



Ходулев В.И.¹✉, Кобылко О.В.², Ковалев А.А.³

¹ Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь

² Гомельская областная клиническая больница, Гомель, Беларусь

³ Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

Клиническая и электронейромиографическая характеристика пациентов с радикулопатией L5

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: Ходулев В.И. – разработка концепции, дизайна исследования, анализ клинических данных, обзор публикаций по теме статьи, написание текста статьи, редактирование статьи; Кобылко О.В. – разработка концепции и дизайна исследования, сбор и анализ клинических данных, обзор публикаций по теме статьи, написание текста статьи, редактирование статьи; Ковалев А.А. – анализ клинических данных, обзор публикаций по теме статьи, написание текста статьи.

Подана: 04.02.2025

Принята: 05.05.2025

Контакты: khodulev@tut.by

Резюме

Введение. Радикулопатия L5 является наиболее распространенной одноуровневой радикулопатией, с которой встречаются специалисты в нейрофизиологических лабораториях. Электронейромиографические исследования при радикулопатии различаются, их трудно сравнивать друг с другом из-за отличий в критериях включения пациентов в исследование, методах электродиагностического тестирования и отсутствия золотого стандарта диагностики.

Цель. Определить клиническую и электронейромиографическую характеристику состояния нервов нижних конечностей и установить диагностическую значимость параметров F-волн, зарегистрированных при исследовании малоберцового и большеберцового нервов у пациентов с радикулопатией L5.

Материалы и методы. Был обследован 31 пациент с изолированной радикулопатией L5. Проведено клиническое обследование и электронейромиографическое исследование моторных волокон малоберцового, большеберцового и сенсорных волокон икроножного нервов. Анализировали амплитуду и площадь M-ответа, скорость проведения импульса, а также параметры F-волн: минимальную, среднюю и максимальную латентность, хронодисперсию, частоту встречаемости, среднюю и объединенную длительность всех полученных F-волн.

Результаты. У пациентов с радикулопатией L5 при неврологическом осмотре на стороне поражения выявлена изолированная слабость разгибателя большого пальца стопы у 38,7%, а разгибателя стопы и разгибателя большого пальца – у 16,1% ($p < 0,001$). Нарушение болевой чувствительности в дерматоме L5 выявлено в 90,3% случаев. При электронейромиографическом исследовании малоберцового нерва обнаружено снижение амплитуды и площади M-ответа с короткого разгибателя пальца. ROC-анализ параметров F-волны показал, что значение показателя площади под кривой оказалось наибольшим при анализе длительности F-волны при исследовании большеберцового нерва, чем латентностей F-волны и хронодисперсии



при исследовании малоберцового нерва, и, следовательно, свидетельствует о ее большей диагностической значимости.

Заключение. При радикулопатии L5 болевой синдром в нижних конечностях характеризовался как нейропатическими, так и считающимися ненейропатическими дескрипторами боли и провоцировался изменением положения тела. Основные электронейромиографические изменения были связаны со снижением амплитуды М-ответа с короткого разгибателя пальца при тестировании малоберцового нерва и увеличением длительности F-волны при исследовании большеберцового нерва. Подробный анамнез болевого синдрома, связанного с положением тела, клинические данные в сочетании с электрофизиологическими и нейровизуализационными методами могут обеспечить всестороннее понимание этой радикулопатии.

Ключевые слова: радикулопатия L5, электронейромиография, длительность F-волны, большеберцовый нерв, нейропатическая боль

Khodulev V.¹✉, Kabyłka A.², Kovalev A.³

¹ Republican Research and Clinical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus

² Gomel Regional Clinical Hospital, Gomel, Belarus

³ Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

Clinical and Electroneuromyographic Characteristics of Patients with L5 Radiculopathy

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: Khodulev V. – study concept and design, analysis, review of publications on the topic of the article, text editing; Kabyłka A. – study concept and design, clinical data collection and analysis, review of publications on the topic of the article, text writing and editing; Kovalev A. – clinical data collection and analysis, review of publications on the topic of the article, text writing and editing.

Submitted: 04.02.2025

Accepted: 05.05.2025

Contacts: khodulev@tut.by

Abstract

Introduction. L5 radiculopathy is the most common single-level radiculopathy encountered by specialists in neurophysiological laboratories. Electroneuromyographic studies of radiculopathy vary and are difficult to compare with each other due to differences in patient inclusion criteria, electrodiagnostic testing methods, and the lack of a diagnostic gold standard.

