
МЕТОДИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОДОБИЯ КОНТУРОВ СЕРОГО ВЕЩЕСТВА
НА ПОПЕРЕЧНЫХ СРЕЗАХ СПИННОГО МОЗГА МЛЕКОПИТАЮЩИХ

© 2025 г. В. А. Ляховецкий¹, П. Ю. Шкорбатова¹, А. А. Вещицкий¹,
Н. С. Меркульева^{1,*}

¹Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: mer-natalia@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.01.2025 г.

После доработки 01.03.2025 г.

Принята к публикации 04.04.2025 г.

Спинальный мозг подразделяется на сегменты; нейронные сети различных групп сегментов контролируют, в частности, локомоцию и висцеральные функции. Сегменты спинного мозга являются важными топографическими ориентирами при осуществлении экспериментальных и лечебных воздействий. Однако определение точного положения сегментов *in vivo* (особенно автоматизированное) сопряжено со значительными трудностями: у млекопитающих часть сегментов спинного мозга смещена рострально (восходит) по отношению к одноименным позвонкам, причем степень восхождения несколько варьирует даже в рамках одного вида. Одним из решений проблемы может быть использование эталонных изображений срезов сегментов, взятых, например, из гистологических атласов спинного мозга. В данной работе исследованы различные методы анализа подобия контуров серого вещества на поперечных срезах спинного мозга млекопитающих, позволяющие установить принадлежность среза к определенному сегменту. Рассмотрены методы анализа срезов, полученных от одного животного (основаны на использовании коэффициента Жаккара, метрики расстояний между контурами, на корреляционном анализе *R*-ф кривых или же инвариантных моментах X_u), а также методы сравнения изображения сегментов спинного мозга с эталонными (корреляционный анализ *R*-ф кривых, инвариантные моменты X_u). Полученные результаты позволяют предположить, что метод определения сегментов путем сравнения топографических или гистологических изображений поперечных срезов спинного мозга на разных уровнях с некоторой базой данных, содержащей набор эталонных изображений срезов конкретных сегментов, основанный на инвариантных моментах X_u , является наиболее эффективным из рассмотренных.

Ключевые слова: инвариантные моменты X_u , коэффициент Жаккара, спинной мозг, сегменты, классификация поперечных срезов

DOI: 10.31857/S0869813925060101, **EDN:** TEKVYA

ВВЕДЕНИЕ

Спинальный мозг (СМ) – наиболее филогенетически древнее образование центральной нервной системы. У млекопитающих он представляет собой длинную цилиндрическую структуру, как правило, с двумя утолщениями: шейным и поясничным. В СМ

входят дорсальные корешки, сформированные аксонами клеток спинальных ганглиев. На основании локализации регулярно расположенных зон входа этих корешков СМ подразделяют на сегменты [1]. Деление СМ на сегменты имеет практическое значение: нейронные сети различных групп сегментов контролируют, в частности, локомоторные, постуральные и висцеральные функции [2, 3]. При повреждении СМ возможно восстановление его функций путем адресной активации данных нейронных сетей, например с помощью эпидуральной стимуляции имплантируемыми электродами.

Для обеспечения точного хирургического доступа к конкретным сегментам СМ необходимо знать их расположение по отношению к телам позвонков, формирующих позвоночный канал, внутри которого эти сегменты находятся. Если бы границы сегментов СМ соответствовали границам одноименных позвонков, задача определения положения стимулируемого сегмента была бы достаточно легкой: порядковый номер позвонка можно определить посредством пальпации или интраоперационно (зная его характерные анатомические особенности), используя рентгеновский снимок или данные компьютерной томографии. Однако у млекопитающих сегменты СМ смещены роstralно относительно одноименных позвонков, что называют “восхождением” СМ [1]. Восхождение СМ приводит к тому, что корешки дорсальных ганглиев сегментов поясничного утолщения СМ лежат в непосредственной близости друг от друга [4, 5], что затрудняет автоматизацию определения номера сегмента на основе собственно анализа МРТ-изображений СМ, требуя ручной работы эксперта, ориентирующегося, в частности, на наборы эталонных изображений [6].

Для некоторых видов животных (например, кролик, овца, свинья, обезьянообразные) позвоночная формула может иметь значительную индивидуальную вариабельность [7–10]. Например, кролики в одной популяции, имея 13 грудных позвонков, могут иметь как 6, так и 7 поясничных позвонков [8], овцы, имея суммарно 20 грудных и поясничных позвонков, могут иметь 13 грудных и 7 поясничных или же 14 грудных и 6 поясничных позвонков [9]. Таким образом, для каждого варианта позвоночной формулы в рамках вида существует свое топографическое соотношение положения сегментов к положению позвонков (скелетотопия). Вариабельность положения сегментов поясничного отдела присутствует и в рамках одного варианта позвоночной формулы. Например, у человека нижняя граница поясничного отдела СМ может находиться как в позвонке VT12, так и в позвонке VL1 [6], у кошки нижняя граница поясничного отдела СМ может находиться как в начале, так и в конце позвонка VL5 [11] (рис. 1а). Несмотря на данную вариабельность, предположительно ухудшающую качество прогноза в каудальном направлении [11], позвонки в качестве реперных точек для оценки положения сегментов используются как в автоматических методах определения номера сегмента СМ человека на изображениях, полученных с помощью МРТ [12, 13], так и в алгоритмах определения положения сегментов СМ свиньи (поясничные сегменты по отношению к VL2 [14]) и кошки (нижние крестцовые сегменты по отношению к VL4/VL5 [15], поясничные и крестцовые сегменты по отношению к VL2 [11]).

Важную дополнительную информацию о положении сегментов могут дать изображения поперечных срезов сегментов, полученные в результате МРТ или же гистологического исследования. Такие изображения позволяют использовать для определения принадлежности участка СМ к определенному сегменту, а также методы анализа на основе сравнения с эталоном. Для некоторых видов животных, включая человека, существуют атласы, содержащие эталонные изображения поперечных срезов различных сегментов СМ [16–19], поэтому для эксперта форма серого вещества является достаточно надежным признаком для определения большинства сегментов. В настоящее время подобные атласы используются для более точного выделения областей белого и серого вещества в шейном отделе СМ человека [20]. Полагаем, информация о форме серого вещества может способствовать улучшению качества алгоритмов предсказания положения сегментов.

