных оценок выбраны объединенные количественные признаки, экспериментально установлена их эффективность по параметрам специфичности, чувствительности и точности.

1. Исходные данные

В качестве исходных данных, по которым вычислялись количественные признаки, использовались две группы выборок МРТ-изображений. Изображения были предоставлены лабораторией ядерного магнитного резонанса Института миологии (Париж, Франция).

Первая выборка содержала изображения здоровых (контрольная группа) и больных мышечной дистрофией собак породы золотистый ретривер [1, 2]. Течение заболевания мышц (дистрофии Дюшенна) у данной породы собак схоже с течением заболевания у людей [3], поэтому они часто используются в качестве тестовых объектов при изучении упомянутой патологии мышц. Всего выборка содержала МРТ-изображения (типа T2 и T2FS) 39 животных. Внутри каждой группы были выделены пять возрастных групп: 2, 4, 6, 8 и 12 месяцев. Разделение по возрастным группам было сделано по той причине, что степень поражения мышц увеличивается с прогрессированием болезни. Ожидалось, что на ранней стадии заболевания текстуры мышц будут отличаться незначительно либо не отличаться вообще, в то время как значительные различия проявятся у более взрослых собак. На всех изображениях специалистами-радиологами были сегментированы восемь групп мышц: EDL-G, EDL-D, GASLAT-G, GASLAT-D, GASMED-G, GASMED-D, TC-G, TC-D (рис. 1). Все изображения были преобразованы из формата данных DICOM в формат Analyze.

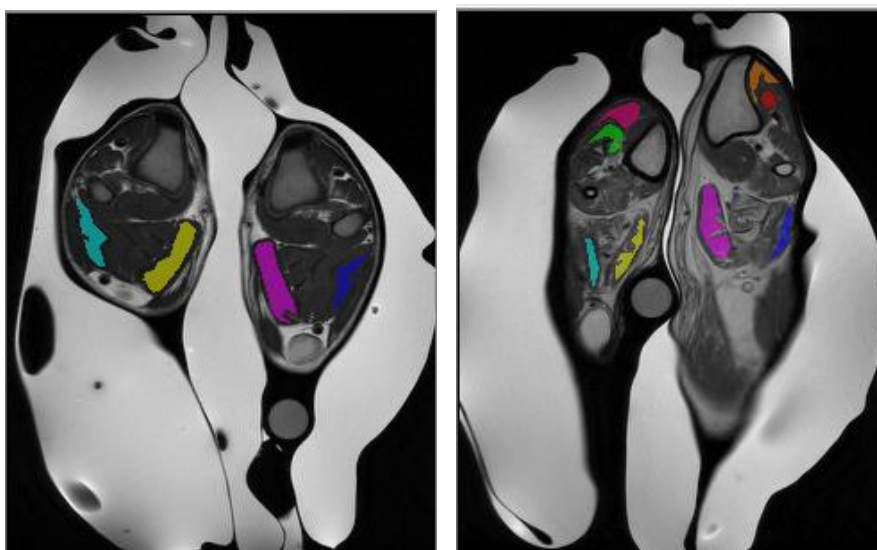


Рис. 1. Примеры МРТ-изображений мышц животных, выделенных разными цветами (серые области вокруг лап относятся к приспособлению для фиксации животных)

Вторая выборка состояла из МРТ-изображений мышц типа T2FS 20 здоровых людей (добровольцев). Выборка изображений была разбита на две подвыборки AG_1 и AG_2 по возрасту: на условно молодых и пожилых людей соответственно (рис. 2). Таким образом в ходе работ с данной выборкой была осуществлена оценка эффективности признаков текстур для разделения изображений на два соответствующих класса. На всех изображениях специалистами-радиологами были сегментированы 16 групп мышц: AL_G, AL_D, AM_G, AM_D, BF_G, BF_D, RF_G, RF_D, SM_G, SM_D, ST_G, ST_D, VI_G, VI_D, VL_G, VL_D. Все изображения были преобразованы из формата данных DICOM в формат Analyze (рис. 3).