Purpose. To determine clinical and electroneuromyographic characteristics of the lower limb nerves and to establish the diagnostic significance of F-wave parameters recorded during peroneal and tibial nerves examination in patients with L5 radiculopathy.

Materials and methods. A total of thirty-one patients with isolated L5 radiculopathy were examined. A clinical examination and electroneuromyographic testing of the motor fibers of the peroneal, tibial and sensory fibers of the sural nerves were performed. The amplitude and area of the M-response, impulse conduction velocity, and F-wave parameters were analyzed: minimum, average, and maximum latency, chronodispersion, incidence, average and pooled duration of all obtained F-waves.

Results. In patients with L5 radiculopathy, the neurological examination on the affected side revealed the big toe extensor isolated weakness in 38.7%, and that of the foot extensors and big toe extensor in 16.1% ($p < 0.001$). Impaired pain sensitivity in the L5 dermatome was detected in 90.3% of cases. The electroneuromyographic examination of the peroneal nerve revealed a decrease in the amplitude and area of the M-response from the extensor digitorum brevis muscle. The ROC analysis of F-wave parameters showed that the area under the curve was higher for F-wave duration in the tibial nerve than for F-wave latencies and chronodispersion in the peroneal nerve, indicating its greater diagnostic value.

Conclusion. In L5 radiculopathy, lower limb pain was characterized by both neuropathic and non-neuropathic pain descriptors and was elicited by changes in body position. The main electroneuromyographic changes were associated with a decrease in the amplitude of the M-response from the extensor digitorum brevis muscle in the peroneal nerve and an increase in the F-wave duration in the tibial nerve. A detailed history of postural pain, clinical data, and electrophysiological and neuroimaging testing may provide a comprehensive understanding of this radiculopathy.

Keywords: L5 radiculopathy, electroneuromyography, F-wave duration, tibial nerve, neuropathic pain

■ ВВЕДЕНИЕ

Радикулопатия – это патологический процесс на уровне спинномозговых корешков, возникающий в результате механического и химического повреждения и проявляющийся болью, чувствительными или двигательными нарушениями в соответствующем дерматоме или миотоме, снижением или утратой соответствующих рефлексов. Правильный диагноз пояснично-крестцовой радикулопатии важен для своевременного и адекватного лечения. Ее диагностика основывается на анамнезе, клинической картине, данных нейровизуализации и нейрофизиологических исследованиях. Нейровизуализация имеет низкую специфичность, поскольку дегенеративные изменения и грыжа диска часто наблюдаются и у здоровых людей. Электрофизиологические исследования выявляют функциональные нарушения нервных волокон и особенно полезны в случаях с отрицательными результатами визуализации или нетипичными клиническими проявлениями [1].

Проведенные электронейромиографические (ЭНМГ) исследования при радикулопатии разнятся, их трудно сравнивать друг с другом из-за отличий в критериях включения пациентов в исследование, методах электродиагностического тестирования и отсутствия золотого стандарта диагностики пояснично-крестцовой радикулопатии [1, 2]. F-волна представляет собой низкоамплитудный поздний моторный ответ и отражает проводимость моторного сегмента нерва между точкой стимуляции и соответствующими мотонейронами в спинном мозге. Она особенно полезна при неинвазивной оценке проксимального сегмента периферического нерва, например нервного корешка. Анализ F-волн показал противоречивую чувствительность в различных исследованиях при диагностике радикулопатий. Наиболее частые ЭНМГ-изменения обнаруживают со стороны минимальной латентности F-волны [2, 3].



Однако до сих пор не ясно, какие параметры F-волны в большей степени изменяются при радикулопатии L5.