Цель настоящей работы – выбор методов оценки подобия изображений поперечных срезов СМ млекопитающих, оптимальных для установления принадлежности к определенному сегменту, на примере срезов поясничного отдела СМ кошки. Сегменты этого отдела, во-первых, являются мишенью для разных видов стимуляции, направленной на восстановление локомоции и постуральных функций, во-вторых, их восхождение наиболее выражено, что дополнительно затрудняет точный прогноз их положения. Работа подразделена на две части. В первой части рассмотрены методы, использующиеся для сравнения изображений объектов, обладающих сходными линейными размерами (рис. 1б), в данной работе – это срезы, принадлежащие одному животному. Это метод, основанный на коэффициенте Жаккара, используемый, например, при оценке качества сегментации изображений головного [21] и спинного [22] мозга, а также метод, основанный на оценке расстояния между контурами, используемый тогда, когда, как и в нашем случае, объект имеет один контур [23]. Во второй части рассмотрены методы, инвариантные к размеру изображений объектов, в данной работе – это срезы, принадлежащие не только одному, но и различным животным, взятые из различных литературных источников. Это корреляционный анализ R -ф кривых, которые используются для описания формы частиц [24, 25], а также метод оценки сходства на основе инвариантных моментов Ху, которые широко используются для классификации объектов [26].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись изображения серого вещества поперечных срезов поясничных сегментов СМ кошки домашней (*Felis catus*), представленных в атласах [16] и [19] (сегменты L1 – L7) (рис. 1с), а также в работе [5] (сегменты L4 – L7). Классически серое вещество СМ подразделяют на три области: дорсальные и вентральные рога и расположенное между ними промежуточное серое вещество, у части сегментов включающее также латеральные рога – боковые разрастания серого вещества за счет локализации в них ядер симпатической системы. У кошки латеральные рога присутствуют не во всех сегментах интереса, но лишь в L1 – L4 [16], поэтому для унификации область серого вещества СМ после предварительной бинаризации изображения вручную делили на две части: верхнюю (дорсальную) и нижнюю (вентральную), горизонтальной линией, проходящей через середину центрального канала СМ. Такое деление физиологически обосновано, так как форма дорсальных рогов и ее изменение в rostrocaudальном направлении связаны с количеством сенсорных входов и особенностями обработки сенсорной информации в данном регионе СМ, а форма вентральных рогов и ее изменение связаны преимущественно с организацией мотонейронных пулов и связей между ними [27].

В атласе [16] приведено по одному индивидуальному срезу (толщиной 100 мкм) от каждого сегмента, в то время как в атласе [19] приведено по два индивидуальных среза (толщиной 50 мкм) (начало и конец сегмента) для сегментов L1 – L3 и по три индивидуальных среза (начало, середина и конец сегмента) для сегментов L4 – L7. Поэтому изображения из более полного, второго, атласа рассматривались как “базовые”; для них определяли взаимную схожесть формы серого вещества на срезах СМ, полученных от одного животного, с ними сравнивались изображения из атласа [16] и работы [5].

Взаимную схожесть изображений серого вещества определяли с помощью:

а) *коэффициента Жаккара* (Intersection over Union, IOU):

$$IOU(i, j) = \frac{\Sigma IntersectImg(i, j)}{\Sigma UnionImg(i, j)},$$

где $IntersectImg(i, j) = Img_i \cap Img_j$ – пиксели пересечения областей серого вещества изображений i и j , а $UnionImg(i, j) = Img_i \cup Img_j$ – пиксели объединения областей

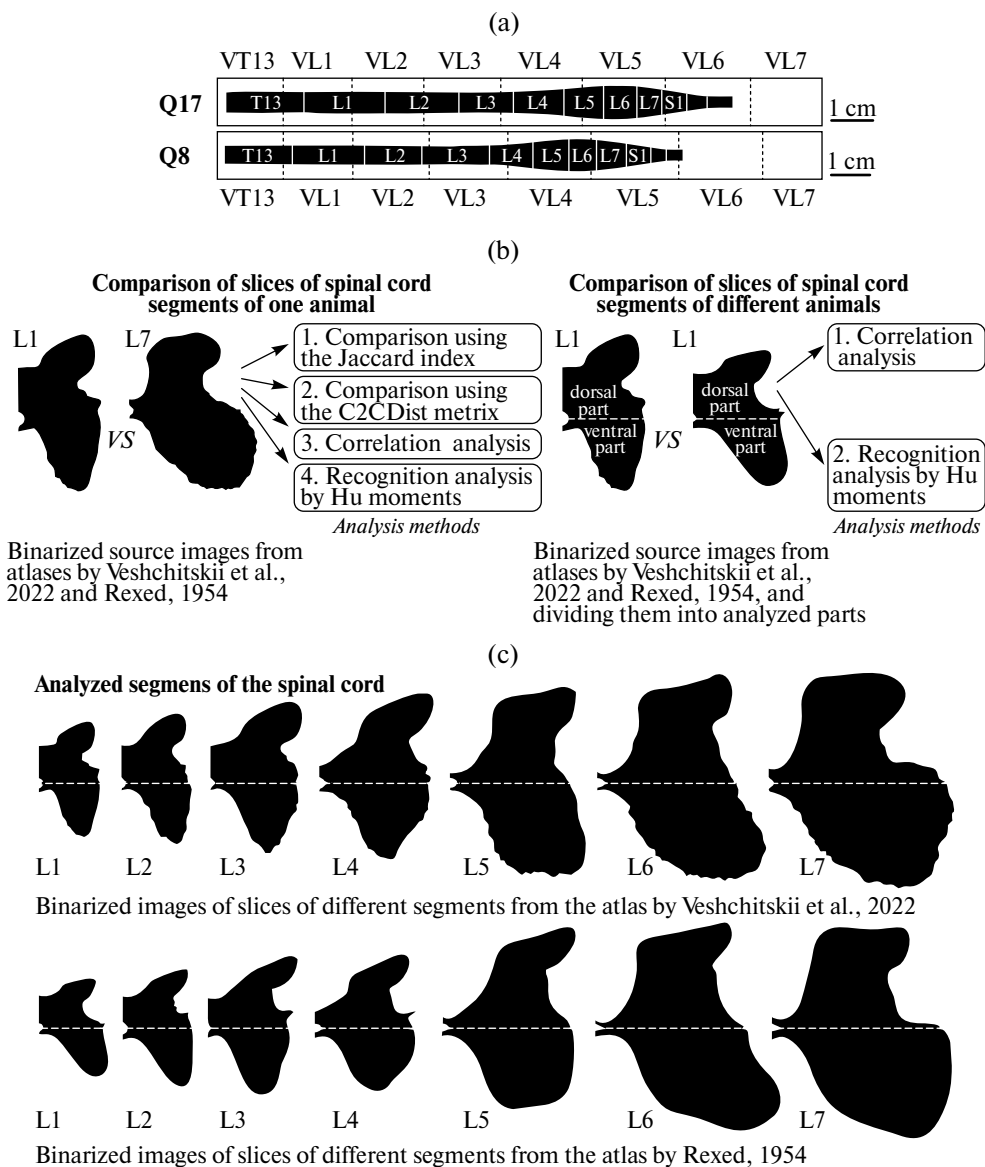


Рис. 1. (a) – Примеры вариабельности скелетотопии поясничных сегментов спинного мозга кошки (для отдельных животных Q8 и Q17) по отношению к позвонкам (по [11]). Методы оценки подобия серого вещества различных сегментов спинного мозга (b) и (c), примеры бинаризованных изображений серого вещества спинного мозга (сегменты L1 – L7) из атласов [16] и [19]. Через центр центрального канала проведена белая штриховая горизонтальная линия, делящая серое вещество на две анализируемые области: дорсальную и вентральную части.