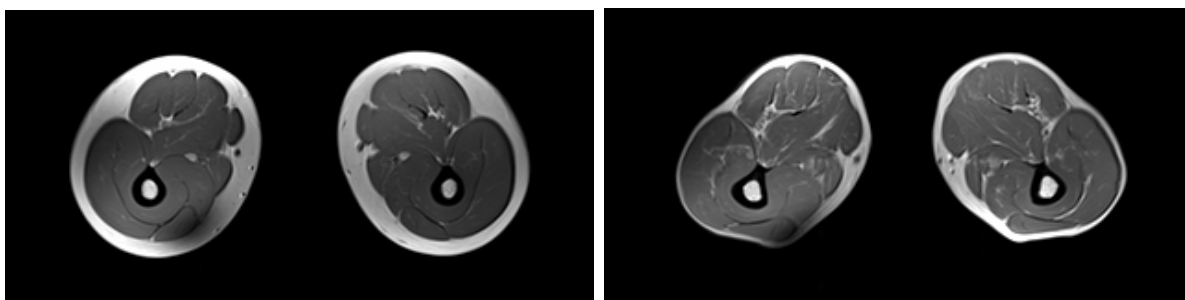


Рис. 2. Примеры срезов изображений мышц людей из подвыборок AG_1 и AG_2 соответственно



Рис. 3. Примеры срезов изображений сегментированных мышц людей из подвыборок AG_1 и AG_2 соответственно

2. Интегральные количественные признаки текстур мышц на МРТ-изображениях

С целью предварительного анализа возможности количественной оценки уровня деградации мышц было использовано специализированное программное обеспечение (ПО) MaZda, разработанное в рамках европейского проекта COST B11 «Количественный анализ текстур изображений магнитно-резонансной томографии» (1998–2002) [4, 5]. Данное ПО позволяет вычислять более 300 различных текстурных признаков как нулевого (признаков гистограмм), так и более высокого порядка (матриц совместной встречаемости и групповых матриц).

По результатам классификации с использованием модуля b11 среди интегральных гистограммных признаков текстур определены те, которые лучше всего разделяют классы текстур здоровых и больных дистрофией собак, а также значения ошибочной классификации данных признаков. Построена таблица ошибок классификации мышц здоровых и больных дистрофией собак по интегральным признакам, вычисленным при помощи специализированного ПО MaZda (табл. 1).

Таблица 1

Фрагмент таблицы ошибок классификации мышц здоровых и больных дистрофией собак по интегральным признакам для мышцы GASLAT-D

Месяц	Признак	Количество ошибок классификации, %	Признак	Количество ошибок классификации, %
2-й	Variance	17,65	Variance	5,88
4-й	S(1,0)SumVarnc	20,00	S(1,0)SumVarnc	15,00
6-й	Variance	12,50	S(1,-1)InvDfMom	12,50
8-й	S(1,0)Correlat	6,25	S(1,0)Correlat	6,25
12-й	S(1,0)Entropy	8,70	S(1,-1)Entropy	8,70

Среди интегральных гистограммных признаков текстур мышц собак чаще всего наиболее информативным признаком являлось значение среднеквадратического отклонения вокселей из областей интереса (16 %).

В то же время уровень ошибочной классификации с использованием среднеквадратического отклонения, а также тот факт, что во многих других случаях в качестве наиболее информативных выбирались и другие признаки, не позволяют выделить некий интегральный признак, с использованием которого можно было бы не только достоверно разделять классы изображений, относящихся к здоровым или больным дистрофией Дюшенна собакам, но и определять степень поражения мышц. Поэтому были продолжены работы по разработке количественных признаков текстур мышц на МРТ-изображениях.