Радикулопатия L5 является наиболее распространенной одноуровневой радикулопатией, с которой встречаются специалисты в нейрофизиологических лабораториях. Во всех исследованиях без исключения принято считать, что при радикулопатии L5 тестирование и анализ F-волны проводятся путем стимуляции малоберцового нерва с записью с короткого разгибателя пальцев, который иннервируется L5-корешком. Тогда как при радикулопатии S1 исследуется большеберцовый нерв с записью с мышцы, отводящей большой палец стопы, которая иннервируется в основном из корешков S1 и S2 [2–5]. Все эти результаты согласуются с классическими миотомными диаграммами, поскольку короткий разгибатель пальцев обычно получает свой доминирующий вклад от L5-корешка, а мышца, отводящая большой палец стопы, – от S1-корешка. Однако анатомические руководства указывают на то, что в иннервации мышцы, отводящей большой палец стопы, принимает участие и L5-корешок [6].

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определить клиническую и ЭНМГ-характеристику состояния нервов нижних конечностей и установить диагностическую значимость параметров F-волн, зарегистрированных при исследовании малоберцового и большеберцового нервов у пациентов с радикулопатией L5.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Был обследован 31 пациент с изолированной радикулопатией L5 (12 женщин, 19 мужчин) в возрасте 22–61 года (медиана 41 (36; 47) год) при росте 173 (165,5; 181,5) см. Контрольную группу составили 40 здоровых добровольцев (24 женщины, 16 мужчин) в возрасте от 23 до 56 лет (медиана 35 (30; 42) лет) при росте 168 (160; 176,5) см. Критериями включения служили жалобы на боли в ноге ниже коленного сустава в распределении дерматома L5 или в сочетании с болями в бедре и поясничной области; снижение силы в мышцах – разгибателях стопы, в разгибателе большого пальца стопы, а также наличие парамедианной грыжи межпозвонкового диска L4–L5 или фораминальной грыжи межпозвонкового диска L5–S1 или их сочетание с соответствующей латерализацией, компримирующей корешок L5, по данным магнитно-резонансной томографии (МРТ) или компьютерной томографии (КТ). Критериями исключения были: возраст младше 18 и старше 70 лет, наличие у пациента сахарного диабета, системных заболеваний, злокачественных новообразований в анамнезе, клинических или электрофизиологических признаков полиневропатии, предыдущий прием пациентом лекарств, считающихся токсичными для периферической нервной системы. Оценка болевого синдрома проводилась с использованием визуальной аналоговой шкалы (ВАШ), опросников Douleur Neuropathique en 4 questions (DN4) и Мак-Гилла [7, 8]. Также у всех пациентов оценивался тест Ласега и «кашлевого толчка».

ЭНМГ-исследование моторных волокон малоберцового, большеберцового и сенсорных волокон икроножного нервов было выполнено по стандартной методике. Анализировали амплитуду и площадь M-ответа, скорость проведения импульса

(СПИ) по нервам, а также параметры F-волн: минимальную, среднюю и максимальную латентность ($F_{\text{мин}}, F_{\text{ср}}, F_{\text{макс}}$) в серии из 10 последовательных F-волн, хронодисперсию ($F_{\text{хр}}$), частоту встречаемости, среднюю ($F_{\text{дл}}$) и объединенную длительность ($F_{\text{одл}}$) всех полученных F-волн. $F_{\text{одл}}$ определяли как разницу между $F_{\text{мин}}$ и максимальной латентностью окончания (возвращением к изолинии) последней F-волны среди всей серии F-волн [9]. Полученные показатели с поврежденной стороны сравнивали с неповрежденной стороной и контрольной группой.