серого вещества изображений i и j (рис. 2a, b). Значения IOU лежат в диапазоне от 0 (полное несходство областей) до 1 (полное совпадение областей);

б) метрики расстояний между контурами $C2Cdist$. На изображении среза i , состоящем из точек P_i , выделяли контур серого вещества K_i . Определяли расстояние

Comparison using the Jaccard index

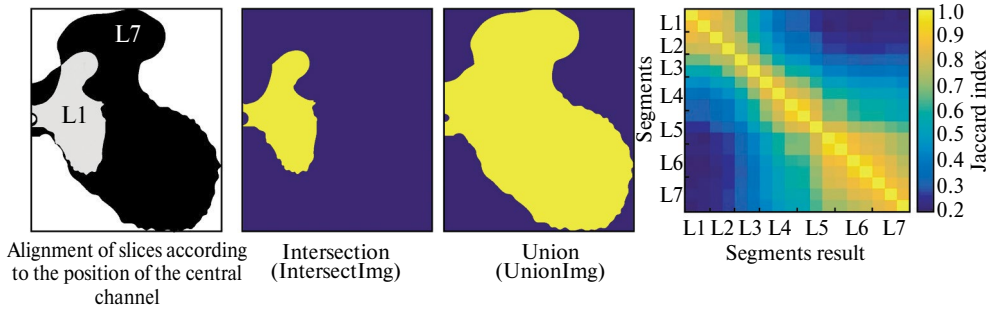


Рис. 2. Расчет сходства изображений серого вещества срезов спинного мозга с помощью коэффициента Жаккара (на примере срезов сегментов L1 и L7 из атласа [19]). (а) – Срезы сегментов L1 и L7, совмещенные по положению центрального канала; (б) – пересечение (*IntersectImg*) и объединение (*UnionImg*) областей; (с) – тепловая карта результатов анализа срезов атласа.

в Евклидовой метрике от всех точек P_i до K_i (рис. 3а), $Dist(P_i, K_i)$. На изображении среза j выделяли контур серого вещества K_j (рис. 3б). Выделяли на изображении i точки (рис. 3с), принадлежащие контуру K_j : $P_i \cap K_j$. Среднее расстояние на изображении i от точек, принадлежащих K_j до K_i вычисляли как:

$$C2Cdist(i, j) = \frac{Dist(P_i \cap K_j, K_i)}{N_j},$$

где N_j – количество пикселей в контуре K_j [23]. Значение $C2Cdist$ равно 0 при полном совпадении контуров областей и увеличивается по мере уменьшения их сходства.

Перед расчетом IOU и $C2Cdist$ каждую пару срезов выравнивали по вышеупомянутой горизонтальной линии, проходящей через центр центрального канала.

Для сравнения срезов, полученных не только из одного, но и из различных источников, использовали следующие методы.

1. *Корреляция Пирсона R-ф кривых.* Для каждого изображения (отдельно для дорсальной и вентральной частей среза), аналогично подходу, используемому для анализа формы частиц [25], строили R -ф кривую, т.е. для каждого угла ϕ находили расстояние от центра центрального канала до наиболее удаленной точки серого вещества (рис. 4а). Далее для полученных наборов значений находили коэффициент корреляции Пирсона. Для пар срезов, относящихся к одному сегменту, полученные коэффициенты корреляции усредняли по всем парам и по вентральной и дорсальной части среза. Значение коэффициентов корреляции равно 1 при полном подобии таких наборов расстояний и уменьшается по мере уменьшения их сходства.

2. *Инвариантные моменты Ху* [28]. Представляют собой комбинации нормализованных пространственных моментов с порядком до третьего включительно. Они остаются неизменными при перемещении, повороте и масштабировании изображения. Для контура серого вещества каждого среза (отдельно для его дорсальной и вентральной части) определяли набор H_k из 7 моментов Ху. Далее находили меру подобия D между контурами серого вещества срезов i и j как

$$D(i, j) = \sum_{k=1}^7 \left| \frac{1}{M_{ik}} - \frac{1}{M_{jk}} \right|,$$

где $M_k = \text{sign}(H_k) \log |H_k|$.

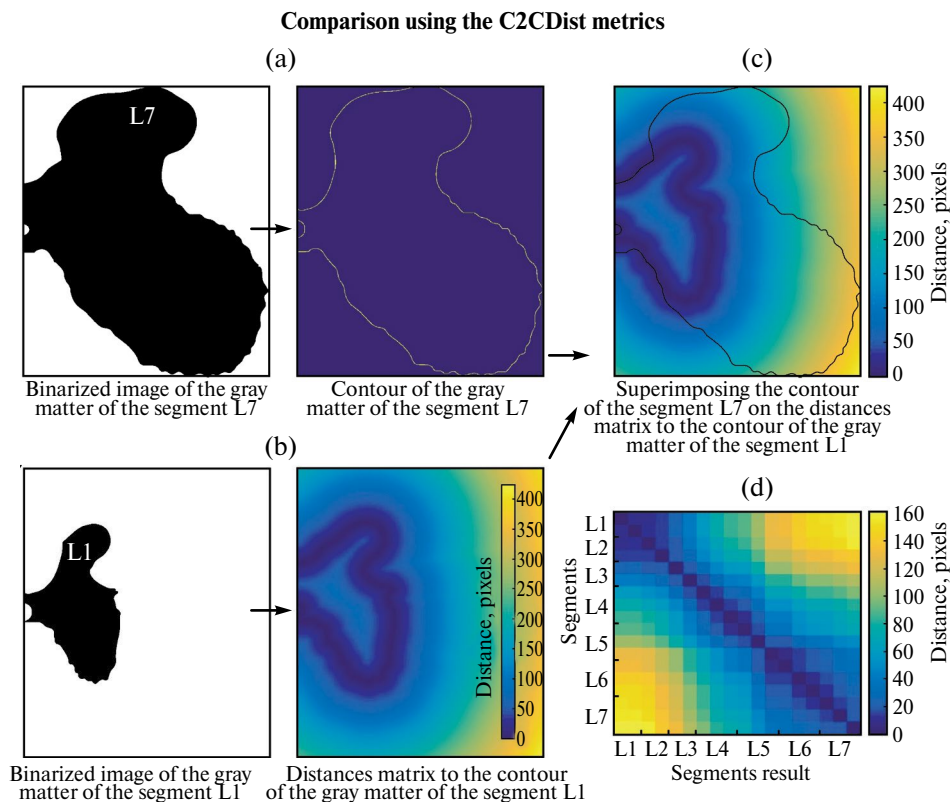


Рис. 3. Расчет сходства изображений срезов серого вещества спинного мозга в метрике расстояний между контурами *C2Cdist* (на примере срезов сегментов L1 и L7 из атласа [19]). (а) – Получение контура серого вещества из бинаризованного изображения среза сегмента L7; (б) – получение матрицы расстояний до контура серого вещества сегмента L1; (с) – проекция контура серого вещества среза L7 на матрицу расстояний до контура серого вещества среза L1; (д) – тепловая карта результатов анализа срезов атласа.