3. Признаки текстур на основе матриц совместной встречаемости и групповых матриц с использованием значений яркостей элементов изображений

Кроме интегральных (например, моменты различных порядков) и геометрических признаков ПО MaZda позволяет вычислять матрицы совместной встречаемости Харалика, а также групповые матрицы (run-length matrices).

Для каждого из слоев МРТ-изображений мышц (EDL-G, EDL-D, GASLAT-G, GASLAT-D, GASMED-G, GASMED-D, TC-G, TC-D) с использованием ПО MaZda были вычислены 313 количественных признаков. Так, для каждой мышцы, признака и возрастной группы были получены два вектора чисел. Первый вектор соответствовал изображениям собак с мышечными нарушениями (GRMD), а второй – контрольной группе изображений (Healthy).

Пример 1

Возрастная группа «4-й месяц», мышца GASLAT-D:

– группа GRMD (собаки с мышечными нарушениями) (vector_g):

2470,6626 3767,0305 2357,6574 2409,0150 3372,9133 1445,1748
 1815,3884 2639,4784 1779,9983 2416,6319 2649,6683 1244,0339
 1433,8159 2634,6316;

– контрольная группа (vector_h):

1479,8324 817,5634 2773,8365 1143,4609.

С использованием скользящего порогового значения от минимального ($\min(\text{vector}_g, \text{vector}_h)$) до максимального ($\max(\text{vector}_g, \text{vector}_h)$) для каждого из пороговых значений были вычислены чувствительность (True positive rates, TPR) и показатель ложных срабатываний (False positive rates, FPR). На основе вычисленных данных были построены кривые оперативной характеристики надежности (Receiver operating characteristic curves, ROC-curves (рис. 4)), а также определены значения площади под кривой (Area under curve, AUC).

Пример 2

Возрастная группа, мышца и признак те же, что и в примере 1; $\min(\text{vector}_g, \text{vector}_h) = 817,5634$; $\max(\text{vector}_g, \text{vector}_h) = 3767,0305$; значение площади под кривой $AUC = 0,74362$.

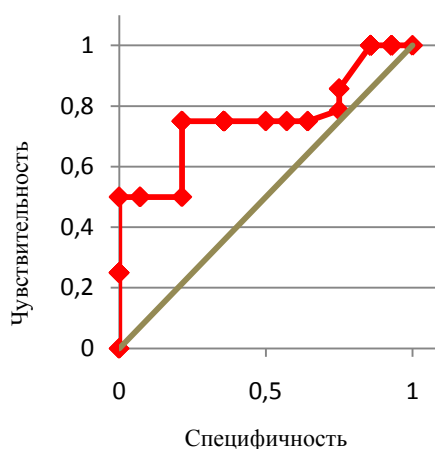


Рис. 4. Пример ROC-кривой надежности для возрастной группы «4-й месяц», мышцы GASLAT-D и одного из признаков

Для всех 313 количественных признаков вычислены средние значения по всем мышцам площадей под ROC-кривыми внутри каждой возрастной группы собак. Для фиксированной возрастной группы количественные признаки были отсортированы в убывающем порядке в соответствии с их средней эффективностью для разделения изображений, соответствующих собакам из групп Healthy и GRMD.

Пример 3

Для вычисленных значений площади под кривой (AUC) возрастной группы «4-й месяц» всех рассматриваемых мышц среднее значение площади под кривой $\overline{AUC} = 0,8677$. Аналогично вычислены средние значения для всех 313 количественных признаков MaZda каждой возрастной группы.