Проверка распределения количественных признаков на соответствие модели нормального распределения Гаусса осуществлялась при помощи критерия Шапиро – Уилка. При условии нормального распределения данные представлены как среднее \pm SD (стандартное отклонение), при распределении, отличном от нормального, данные представлены в виде медианы и квартилей (25%; 75%). Сравнение значений параметров F-волны между 2 сторонами были выполнены с использованием парного t-теста. Для сравнения группы пациентов с контрольной группой использовали двухвыборочный t-тест или непараметрический тест Манна – Уитни. Для сравнения более чем 2 групп по количественным признакам использовался непараметрический тест Краскела – Уоллиса с последующим апостериорным сравнением групп попарно тестом Данна (post-hoc test) с учетом поправки на множественные сравнения (метод Холма). Для оценки силы связи количественных переменных использовался коэффициент корреляции Пирсона (rs), если одна из переменных являлась дихотомической (бинарной), то использовался бисериальный коэффициент корреляции (rb). На основании данных контрольной группы были определены диапазоны различий между сторонами. С учетом наличия в контрольной группе линейной корреляционной связи показателей латентности F-волны ($F_{\text{мин}}, F_{\text{ср}}, F_{\text{макс}}$) с признаками «возраст» и «рост», данные показатели контрольной группы были скорректированы при помощи уравнения линейной регрессии в зависимости от значений вышеуказанных признаков группы пациентов. Для анализа связи категориальных показателей использовали критерий χ^2 Пирсона с поправкой Йетса. Оценка прогностичности количественных признаков выполнена с помощью ROC-анализа. В качестве количественной меры прогностичности количественного признака выбрана площадь под ROC-кривой (AUC). Выбор оптимального порога отсечения выполнен методом Йодена (Youden's J statistic). При значении AUC, равном 0,9–1,0, качество модели оценивалось как отличное, 0,8–0,9 – как очень хорошее, 0,7–0,8 – как хорошее, 0,6–0,7 – как среднее, 0,5–0,6 – как неудовлетворительное. Уровень значимости принят равным менее 0,05. Все расчеты выполнены с помощью языка программирования для статистической обработки данных R, (версия 4.3.2) с применением пакетов tidyverse, pROC, rstatix, ggstatsplot, cutpointr.

■ РЕЗУЛЬТАТЫ

Болевой синдром локализовался в нижней части спины в сочетании с болями в голени и бедре у 54,8%, с болью в ноге без болей в поясничной области – у 45,2% ($p=0,612$). У 27 пациентов (87,1%) интенсивность болевого синдрома была более выражена в голени, чем в поясничной области ($p<0,001$), а у 4 (12,9%) пациентов – одинакова или больше в поясничной области. Изолированная боль в области наружной поверхности голени наблюдалась у 25,8%, а в сочетании с болью в бедре – у 19,4%. Неприятные ощущения в виде парестезии или онемения в области первого, второго,



третьего пальца или передней части подошвенной поверхности стопы наблюдались у 22,6% пациентов. У всех пациентов болевой синдром носил непостоянный характер, боли возникали после длительного нахождения в горизонтальном положении у 16 (51,6%) человек, при сидении – у 13 (41,3%), при ходьбе – у 9 (29,0%), при наклоне туловища – у 5 (16,1%), в вечернее время – у 1 (3,2%). Облегчение наблюдалось при смене положения тела или принятии вынужденной позы. На основании опросника Мак-Гилла [7] боль в нижних конечностях характеризовалась как тупая, ноющая у 96,8% пациентов, как тянущая у 87,1%, колющая у 77,4%, давящая, сжимающая у 77,4%, жгучая у 74,2%, немая у 67,7%, «подобна удару током» у 67,7%, острая, режущая у 51,6%, разлитая у 45,2%, щиплющая у 45,2%, распирающая, растягивающая у 41,9%, пульсирующая у 38,7%, саднящая у 25,8%. По аффективным дескрипторам описывалась как «боль-помеха» у 96,8%, как боль, которая утомляет, изматывает, – у 87,1% пациентов, раздражает – у 67,7%, вызывает чувство тревоги – у 38,7%, обесценивает – у 35,5% пациентов.

Средняя продолжительность болевого синдрома составила $11,8 \pm 6,2$ мес. Хронический болевой синдром отмечался у 93,5%, а подострый – у 6,5% пациентов ($p < 0,001$). Интенсивность боли по ВАШ составила $4,3 \pm 1,4$ балла, варьировала от 2,0 до 9,0 пункта. В основном боль характеризовалась как невропатическая и по шкале DN4 составила $5,0 \pm 1,3$ балла, однако у 3 пациентов (9,7%) она была менее 4 баллов. Тем не менее у этих 3 пациентов отмечались изменения на ЭНМГ: у 2 была увеличена длительность F-волны и у 1 регистрировалась A-волна при исследовании большеберцового нерва. Выявлена корреляционная связь между показателями ВАШ и DN4 ($R=0,45$).