Для пар срезов, относящихся к одному сегменту, полученные значения D усредняли по всем парам и по вентральной и дорсальной части среза. При максимальном подобии между контурами значение D равно 0, оно увеличивается по мере уменьшения сходства срезов.

Расчет сходства срезов с помощью коэффициента Жаккара и в метрике расстояний между контурами, а также вычисление корреляций были реализованы в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB (Mathworks, Natick, MA, США), расчет инвариантных моментов H_u был проведен с использованием библиотеки алгоритмов компьютерного зрения OpenCV в среде разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio (Microsoft, Редмонд, Вашингтон, США).

Статистический анализ. Данные в тексте и на графиках представлены в виде среднего $\pm$ стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет меры сходства между областями серого вещества срезов различных сегментов СМ показал, что по мере увеличения расстояния между срезами (и, следовательно, между номерами сегментов, содержащих эти срезы) монотонно уменьшается

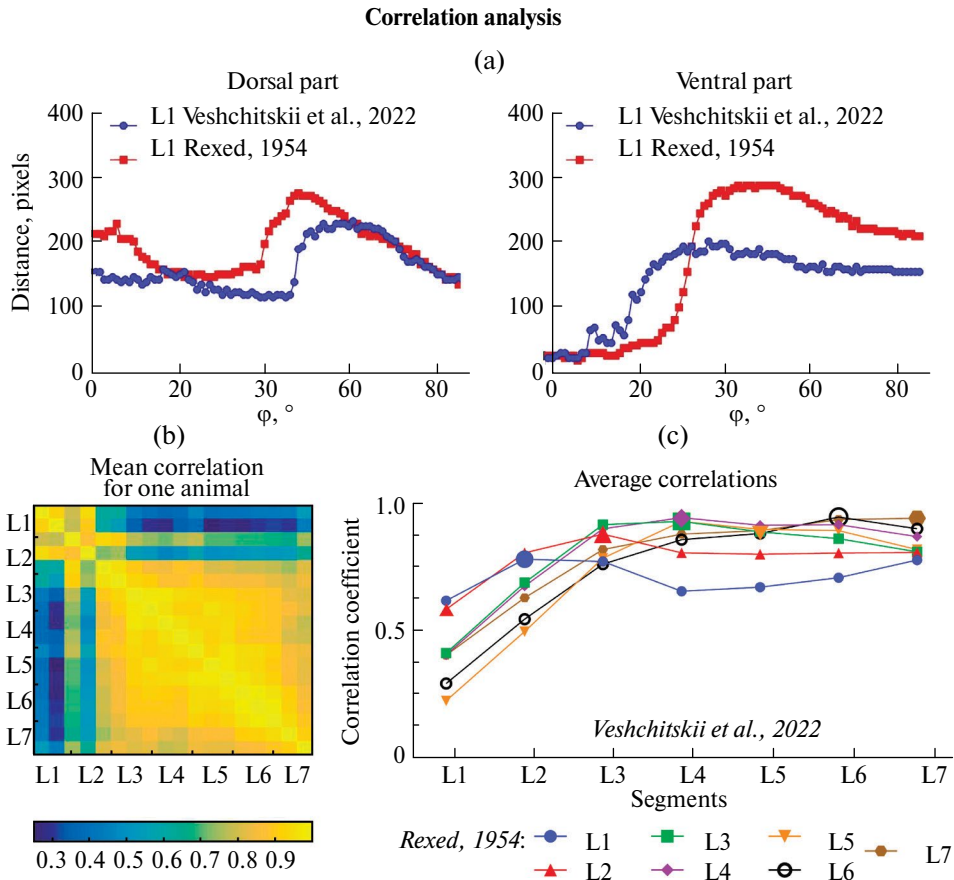


Рис. 4. Корреляционный анализ контуров, ограничивающих серое вещество срезов. (а) – Расчет коэффициента корреляции между контурами, ограничивающими серое вещество срезов, взятых из двух атласов [16] (красный) и [19] (синий). На диаграммах представлен набор расстояний в пикселях от центра центрального канала спинного мозга до наиболее удаленных от него точек серого вещества – на примере срезов сегмента L1 атласов [16] и [19], ϕ – угол от центра центрального канала. Слева – дорсальная область интереса, справа – вентральная область интереса. (б) – Тепловая карта результатов анализа срезов атласа [19]. (с) – Результаты корреляционного анализа: средние значения корреляций Пирсона между всеми сегментами (L1 – L7) атласов [16] и [19]. Большим символом для каждого сегмента атласа [16] выделен сегмент атласа [19], имеющий с ним наибольшее сходство.

коэффициент Жаккара и, соответственно, увеличивается расстояние между контурами в метрике C2CDist (рис. 2с, 3d). Согласно обеим вычислительным процедурам, наиболее различающимися являются срезы сегментов L1 и L7, что хорошо видно на рис. 1б.

Для срезов, полученных от одного животного, значения *коэффициента корреляции Пирсона* R -ф кривых образуют два кластера (срезы сегментов L1 – L2 и L3 – L7), разделенные низкими значениями коэффициента корреляции (рис. 4б). Аналогично рассмотренным прежде методам, наиболее непохожи друг на друга нижние поясничные и верхние поясничные сегменты.

Для срезов, полученных из различных источников, средние значения коэффициента корреляции Пирсона растут по мере увеличения номера сегментов (рис. 4с, наибольший символ на каждой кривой соответствует максимальному коэффициенту

корреляции между данным сегментом атласа [16] и сегментами атласа [19] – наибольшие величины корреляции показаны при сравнении с контурами серого вещества срезов сегментов L4 – L7, размах отличий коэффициентов корреляций между срезами различных сегментов в этой области выражен слабо. Средние значения коэффициентов корреляций серого вещества срезов сегментов L3 – L7 атласа [16] со срезами сегмента L5 атласа [19] составляют от 0.89 до 0.92. С помощью подобного корреляционного анализа возможно правильно соотнести 3 из 7 сегментов интереса (L4, L6, L7). Другие 4 сегмента атласа [16] более похожи на соседние сегменты атласа [19], чем на одноименные сегменты (L1 – на L2, L2 – на L3, L3 и L5 – на L4).