В дополнение к рассмотренным выше проведены эксперименты по оценке эффективности количественных признаков на основе многосортных матриц совместной встречаемости [6], которые представляют собой многомерные гистограммы. Каждый элемент матрицы содержит частоту встречаемости элементарных структур изображения. В качестве элементарных структур использовались пары и тройки пикселей изображения, расположенные в вершинах равносторонних треугольников с различной длиной стороны. Соответствующие матрицы обозначаются как IID и IID, где I – интенсивность пикселей изображения, D – расстояние между пикселями изображения. Название количественного признака кодируется следующим образом: <тип признака>–<количество уровней разбиения по яркости>–<расстояние между элементами изображения>. Например, IID-128-3 является признаком типа IID со стороной треугольников, равной трем элементам изображения, для которого диапазон яркостей элементов изображения был квантизован на 128 равных уровней. В ходе экспериментов были использованы количественные признаки

следующих типов: IID-8-1, IID-8-3, IID-16-1, IID-16-3, IID-32-1, IID-32-3, IID-64-1, IID-64-3, IID-128-1, IID-128-3, IID-8-1, IID-8-3, IID-16-1, IID-16-3, IID-32-1, IID-32-3, IID-64-1, IID-64-3, IID-128-1, IID-128-3.

Для всех количественных признаков на основе многосортных матриц совместной встречаемости (общее количество типов – 20) были вычислены оценки эффективности для разделения МРТ-изображений мышц в соответствии с принадлежностью изображений классам здоровых собак и собак с мышечными нарушениями. Количественные признаки вычислялись для всех используемых в экспериментах мышц: EDL-G, EDL-D, GASLAT-G, GASLAT-D, GASMED-G, GASMED-D, TC-G, TC-D. Возрастные группы собак были теми же, что и в описанных ранее экспериментах: 2, 4, 6, 8 и 12 месяцев. Тип релаксации при формировании МРТ-изображений – T2.

В результате для каждой возрастной группы было проведено 160 (20 типов признаков на 8 типов мышц) экспериментов. Данные для каждого эксперимента были подготовлены в виде специальной таблицы (табл. 2), в которой каждая строка соответствовала слою изображения класса GRMD либо Healthy, а столбцы – элементам некоторого данного количественного признака.

Таблица 2

Пример таблицы, подготовленной для оценки эффективности многосортных матриц совместной встречаемости

Класс	Признак 65	Признак 76	Признак 77	Признак 79
month2 GRMD T2 EDL-D	110	1932	3032	61
month2 GRMD T2 EDL-D	36	484	1426	126
month2 GRMD T2 EDL-D	24	94	717	47
month2 Healthy T2 EDL-D	326	1699	467	60
month2 Healthy T2 EDL-D	96	1154	196	20
month2 Healthy T2 EDL-D	169	1921	723	12

Признак 65 является 65-м элементом вектора количественного признака, остальные элементы кодируются аналогично. Столбцы с нулевой дисперсией значений были удалены.

Таблицы в виде, аналогичном табл. 2, являются входными данными для последующего анализа методом кривых оперативной характеристики надежности (ROC-кривых). Выходными данными являются значения площади под ROC-кривой. В экспериментах для вычисления характеристик ROC-кривых использовались два классификатора: «случайный лес» (Random Forest) с 50 деревьями и метрический классификатор « k -ближайших соседей» с евклидовой метрикой, для которого $k = 5$.

По итогам экспериментов была проведена перекрестная проверка с количеством выборок, равным 5. В качестве примера ниже приведены первые три строки выходной таблицы.

Идентификатор эксперимента	AUC_knn	AUC_forest
IID-16-1 month8 T2 EDL-D	0,7175	0,7879
IID-16-1 month8 T2 EDL-G	0,7928	0,8667
IID-16-1 month8 T2 GASLAT-D	0,9500	0,9733

На основе сравнения количественных признаков сделаны следующие выводы: оценка эффективности признаков на основе анализа ROC-кривых для всех возрастных групп и всех мышц была выше у признаков, основанных на матрицах совместной встречаемости Харалика, чем у интегральных признаков текстур. Также установлено, что эффективность матриц совместной встречаемости сравнима с эффективностью признаков на основе многосортных матриц совместной встречаемости. При этом для всех возрастных групп для мышц GASMED-D, GASMED-G и GASLAT-D качество дифференциации на соответствие группам GRMD и Healthy является наилучшим.