При неврологическом осмотре на стороне поражения выявлена изолированная слабость разгибателя большого пальца стопы у 38,7%, а разгибателя стопы и разгибателя большого пальца – у 16,1% ($p < 0,001$). Нарушение болевой чувствительности в дерматоме L5 выявлено в 90,3% случаев: в виде гипестезии – 80% ($p < 0,001$), гиперестезии – 19,3% ($p=0,011$), аллодинии – 6,5% ($p=0,238$) случаев. В одном случае аллодиния сочеталась с гиперестезией, в другом – с гиперпатией и гипестезией. Снижение тактильной чувствительности отмечено у 8 пациентов ($p=0,002$). Симптом «кашлевого толчка» был положительным у 54,8% ($p < 0,001$), тест Ласега – у 67,7% ($p < 0,001$) пациентов. У всех пациентов были сохранены ахилловы и коленные рефлексы, без разницы между сторонами.

У всех пациентов на фоне снижения высоты межпозвонковых дисков выявлены грыжи межпозвоночного диска: парамедианные L4–L5 (58,1%), фораминальные L5–S1 (25,8%) или их сочетание с соответствующей болевому синдрому латерализацией (16,1%). Сагиттальный размер парамедианных грыж межпозвонкового диска L4–L5 составил от 4,8 до 13 мм, в среднем $6,4 \pm 2,1$ мм, а фораминальных грыж диска L5–S1 – от 3,7 до 9,1 мм, в среднем $6,2 \pm 2,1$ мм.

В табл. 1 указано, что преимущественное снижение амплитуды и площади M-ответа было выявлено с короткого разгибателя пальца при стимуляции малоберцового нерва с поврежденной стороны по сравнению с неповрежденной стороной и было обнаружено у 19 пациентов (61,3%). При анализе M-ответа с передней большеберцовой мышцы отмечалось незначительное снижение амплитуды только по сравнению с контрольной группой ($p=0,010$). Тестирование большеберцового нерва также выявило снижение амплитуды по сравнению с неповрежденной стороной,

но в меньшей степени – у 6 пациентов (19,3%), однако средние их значения не отличались ($p>0,05$).

В контрольной группе при анализе F-волны была выявлена линейная корреляционная связь между ростом, полом и $F_{\text{мин}}$ ($r=0,711$, $r_b=0,927$ соответственно). При этом признаки «рост» и «пол» выражено коррелировали между собой ($r_b=0,764$). Менее значимая линейная корреляционная связь наблюдалась между возрастом и $F_{\text{мин}}$ ($r=0,301$). При построении модели множественной линейной регрессии выполнялась проверка на мультиколлинеарность (линейную связь между предикторами модели). В результате проверки признаков «пол» был исключен из конечного уравнения

Таблица 1
Электронейромиографические параметры малоберцового и большеберцового нервов
Table 1
Electroneuromyographic parameters of the peroneal and tibial nerves

Показатели	Поврежденная сторона	Неповрежденная сторона	p_1	p_2	p_3	Контрольная группа
Малоберцовый нерв (короткий разгибатель пальцев)						
Амплитуда (мВ)	5,3±2,9	7,8±2,6	<0,001	<0,001	0,583	8,1 (6,0; 9,1)
Площадь (мВмс)	14,6±7,4	19,5 (16,8; 25,0)	<0,001	<0,001	0,232	23,7±8,8
СПИ (м/с)	46,1±3,6	47,3±4,0	0,195	0,003	0,161	48,6±3,3
Малоберцовый нерв (передняя большеберцовая мышца)						
Амплитуда (мВ)	13,2±3,2	14,2±3,1	0,203	0,010	0,168	15,2±1,9
Площадь (мВмс)	71,0±16,0	77,9±14,7	0,083	0,144	0,943	77,6±15,7
Большеберцовый нерв (мышца, отводящая большой палец стопы)						
Амплитуда (мВ)	16,2±5,6	16,7±6,2	0,748	0,007	0,039	20,4±6,8
Площадь (мВмс)	30,9 (26,0; 43,2)	34,3±14,1	0,874	0,017	0,009	43,3 (32,0; 50,8)
СПИ (м/с)	48,0±6,5	46,7±4,4 м/с	0,352	0,052	0,073	50,5±3,5

Примечание: p_1 , p_2 , p_3 – р-значение при сравнении между сторонами (p_1), между поврежденной (p_2), неповрежденной (p_3) сторонами и контрольной группой.