Для срезов, полученных от одного животного, мера подобия, построенная на основе *инвариантных моментов* X_u , дает наименьшие отличия для соседних срезов, в то время как в наибольшей степени отличаются средние поясничные сегменты от верхних и нижних поясничных (рис. 5а).

Эта мера подобия оказалась более удачной для сопоставления срезов, полученных из различных источников (рис. 5б, большими символами для каждого сегмента атласа [16] выделен сегмент атласа [19], имеющий с ним наименьшее отличие, т.е. минимальное значение величины D). С помощью такой меры возможно правильно отнести 5 из 7 сегментов интереса (L1, L2, L4, L6, L7). Другие 2 сегмента атласа [16] более похожи на соседние сегменты атласа [19], чем на одноименные сегменты (L3 и L5 – на L4).

Для дальнейшей проверки возможности использования этой меры подобия для определения номера сегмента СМ были взяты контуры срезов серого вещества сегментов L4 – L7 семи животных из работы [5]. Средние кривые подобия для этих контуров подобны полученным для атласа [16] (рис. 5с). Для каждого сегмента каждого животного определяли сегмент атласа [19] по минимальному значению величины D . Сегменты L4 и L7 корректно атрибутируются у 5 животных из 7 ($D = 0.14 \pm 0.04$ и $D = 0.13 \pm 0.05$ соответственно), L5 и L6 – у 6 животных из 7 ($D = 0.12 \pm 0.04$ и $D = 0.08 \pm 0.02$ соответственно). В случае неверного опознания ошибка определения номера составляет один сегмент – сегмент L4 атрибутируется как сегмент L3, L5 – как L4, L6 – как L7, а L7 – как L6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время автоматические методы сегментации изображений СМ направлены на отделение элементов, принадлежащих собственно СМ, от элементов, принадлежащих окружающим тканям [29]. Это позволяет автоматически выделять на изображении поперечного среза СМ как его части (дорсальные и вентральные рога серого вещества, комиссуры, канатики белого вещества), так и границы очагов повреждений [30]. При этом проблема автоматизированного выделения сегментов СМ остается актуальной.

В литературе известно несколько экспертных стратегий отнесения изображений поперечных срезов СМ к определенному сегменту или же отделу СМ. В работе [31] на основе анализа многочисленных срезов поясничного и крестцового отдела СМ кошки предлагалось рассматривать поясничное утолщение кошки без деления на сегменты, как единый отдел. При этом авторы определяли координаты поперечных срезов этого отдела по отношению к его началу, определяемому по появлению расширения вентральных рогов, содержащих пулы мотонейронов, иннервирующих мышцы задних конечностей. Мы не согласны с первым предположением авторов, поскольку деление СМ на отдельные сегменты не вызывает сомнений и необходимо для детализации топографического положения описываемого участка СМ [32]. Именно поэтому как цитоархитектонические атласы СМ, так и анализ

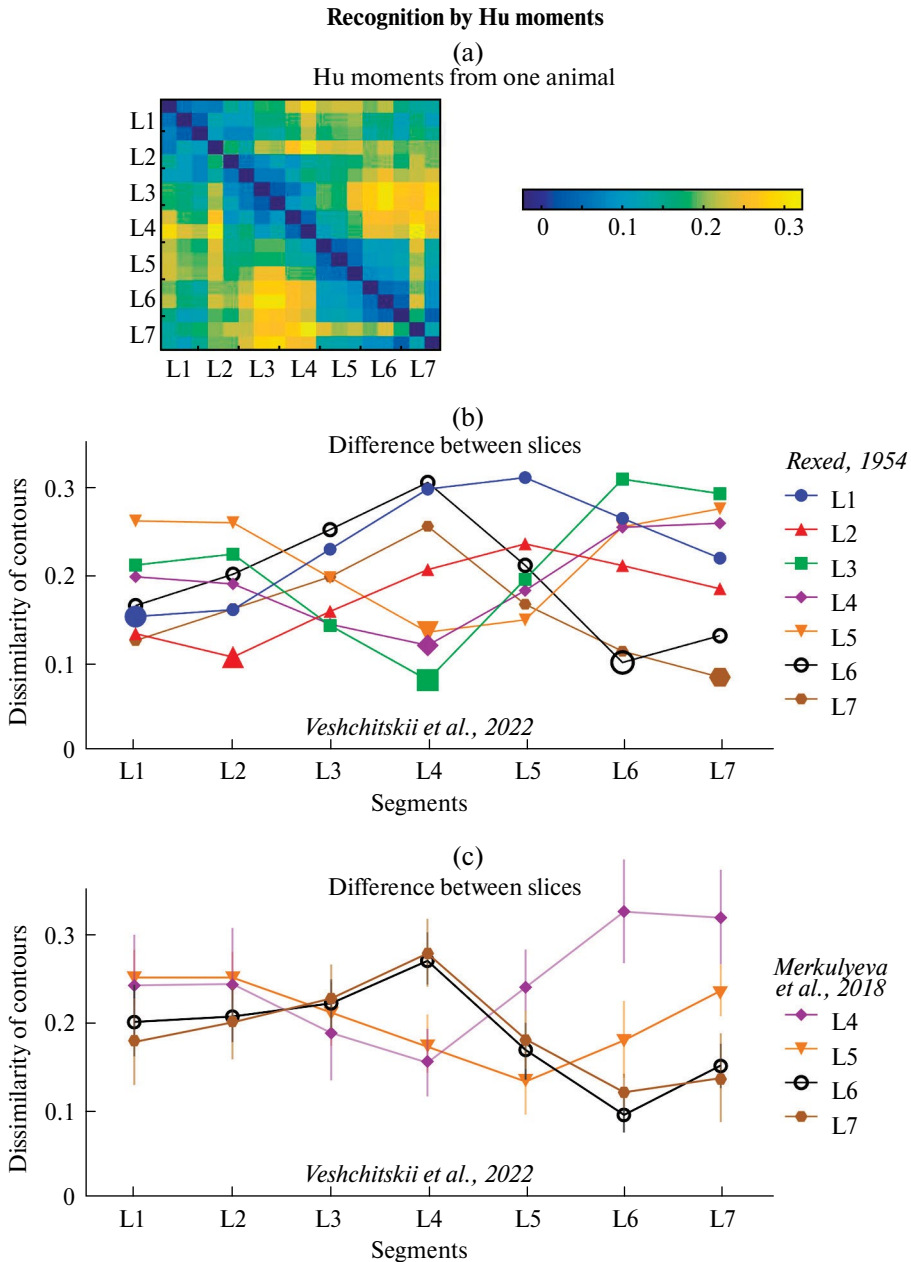


Рис. 5. Анализ контуров, ограничивающих серое вещество срезов, на основе инвариантных моментов Ху. (a) – Тепловая карта результатов анализа срезов атласа [19]; (b) – среднее несоответствие контуров для всех сегментов (L1 – L7) атласов [16] и [19], вычисленное на основе инвариантных моментов Ху. Большим символом для каждого сегмента атласа [16] выделен сегмент атласа [19], имеющий с ним наименьшее отличие; (c) – среднее несоответствие контуров для сегментов (L4 – L7) из работы [5] с сегментами L1 – L7 атласа [19]. Приведены значения средней величины $\pm$ стандартное отклонение.