4. Количественные признаки текстур на основе гистограмм анизотропии

Проведены два эксперимента для оценки эффективности признаков на основе гистограмм анизотропии. В первом эксперименте для изображений каждой группы мышц (EDL-G, EDL-D, GASLAT-G, GASLAT-D, GASMED-G, GASMED-D, TC-G, TC-D) всех возрастных групп собак

были вычислены гистограммы анизотропии, а по гистограммам анизотропии – параметры F1, F2 и F3 [7, 8]. Во втором эксперименте по изображениям каждой группы мышц были вычислены вначале матрицы совместной встречаемости типов IID, а затем гистограммы анизотропии матриц совместной встречаемости и те же параметры гистограмм – F1, F2 и F3.

В обоих экспериментах для параметров F1, F2 и F3 каждой группы мышц был проведен поиск параметра с наилучшими характеристиками. Решающим параметром выступала суммарная площадь под ROC-кривой для данного типа параметра. На рис. 5 приведены примеры ROC-кривых для гистограмм анизотропии исходных изображений.

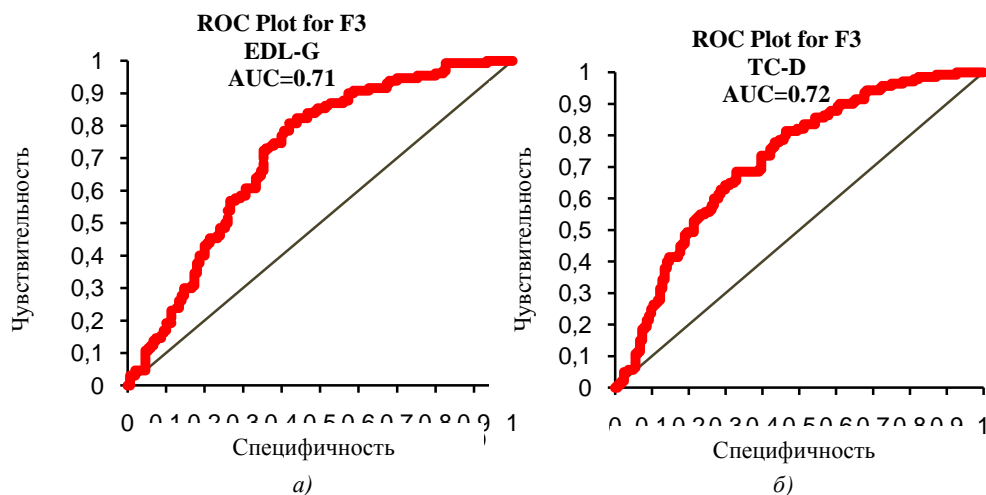


Рис. 5. ROC-кривые для параметра F3 гистограммы анизотропии исходных изображений мышц: а) EDL-G; б) TC-D

Полученные на основе анализа кривых оперативной характеристики надежности результаты показали, что два из трех признаков (F2 и F3) на основе анизотропии яркости элементов изображения обладают дискриминантными свойствами только для некоторых категорий мышц (имеют суммарную площадь под ROC-кривой более 0,7, что соответствует удовлетворительному значению оценки), а один из признаков (F1) ни для одной категории мышц не обладает дискриминантными свойствами. Это же верно и для признаков на основе анизотропии матриц совместной встречаемости исходных изображений.

Также было показано, что лучшие показатели исследованных количественных признаков не достигают значений показателей признаков, приведенных в данной работе ранее.

5. Объединенные количественные признаки текстур МРТ-изображений

В предыдущих разделах был приведен анализ эффективности дискриминации количественных признаков текстур следующих типов для МРТ-изображений мышц:

- интегральных признаков текстур, вычисленных с использованием специализированного программного обеспечения MaZda (313 видов признаков);
- признаков на основе обобщенных матриц совместной встречаемости с использованием значений яркостей элементов изображений (20 видов признаков);
- признаков на основе гистограмм анизотропии (8 видов признаков).