Таблица 2
Параметры F-волны при исследовании малоберцового нерва
Table 2
F-wave parameters in the peroneal nerve examination

Показатели	Поврежденная сторона	Неповрежденная сторона	p_1	p_2	p_3	Контрольная группа
$F_{\text{мин}}$ (мс)	51,8±5,8	50,1±4,5	0,238	0,003	0,055	49,9 (44,7; 50,5)
$F_{\text{макс}}$ (мс)	57,2±7,6	56,0±5,8	0,517	0,006	0,017	54,3 (49,3; 55,5)
$F_{\text{ср}}$ (мс)	54,0±6,2	52,5±4,9	0,359	0,002	0,014	51,6 (46,6; 52,2)
$F_{\text{хр}}$ (мс)	4,2 (2,9; 8,1)	5,9±2,5	0,516	0,730	0,211	5,1±2,1
$F_{\text{дл}}$ (мс)	9,7±1,5	9,2±1,6	0,284	0,580	0,639	9,5±2,0
$F_{\text{одл}}$ (мс)	14,0±2,7	14,5±2,9	0,490	0,247	0,062	13,3±2,1
Частота, %	48,7±28,5	53,5±33,2	0,541	0,008	0,061	70,0 (40; 100)

Примечание: p_1 , p_2 , p_3 – р-значения при сравнении между сторонами (p_1), между поврежденной (p_2), неповрежденной (p_3) сторонами и контрольной группой; $F_{\text{мин}}$, $F_{\text{макс}}$, $F_{\text{ср}}$ – минимальная, максимальная и средняя латентность, $F_{\text{хр}}$ – хронодисперсия, $F_{\text{дл}}$, $F_{\text{одл}}$ – средняя и объединенная длительность F-волн.



регрессии. Включение признаков «рост» и «возраст» в общую модель множественной линейной регрессии продемонстрировало их значимую связь с $F_{мин}$ (скорректированный коэффициент детерминации $R^2_{adj}=0,568$, $b_{рост}=0,335$, $p<0,001$, $b_{возраст}=0,097$, $p=0,026$). Подобная корреляционная связь выявлена также для показателей $F_{ср}$ и $F_{макс}$. Следовательно, показатели латентности F-волны контрольной группы были скорректированы при помощи уравнения линейной регрессии в зависимости от значений вышеуказанных признаков группы пациентов. Параметры длительности F-волны ($F_{дл}$, $F_{одл}$) контрольной группы не коррелировали с ростом, полом и возрастом. Поэтому расчет модели множественной линейной регрессии для этих параметров не проводился.

В табл. 2 указано, что на поврежденной стороне при стимуляции малоберцового нерва отмечалось удлинение $F_{мин}$, $F_{ср}$ и $F_{макс}$ и снижение ее частоты. Увеличение $F_{мин}$ было выявлено у 9 (21%) пациентов и отмечалось только у тех пациентов, у которых была увеличена $F_{дл}$ при исследовании большеберцового нерва. На неповрежденной стороне выявлены менее выраженные изменения со стороны $F_{макс}$ и $F_{ср}$. У пациентов с увеличенной $F_{мин}$ положительный тест Ласега наблюдался в 7 (77,8%) из 9 случаев, тогда как без увеличения $F_{мин}$ – в 14 (63,6%) из 22 случаев ($p=0,732$), а положительный симптом кашлевого толчка был в 4 (44,4%) из 9 против 13 (59,1%) из 22 ($p=0,721$); снижение мышечной силы обнаружено в 5 (55,6%) из 9 против 12 (54,5%) из 22 ($p=0,922$) случаев соответственно. Также не обнаружено различий по интенсивности (ВАШ) и выраженности невропатической боли (DN4) среди пациентов с увеличенной $F_{мин}$ ($4,0\pm 1,5$ и $5,0\pm 1,1$ балла) и не увеличенной $F_{мин}$ ($4,4\pm 1,4$ и $5,0\pm 1,4$ балла) ($p=0,930$ и $p=0,528$) соответственно. В табл. 3 указано, что при ROC-анализе качество модели было хорошее для латентностей F-волны по сравнению с контрольной группой и неудовлетворительное – с неповрежденной стороной.