МРТ-изображений традиционно основываются на сегментарном подходе. При этом полагаем использование формы срезов СМ, указанный в [31], полезным критерием для деления СМ, хотя предложенный авторами подход применялся лишь в последующей работе того же коллектива авторов [33]. Сходная стратегия деления СМ на сегменты была предложена в [34]: выделение шейных и поясничных сегментов СМ мышцы классифицировались на основе локализации в вентральных рогах мотонейронных пулов (но не формы серого вещества). Иная стратегия определения сегментов СМ, основанная на прослеживании хода спинномозговых корешков по последовательности изображений томографических срезов СМ человека, была использована в работах [6, 12] для поясничного [6] и шейного [12] отделов, при этом в [6] эти данные были также сопоставлены с формой срезов на томографических и гистологических изображениях СМ.

Индивидуальные положения сегментов, полученные в [12], позволили построить вероятностную карту положения каждого шейного сегмента СМ. Далее этот подход был распространен на иные отделы СМ человека [13]. Среднее положение сегментов, полученное в [12], отличается от положения сегментов, оцениваемых *post mortem*, приблизительно на длину одного шейного сегмента (порядка 9 мм, [35]). Используемый в [12] подход к прогнозированию положения сегментов СМ человека качественно подобен подходу, используемому нами ранее при прогнозировании положения поясничных и крестцовых сегментов СМ кошки [11]. Аналогично нашим данным [11], можно предполагать, что качество прогноза положения сегментов СМ человека будет ухудшаться в каудальном направлении. Отметим, что в литературе также существует способ деления грудного отдела СМ на одинаковые части (мышь, [34]). Несмотря на то, что большинство сегментов, входящих в его состав, имеют сходную форму поперечных срезов, мы не придерживаемся данного подхода, тем более что у исследованных видов грызунов и приматов длины разных сегментов грудного отдела значительно различаются [36–40].

Таким образом, в настоящее время определение сегмента СМ на основе МРТ-изображений осуществляется путем визуальной экспертной оценки и комплексного анализа последовательности срезов, а также сравнения с эталонными изображениями [6]. В случае же использования автоматизированных методов [12] полученная оценка положения сегмента может значительно расходиться с оценкой положения сегмента на основе гистологических исследований. Дальнейшая разработка методов сравнения изображений срезов СМ, в том числе – сопоставления их с эталонными, является актуальной задачей, способствующей развитию автоматического сегментирования гистологических и томографических данных.

В настоящей работе мы сравнивали эффективность методов оценки подобия срезов СМ, используя коэффициент Жаккара, метрику расстояний между контурами, корреляционный анализ R -ф кривых и инвариантные моменты Ху. Метрика, основанная на коэффициенте Жаккара, и метрика C2CDist позволяют определять степень подобия срезов *в пределах одного и того же животного*. Их достоинства одновременно являются и недостатками – они эксплицитно (в случае коэффициента Жаккара) и имплицитно (в случае метрики C2CDist) учитывают отличия не только в форме контура, но и в площадях серого вещества на различных срезах. Собственно площадь серого вещества является информативным параметром, так как значительно зависит от номера поясничного сегмента, увеличиваясь в пределах поясничного утолщения, а затем снова уменьшаясь в крестцовом и копчиковом отделах. Между тем площадь срезов одноименных сегментов СМ *у различных животных* может отличаться, например в случае отличий длины и/или массы тела. Это означает, что следует вводить некоторый коэффициент растяжения изображений срезов одного животного по отношению к другому. Для мышей линии C57BL/6J с фиксированной позвоночной формулой для этого может быть использован пакет elastix [41], позволяющий соотносить срез СМ с предзаданным

сегментом с помощью трехмерных аффинных преобразований с последующими трехмерными B-сплайн преобразованиями [42].

Однако разработка принципов такого масштабирования представляется несколько затруднительной задачей для видов, обладающих вариабельной позвоночной формулой, и требует дополнительных исследований на значительной выборке животных. Поэтому для сравнения срезов, полученных не только от одного животного, но и из различных источников (атласов [16] и [19]), мы обратились к методам, инвариантным к масштабу изображений. Предполагается, что описание контура с помощью R -ф кривых более эффективно для распознавания некоторых классов частиц, чем описание, основанное на моментах X_u [24]. Между тем для контуров серого вещества СМ оно уступает описанию, основанному на моментах X_u . Мера подобия контуров, основанная на моментах X_u , показала свою эффективность, вероятность правильного опознавания сегмента при ее использовании превышает 70%, при этом возможная ошибка опознавания составляет один сегмент. С практической точки зрения одновременное использование изображений различных фрагментов поясничного утолщения СМ, учет их взаимного положения (например, сегмент L7 не может быть расположен выше сегмента L6), а также учет потенциальной зоны расположения сегмента относительно позвонков [11] может повысить качество распознавания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами проведено сравнение эффективности нескольких методов оценки подобия гистологических срезов СМ, принадлежащих как одному, так и разным животным. Коэффициент Жаккара и метрика расстояний между контурами позволили определить степень подобия срезов, полученных от одного животного. Инвариантные моменты X_u пригодны для распознавания изображений сегментов СМ, полученных из различных источников. Полученные результаты позволяют предположить, что способ определения сегментов СМ через сравнение томографических или гистологических изображений поперечных срезов СМ на разных уровнях с некоторой базой данных, содержащей набор эталонных изображений срезов конкретных сегментов, является достаточно эффективным. При этом, по-видимому, для оценки сходства срезов возможно использовать меру подобия контуров на основе инвариантных моментов X_u .