Всего был проанализирован 341 признак. В рамках исследований, представленных в данной статье, была предусмотрена разработка объединенных признаков текстур мышц, которые могли бы повысить эффективность количественной оценки уровня дегенерации мышц. Обычно при анализе большого количества признаков проводится сокращение их числа с помощью метода главных компонент. Данный метод позволяет выделить некоррелированные признаки, называемые главными компонентами. Если имеется одна или несколько компонент (как правило, существенно меньше, чем общее их количество), которые превышают заранее заданный порог дисперсии вектора данных признаков, все остальные компоненты можно не использовать в дальнейшем анализе. С этой целью интегральные признаки текстур были проанализированы с использованием метода главных компо-

нент. Главная компонента PC1 имела значение дисперсии выше 95 % от дисперсии всего множества векторов данных. Был определен интегральный признак $S(2,0)SumAverg$, который имеет наибольший коэффициент корреляции с PC1. Использование метода главных компонент для количественных признаков на основе матриц совместности не проводилось по причине различной размерности указанных признаков. Вместо этого были отобраны два признака (IID-8-1 и IID-16-1) с наибольшим средним значением площади под ROC-кривой по всем мышцам, которые было решено использовать совместно в качестве объединенного признака.

Описанная процедура позволяет существенно сократить пространство признаков для количественной оценки текстур мышц на МРТ-изображениях посредством выбора наиболее информативных. После нормализации значений главных компонент признаков IID-8-1 и IID-16-1, а также значений признака $S(2,0)SumAverg$ получается объединенный набор данных для каждой из групп образцов. Пример объединенного набора значений приведен в табл. 3.

Таблица 3

Значения интегрального признака $S(2,0)SumAverg$ и главных компонент признаков IID-8-1 и IID-16-1 после нормализации для 16 текстур класса GRMD и 26 текстур Healthy образцов мышцы EDL-D, возрастная группа «2-й месяц»

GRMD					Healthy				
0,8357	0,8619	0,1153	0,7966	0,6335	0,0636	0,5151	1,0000	0,5180	0,2952
0,7995	0,8118	0,1500	0,8298	0,5662	0,1625	0,6200	0,9140	0,5195	0,2565
0,7760	0,7475	0,2009	0,6916	0,4953	0,0576	0,5262	0,9452	0,5147	0,2459
0,8296	0,8723	0,1276	0,8559	0,5856	0,0497	0,5832	0,9236	0,5231	0,2112
0,8016	0,8171	0,1448	0,8411	0,5283	0,0000	0,5519	0,9801	0,5193	0,2501
0,8432	0,8200	0,0942	0,4647	0,7403	0,0658	0,4900	1,0000	0,5180	0,1306
0,8822	0,9662	0,0594	0,9715	0,4295	0,1753	0,4493	1,0000	0,5180	0,1050
0,8885	0,8561	0,0579	0,6501	0,4355	1,0000	0,1753	0,0000	0,0000	0,0506
0,8862	1,0000	0,0558	1,0000	0,4198	0,9646	0,0734	0,0232	0,0419	0,0000
0,8598	0,8942	0,0594	0,9855	0,6609	0,8798	0,0000	0,2765	0,2739	0,0510
0,9000	0,7127	0,0708	0,2871	1,0000	0,9677	0,0804	0,1323	0,1256	0,0609
0,8968	0,7337	0,0527	0,3366	0,6460	0,8796	0,8104	0,0923	0,4314	0,1237
0,8805	0,7361	0,0464	0,2324	0,7620	0,2287	0,3929	1,0000	0,5180	0,0347
0,8184	0,8271	0,1313	0,7972	0,6506	0,9821	0,1310	0,0399	0,0577	0,0887
0,7445	0,6860	0,2437	0,6260	0,7481	0,8932	0,0682	0,2451	0,2800	0,0278
0,8481	0,9197	0,0875	0,9660	0,5467	0,8758	0,0352	0,1786	0,2198	0,0854
					0,8058	0,0652	0,4403	0,3504	0,0442
					0,8875	0,0655	0,2057	0,1765	0,0668
					0,3096	0,4353	0,8941	0,5041	0,0967
					0,1509	0,4625	0,9622	0,5136	0,1151
					0,2223	0,5906	0,8292	0,5154	0,3198
					0,3633	0,6406	0,7009	0,5378	0,2886
					0,1966	0,5754	0,8468	0,5180	0,2311
					0,2401	0,5630	0,8182	0,5151	0,2824
					0,3061	0,4307	0,8654	0,4890	0,4472
					0,2663	0,5971	0,6903	0,5269	0,1328