Таблица 3
Результаты ROC-анализа параметров при исследовании малоберцового нерва
Table 3
Results of ROC analysis of the peroneal nerve parameters

Показатели	AUC	Порог отсечения	Se	Sp
$F_{мин}$ (мс) ПС НПС	0,599	50,500	0,667	0,654
$F_{ср}$ (мс) ПС НПС	0,597	57,250	0,370	0,923
$F_{макс}$ (мс) ПС НПС	0,565	60,550	0,370	0,885
$F_{хр}$ (мс) ПС НПС	0,592	3,650	0,808	0,481
$F_{дл}$ (мс) ПС НПС	0,600	8,575	0,880	0,348
$F_{одл}$ (мс) ПС НПС	0,557	15,200	0,522	0,680
$F_{мин}$ (мс) ПС К	0,746	51,343	0,630	1,000
$F_{ср}$ (мс) ПС К	0,743	52,791	0,667	0,935
$F_{макс}$ (мс) ПС К	0,703	56,480	0,593	0,935
$F_{хр}$ (мс) ПС К	0,509	3,600	0,795	0,481
$F_{дл}$ (мс) ПС К	0,581	8,450	0,920	0,436
$F_{одл}$ (мс) ПС К	0,593	14,500	0,520	0,744

Примечание: $F_{мин}$, $F_{макс}$, $F_{ср}$ – минимальная, максимальная и средняя латентность, $F_{хр}$ – хронодисперсия, $F_{дл}$, $F_{одл}$ – средняя и объединенная длительность всей серии F-волн; AUC – площадь под ROC-кривой, Se – чувствительность, Sp – специфичность, ПС – поврежденная сторона, НПС – неповрежденная сторона, К – контроль.

Указано, что при исследовании большеберцового нерва отмечалось увеличение длительности и отсутствие изменения латентностей F-волны (табл. 4). Пролонгирование $F_{дл}$ наблюдалось у 23 из 31 (74,2%) пациента. У этих 23 пациентов достоверно чаще наблюдался тест Ласега (78,3%), тогда как у оставшихся пациентов без увеличения $F_{дл}$ – у 37,5% ($p=0,034$). Не получено различий между увеличенной и нормальной $F_{дл}$ при анализе болевого синдрома по шкалам ВАШ ($p=0,763$) и DN4 ($p=0,303$), а также наличием симптома кашлевого толчка ($p=0,232$) и снижением мышечной

Таблица 4
Параметры F-волны при исследовании большеберцового нерва
Table 4
F-wave parameters in the tibial nerve examination

Показатели	Поврежденная сторона	Неповрежденная сторона	p_1	p_2	p_3	Контрольная группа
$F_{мин}$ (мс)	52,7±5,3	52,1±5,3	0,518	0,226	0,518	51,2 (46,4; 52,5)
$F_{макс}$ (мс)	57,2±5,9	55,7 (53,3; 60,2)	0,774	0,018	0,226	55,5 (50,3; 56,9)
$F_{ср}$ (мс)	54,9±5,5	54,5±5,5	0,700	0,184	0,270	53,1 (48,3; 54,5)
$F_{хр}$ (мс)	4,2 (3,6; 5,2)	4,8 (4,1; 5,6)	0,176	0,769	0,106	4,2±0,9
$F_{дл}$ (мс)	19,3±4,2	15,6±3,4	0,003	<001	0,003	12,8±2,2
$F_{одл}$ (мс)	24,7±4,9	19,2±4,3	<0001	<0001	<0001	16,4±2,2
Частота, %	100%	100%	1	1	1	100%

Примечание: p_1, p_2, p_3 – p-значение при сравнении между сторонами (p_1), между поврежденной (p_2), неповрежденной (p_3) сторонами и контрольной группой; $F_{мин}, F_{макс}, F_{ср}$ – минимальная, максимальная и средняя латентность, $F_{хр}$ – хронодисперсия, $F_{дл}, F_{одл}$ – средняя и объединенная длительность всей серии F-волн.