ВКЛАДЫ АВТОРОВ

Идея работы (В. А. Л., П. Ю. Ш.), сбор данных (П. Ю. Ш., Н. С. М., А. А. В.), обработка данных (В. А. Л.), написание и редактирование манускрипта (П. Ю. Ш., В. А. Л., Н. С. М., А. А. В.).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами федерального бюджета в рамках государственного задания Института физиологии им. И.П. Павлова РАН (регистрационный номер 1021062411653-4-3.1.8).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием людей или животных в качестве объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nieuwenhuys R* (1964) Comparative anatomy of the spinal cord. *Prog Brain Res* 11: 1–57. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)64043-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)64043-1)
2. *Порсева ВВ, Шилкин ВВ* (2016) Строение серого вещества спинного мозга: неопределенности и перспективы исследования. *Тихоокеанск мед журн* 64: 20–30. [*Porseva VV, Shilkin VV* (2016) Gray matter structure of the spinal cord: Uncertainties and research prospects. *Tikhookeansk med zhurn* 64: 20–30. (In Russ)].
3. *Shah PK, Sureddi S, Alam M, Zhong H, Roy RR, Edgerton VR, Gerasimenko Y* (2016) Unique spatiotemporal neuromodulation of the lumbosacral circuitry shapes locomotor success after spinal cord injury. *J Neurotrauma* 33: 1709–1723. <https://doi.org/10.1089/neu.2015.4256>
4. *Wenger N, Moraud EM, Gandar J, Musienko P, Capogrosso M, Baud L, Le Goff CG, Barraud O, Pavlova N, Dominici N, Mineev IR, Asboth L, Hirsch A, Duis S, Kreider J, Mortera A, Haverbeck O, Kraus S, Schmitz F, DiGiovanna J, van den Brand R, Bloch J, Detemple P, Lacour SP, Bézard E, Micera S, Courtine G* (2016) Spatiotemporal neuromodulation therapies engaging muscle synergies improve motor control after spinal cord injury. *Nat Med* 22: 138–145. <https://doi.org/10.1038/nm.4025>
5. *Merkulyeva N, Veshchitskii A, Gorsky O, Pavlova N, Zelenin PV, Gerasimenko Y, Deliagina TG, Musienko P* (2018) Distribution of spinal neuronal networks controlling forward and backward locomotion. *J Neurosci* 38: 4695–4707. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2951-17.2018>
6. *Mesbah S, Herrity A, Ugiliweneza B, Angeli C, Gerasimenko Y, Boakye M, Harkema S* (2022) Neuroanatomical mapping of the lumbosacral spinal cord in individuals with chronic spinal cord injury. *Brain Commun* 5: cac330. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcac330>
7. *Fredeen HT, Newman JA* (1962) Rib and vertebral numbers in swine: I. Variation observed in a large population. *Can J Anim Sci* 42: 232–239. <https://doi.org/10.4141/cjas62-036>
8. *Greenaway J, Partlow G, Gonsholt N, Fisher K* (2001) Anatomy of the lumbosacral spinal cord in rabbits. *J Am Anim Hosp Assoc* 37: 27–34. <https://doi.org/10.5326/15473317-37-1-27>
9. *Li C, Zhang X, Cao Y, Wei J, You S, Jiang Y, Cai K, Wumaier W, Guo D, Qi J, Chen C, Ni W, Hu S* (2017) Multi-vertebrae variation potentially contribute to carcass length and weight of Kazakh sheep. *Small Rumin Res* 150: 8–10. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.02.021>
10. *Williams SA, Russo GA* (2015) Evolution of the hominoid vertebral column: The long and the short of it. *Evol Anthropol Issues News Rev* 24: 15–32. <https://doi.org/10.1002/evan.21437>
11. *Shkorbatova PolinaY, Lyakhovetskii VA, Merkulyeva NS, Veshchitskii AA, Bazhenova EY, Laurens J, Pavlova NV, Musienko PE* (2019) Prediction algorithm of the cat spinal segments lengths and positions in relation to the vertebrae. *Anat Rec* 302: 1628–1637. <https://doi.org/10.1002/ar.24054>
12. *Cadotte DW, Cadotte A, Cohen-Adad J, Fleet D, Livne M, Wilson JR, Mikulis D, Nugaeva N, Fehlings MG* (2015) Characterizing the location of spinal and vertebral levels in the human cervical spinal cord. *Am J Neuroradiol* 36: 803–810. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4192>
13. *De Leener B, Lévy S, Dupont SM, Fonov VS, Stikov N, Louis Collins D, Callot V, Cohen-Adad J* (2017) SCT: Spinal Cord Toolbox, an open-source software for processing spinal cord MRI data. *NeuroImage* 145: 24–43. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.10.009>
14. *Cuellar CA, Mendez AA, Islam R, Calvert JS, Grahn PJ, Knudsen B, Pham T, Lee KH, Lavrov IA* (2017) The role of functional neuroanatomy of the lumbar spinal cord in effect of epidural stimulation. *Front Neuroanat* 11: 82. <https://doi.org/10.3389/fnana.2017.00082>
15. *Eldridge L* (1984) Vertebral location of cord segments innervating cat hind limb musculature. *Exp Neurol* 83: 193–198. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(84\)90057-8](https://doi.org/10.1016/0014-4886(84)90057-8)
16. *Rexed B* (1954) A cytoarchitectonic atlas of the spinal cord in the cat. *J Comp Neurol* 100: 297–379. <https://doi.org/10.1002/cne.901000205>