Перекрестная проверка (кросс-валидация) предсказательной эффективности статистической модели, построенной на полученных признаках, осуществлялась с использованием стратегии leave-one-out. Из множества $K = P + N$ (где P – количество векторов, относящихся к классу GRMD, а N – к классу Healthy) векторов поочередно удалялся один вектор v , производилась тренировка на оставшихся $K-1$ векторах, а затем следовало предсказание принадлежности вектора v к классам GRMD и Healthy. После этого строилась матрица неточностей, элементами которой являлись количества истинно положительных (TP), истинно отрицательных (TN), лож-

ноположительных (FP) и ложноотрицательных (FN) случаев. Для рассматриваемого примера (мышца EDL-D, возрастная группа «2-й месяц») матрица неточностей представлена как

$$\begin{aligned} TP &= 16, & FN &= 0, \\ FP &= 1, & TN &= 25, \end{aligned}$$

откуда чувствительность модели (sensitivity) $TP/(TP+FN) = 1$; специфичность (specificity) $TN/(TN+FP) = 0,9615$, точность предсказания (ACC) $(TP + TN)/(P + N) = 0,976$.

Таким образом, были реализованы и протестированы объединенные количественные признаки текстур мышц на МРТ-изображениях (интегральный признак $S(2,0)SumAverg$ и два признака на основе обобщенных матриц совместной встречаемости – IID-8-1 и IID-16-1). В результате тестирования объединенных признаков показано, что их эффективность для дифференциации текстур, относящихся к классам здоровых и GRMD-образцов, выше по сравнению с дифференциацией с использованием каждого признака по отдельности. Эффективность признаков оценивалась по таким параметрам, как специфичность, чувствительность и точность.

6. Тестирование всех разработанных признаков на дополненной выборке МРТ-изображений мышц

Построена таблица ошибок классификации мышц из подвыборок AG_1 и AG_2 по 333 количественным признакам (как интегральным, так и основанным на матрицах совместной встречаемости элементов текстур). Были определены признаки, наиболее эффективные для разделения текстур на классы, принадлежащие подвыборкам AG_1 и AG_2 (табл. 4 и 5).

Таблица 4

Лучшие признаки для каждой из мышц по значению площади под ROC-кривой при дифференциации мышц на подвыборки AG_1 и AG_2

Мышца	Признак	AUC	Мышца	Признак	AUC
AL_G	S(1,1)InvDfMom	0,947044	SM_G	S(0,1)InvDfMom	0,957493
AL_D	S(0,1)InvDfMom	0,960591	SM_D	S(1,1)InvDfMom	0,962506
AM_G	S(1,1)InvDfMom	0,961146	ST_G	S(1,1)InvDfMom	0,982129
AM_D	S(1,-1)InvDfMom	0,954125	ST_D	S(2,0)InvDfMom	0,958039
BF_G	S(0,1)DifEntrp	0,943304	VI_G	S(1,1)InvDfMom	0,889981
BF_D	S(1,1)InvDfMom	0,976403	VI_D	S(2,-2)Correlat	0,876541
RF_G	S(1,-1)InvDfMom	0,864044	VL_G	S(0,3)InvDfMom	0,917637
RF_D	S(1,0)DifEntrp	0,834921	VL_D	S(1,0)DifEntrp	0,862972