17. *Sengul G, Watson C, Tanaka I, Paxinos G* (2013) Atlas of the spinal cord of the rat, mouse, marmoset, rhesus, and human. Elsevier AP. Amsterdam.
18. *Shek JW, Wen GY, Wisniewski HM* (1986) Atlas of the rabbit brain and spinal cord. Karger. Basel München Paris.
19. *Veshchitskii A, Shkorbatova P, Merkulyeva N* (2022) Neurochemical atlas of the cat spinal cord. *Front Neuroanat* 16: 1034395.
<https://doi.org/10.3389/fnana.2022.1034395>
20. *Asman AJ, Bryan FW, Smith SA, Reich DS, Landman BA* (2014) Groupwise multi-atlas segmentation of the spinal cord's internal structure. *Med Image Anal* 18: 460–471.
<https://doi.org/10.1016/j.media.2014.01.003>
21. *Despotović I, Goossens B, Philips W* (2015) MRI segmentation of the human brain: Challenges, methods, and applications. *Comput Math Methods Med* 2015: 450341.
<https://doi.org/10.1155/2015/450341>
22. *Fasse A, Newton T, Liang L, Agbor U, Rowland C, Kuster N, Gaunt R, Pirondini E, Neufeld E* (2024) A novel CNN-based image segmentation pipeline for individualized feline spinal cord stimulation modeling. *J Neural Eng* 21.
<https://doi.org/10.1088/1741-2552/ad4e6b>
23. *Shao H-C, Peng C-Y, Wu J-R, Lin C-W, Fang S-Y, Tsai P-Y, Liu Y-H* (2021) From IC layout to die photograph: A CNN-based data-driven approach. *IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circuits Syst* 40: 957–970.
<https://doi.org/10.1109/TCAD.2020.3015469>
24. *Liang C, Gao D, Hubert M, Yin X, Gao C* (2011) A boundary-line method for pattern recognition on real particles. *Powder Technol* 213: 155–161.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.07.028>
25. *Merkus HG* (2009) Particle Size, Size Distributions and Shape. In: *Particle Size Measurements*. Springer Netherlands. Dordrecht. 13–42.
26. *Iqbal K, Odetayo MO, James A* (2012) Content-based image retrieval approach for biometric security using colour, texture and shape features controlled by fuzzy heuristics. *J Comput Syst Sci* 78: 1258–1277.
<https://doi.org/10.1016/j.jcss.2011.10.013>
27. *Watson C, Paxinos G, Kayalioglu G* (2009) The spinal cord 1st ed. Elsevier/Acad Press. Amsterdam Boston.
28. *Hu M-K* (1962) Visual pattern recognition by moment invariants. *IEEE Trans Inf Theory* 8: 179–187.
<https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057692>
29. *Sáenz-Gamboa JJ, Domenech J, Alonso-Manjarrés A, Gómez JA, De La Iglesia-Vayá M* (2023) Automatic semantic segmentation of the lumbar spine: Clinical applicability in a multi-parametric and multi-center study on magnetic resonance images. *Artif Intell Med* 140: 102559.
<https://doi.org/10.1016/j.artmed.2023.102559>
30. *Tsagkas C, Horvath-Huck A, Haas T, Amann M, Todea A, Altermatt A, Müller J, Cagol A, Leimbacher M, Barakovic M, Weigel M, Pezold S, Sprenger T, Kappos L, Bieri O, Granziera C, Cattin P, Parmar K* (2023) Fully automatic method for reliable spinal cord compartment segmentation in multiple sclerosis. *Am J Neuroradiol* 44: 218–227.
<https://doi.org/10.3174/ajnr.A7756>
31. *Vanderhorst VGJM, Holstege G* (1997) Organization of lumbosacral motoneuronal cell groups innervating hindlimb, pelvic floor, and axial muscles in the cat. *J Comp Neurol* 382: 46–76.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9861\(19970526\)382:1<46::AID-CNE4>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9861(19970526)382:1<46::AID-CNE4>3.0.CO;2-K)
32. *Порсева ВВ, Шилкин ВВ* (2016) Сегмент спинного мозга: реальность или миф. В сб: Достижения и инновации в современной морфологии: сб трудов науч-практ конф посвящ 115-летию со дня рожд акад ДМ Голуба. Минск. Беларусь 101–104. [*Porseva VV, Shilkin VV* (2016) Spinal cord segment: Reality or myth. In: *Achievements and innovations in modern morphology: Collection of works of scientific and practical conference dedicated to the 115th anniversary of the birth of academ D Golub*. Minsk. Belarus 101–104. (In Russ)].
33. *Gross C, Ellison B, Buchman AS, Terasawa E, VanderHorst VG* (2017) A novel approach for assigning levels to monkey and human lumbosacral spinal cord based on ventral horn morphology. *PLoS One* 12: e0177243.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177243>
34. *Harrison M, O'Brien A, Adams L, Cowin G, Ruitenberg MJ, Sengul G, Watson C* (2013) Vertebral landmarks for the identification of spinal cord segments in the mouse. *NeuroImage* 68: 22–29.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.11.048>

35. Powers JM, Ioachim G, Stroman PW (2018) Ten key insights into the use of spinal cord fMRI. *Brain Sci* 8: 173.
<https://doi.org/10.3390/brainsci8090173>
36. Malinska J, Hubackova E, Malinsky J (1976) A topographical and quantitative anatomical study of the spinal cord in the mole. *Acta Univ Palacky Olomus Fac Med* 76: 169–178.
37. Ko H-Y, Park JH, Shin YB, Baek SY (2004) Gross quantitative measurements of spinal cord segments in human. *Spinal Cord* 42: 35–40.
<https://doi.org/10.1038/sj.sc.3101538>
38. Thomas CE, Combs CM (1965) Spinal cord segments. B Gross structure in the adult monkey. *Am J Anat* 116: 205–216.
<https://doi.org/10.1002/aja.1001160110>
39. Mendez A, Islam R, Latypov T, Basa P, Joseph OJ, Knudsen B, Siddiqui AM, Summer P, Staehnke LJ, Grahn PJ, Lachman N, Windebank AJ, Lavrov IA (2021) Segment-specific orientation of the dorsal and ventral roots for precise therapeutic targeting of human spinal cord. *Mayo Clin Proc* 96: 1426–1437.
<https://doi.org/10.1002/aja.1001160110>
40. Mustapha OA, Aderounmu OA, Olude MA, Okandeji ME, Akinloye AK, Oke BO, Olopade JO (2015) Anatomical studies on the spinal cord of the greater cane rat (*Thryonomys swinderianus*, Temminck) I: Gross morphometry. *Niger Vet J* 36: 1192–1202.
41. Klein S, Staring M, Murphy K, Viergever MA, Pluim J (2010) elastix: A toolbox for intensity-based medical image registration. *IEEE Trans Med Imaging* 29: 196–205.
<https://doi.org/10.1109/TMI.2009.2035616>
42. Fiederling F, Hammond LA, Ng D, Mason C, Dodd J (2021) Tools for efficient analysis of neurons in a 3D reference atlas of whole mouse spinal cord. *Cell Rep Methods* 1: 100074.
<https://doi.org/10.1016/j.crmeth.2021.100074>

Methods for Evaluating Gray Matter Contour Similarity in Transverse Slices of the Mammalian Spinal Cord

V. A. Lyakhovetskii^a, P. Yu. Shkorbatova^a, A. A. Veshchitskii^a, and N. S. Merkulyeva^{a,*}

^a*Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^{*}*e-mail: mer-natalia@yandex.ru*

The spinal cord may be divided into segments. The neural networks of different segment groups control, in particular, locomotion and visceral functions. Spinal cord segments serve as critical topographic landmarks for both experimental and therapeutic interventions. However, accurate identification of segment positions *in vivo*, particularly through automated methods, remains challenging: in mammals, some spinal cord segments are displaced rostrally (ascend) relative to their corresponding vertebrae, and the extent of this displacement varies even within a single species. One solution to this problem may be the use of reference images of slices of segments taken, for example, from histological atlases of the spinal cord. In this paper, we investigate various methods for analyzing the similarity of gray matter contours in transverse slices of the mammalian spinal cord, which allow us to determine whether a slice belongs to a certain segment. We consider the methods for analyzing slices obtained from one animal (based on the Jaccard coefficient, the metric of distances between contours, correlation analysis of R - ϕ curves, or Hu invariant moments), as well as the methods for comparing images of spinal cord segments with reference ones (correlation analysis of R - ϕ curves, Hu invariant moments). The results obtained allow us to assume that the method of determining segments by comparing tomographic or histological images of spinal cord transverse slices at different levels with a certain database containing a set of reference images of slices of specific segments, based on Hu invariant moments, is the most effective of those considered.

Keywords: Hu invariant moments, Jaccard index, spinal cord, segments, transverse slices classification