Таблица 5

Пять лучших количественных признаков по среднему для всех мышц значению площади под кривой оперативной характеристики надежности для разделения областей изображений мышц на подвыборки AG_1 и AG_2

Признак	AUC
S(1,0)InvDfMom	0,902574
S(1,1)InvDfMom	0,899792
S(0,1)InvDfMom	0,899756
(0,1)DifEntrp	0,892268
S(1,-1)InvDfMom	0,891849

Заключение

На основе проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

– для первой выборки изображений наиболее высокой для всех возрастных групп и всех мышц оказалась оценка эффективности признаков на основе матриц совместной встречаемости Харалика и на основе многосортных матриц совместной встречаемости. При этом для всех воз-

растных групп для мышц GASMED-D, GASMED-G и GASLAT-D качество разделения на группы изображений мышц здоровых собак (Healthy) и изображений мышц собак, пораженных дистрофией (GRMD), является наилучшим;

– для второй выборки МРТ-изображений мышц 20 здоровых людей-добровольцев лучшими дискриминационными характеристиками обладает признак «обратный дифференциальный момент», также интерпретируемый как «однородность» текстуры.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку и тестирование автоматизированных методов сегментации мышц на изображениях МРТ для дальнейшего текстурного анализа сегментированных областей изображений.

Данная работа выполнена в рамках проекта БРФФИ – ИЦНИ Ф11Ф-005.

Список литературы

1. Characterization of dystrophic muscle in golden retriever muscular dystrophy dogs by nuclear magnetic resonance imaging / J.L. Thibaud [et al.] // *Neuromuscul Disord.* – 2007. – Vol. 17. – P. 575–584.
2. Mutation segregation and rapid carrier detection of X-linked muscular dystrophy in dogs / R.J. Bartlett [et al.] // *Am J Vet Res.* – 1996. – Vol. 57. – P. 650–654.
3. Mammalian animal models for Duchenne muscular dystrophy / R. Willmann [et al.] // *Neuromuscul Disord.* – 2009. – Vol. 19. – P. 241–249.
4. MaZda – A software package for image texture analysis / P. Szczypinski [et al.] // *Computer Methods and Programs in Biomedicine.* – 2009. – Vol. 94, no. 1. – P. 66–76.
5. Szczypinski P. MaZda – a Software for Texture Analysis / P. Szczypinski, M. Strzelecki, A. Materka // *Proc. of ISITC 2007.* – Republic of Korea, 2007. – P. 245–249.
6. Ковалев, В.А. Поиск медицинских изображений по содержанию в условиях шумов / В.А. Ковалев, А.А. Дмитрук // *Информатика.* – 2009. – № 2 (21). – С. 39–46.
7. Kovalev, V. Texture anisotropy in 3D images / V. Kovalev, M. Petrou, Y. Bondar // *IEEE Transactions on Image Processing.* – Vol. 8, no 3. – 1999. – P. 346–360.
8. Kovalev, V. Texture analysis in three dimensions as a cue to medical diagnosis / V. Kovalev, M. Petrou; ed. by I. Bankman // *Handbook of medical imaging: processing and analysis.* – San Diego : Academic Press, 2000. – P. 231–247.

Поступила 19.06.2014

¹Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: eduard.snezhko@gmail.com

²Institut Myologie,
Batiment Babinski,
47/83 Bd de L'hôpital, Paris
e-mail: p.carlier@institut-myologie.com

E.V. Snezhko, P. Carlier, V.A. Kovalev, N. Azzabou, A.A. Dmitruk, A.V. Shukelovich

APPLICATION OF TEXTURE ANALYSIS TECHNIQUES TO NMR IMAGES FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF MUSCLE DISORDERS

Results on development of the basic concept of the medical image analysis methodology are presented. The techniques used in the research are based on adaptation and utilization of the generalized image features for quantitative interpretation of muscles on nuclear magnetic resonance images.