Таблица 5
Результаты ROC-анализа параметров при исследовании большеберцового нерва
Table 5
Results of ROC analysis of the tibial nerve parameters

Показатели	AUC	Порог отсечения	Se	Sp
$F_{мин}$ (мс) ПС НПС	0,548	50,400	0,677	0,484
$F_{ср}$ (мс) ПС НПС	0,523	54,600	0,484	0,613
$F_{макс}$ (мс) НПС ПС	0,491	53,700	0,742	0,355
$F_{хр}$ (мс) НПС ПС	0,621	4,175	0,710	0,581
$F_{дл}$ (мс) ПС НПС	0,774	17,025	0,774	0,742
$F_{одл}$ (мс) ПС НПС	0,802	23,500	0,677	0,871
$F_{мин}$ (мс) ПС К	0,631	55,308	0,290	1,000
$F_{ср}$ (мс) ПС К	0,644	57,266	0,290	1,000
$F_{макс}$ (мс) Контроль ПС	0,350	51,743	0,613	0,161
$F_{хр}$ (мс) ПС К	0,517	5,400	0,258	0,925
$F_{дл}$ (мс) ПС К	0,933	17,000	0,774	0,975
$F_{одл}$ (мс) ПС К	0,927	20,450	0,806	1,000

Примечание: $F_{мин}, F_{макс}, F_{ср}$ – минимальная, максимальная и средняя латентность, $F_{хр}$ – хронодисперсия, $F_{дл}, F_{одл}$ – средняя и объединенная длительность всей серии F-волн; AUC – площадь под ROC-кривой, Se – чувствительность, Sp – специфичность, ПС – поврежденная сторона, НПС – неповрежденная сторона, К – контроль.



силы ($p=0,534$). Не обнаружено различий по выраженности невропатической боли (DN4) среди пациентов с увеличенной ($5,2\pm 1,2$ балла) и нормальной $F_{дл}$ ($4,6\pm 1,4$ балла) ($p=0,763$).

В табл. 5 указано, что значение показателя площади под кривой при проведении ROC-анализа оказалось наибольшим при анализе $F_{дл'}$, чем латентности и $F_{хр}$ в сравнении с контрольной группой и с противоположной неповрежденной стороной и, следовательно, свидетельствует о ее большей диагностической значимости, т. е. наиболее оптимальном соотношении чувствительности и специфичности. Чувствительность параметра $F_{дл}$ составила 77,4%, а $F_{одл}$ – 80,6% по отношению к контрольной группе, а по отношению к неповрежденной стороне – 77,4 и 67,7% соответственно. Специфичность $F_{дл}$ и $F_{одл}$ была 97,5 и 100% по отношению к контрольной группе и 74,2 и 87,1% по отношению к неповрежденной стороне соответственно. Кроме того, качество модели при анализе $F_{дл}$ при исследовании большеберцового нерва было выше, чем $F_{мин}$ малоберцового нерва.

■ ОБСУЖДЕНИЕ

Нервный корешок L5 особенно уязвим к сдавлению в латеральном кармане и межпозвоночном отверстии. Это связано с тем, что диаметр нервного корешка L5 является одним из самых больших из поясничных нервов, а межпозвоночное отверстие L5–S1 является одним из самых маленьких отверстий поясничного отдела позвоночника. Следовательно, нервному корешку остается меньше места для соскальзывания или отхода от сжимающей структуры или повреждения. Кроме того, уровень позвонков L5–S1 является распространенным местом дегенеративного заболевания диска [10].

Клиническая картина нашей группы пациентов была представлена преимущественно умеренным болевым синдромом ($4,3\pm 1,4$ балла по ВАШ) и повреждением преимущественно сенсорных волокон, которое встречалось у всех пациентов. Моторные волокна вовлекались в значительно меньшей степени. Слабость стопы наблюдалась в 16,1%, а разгибателя большого пальца – в 38% случаев. Радикулопатии с преобладающим вовлечением или только сенсорных корешков являются наиболее распространенными. Это обусловлено, по-видимому, тем, что задние корешки по размеру превосходят передние в 1,5–3,0 раза. Так как большинство симптомов не являются двигательными, следовательно, существует мнение, что эта патология не может вызывать изменения при электромиографии [2, 10].

Согласно расширенному опроснику Мак-Гилла, содержащему 78 дескрипторов боли [7], боль в нижних конечностях характеризовалась как тупая, ноющая, тянущая, давящая, сжимающая (77,4–96,8%). В несколько меньшей степени боль была колющей (77,4%), жгучей (74,2%) или в виде онемения (67,7%). Согласно второй сокращенной форме болевого опросника Мак-Гилла [8], в первом случае боль считалась ненейропатической, а во втором – нейропатической. Схожие характеристики боли были получены и в других исследованиях при радикулопатии L5 и S1 [11–14]. Кроме того, болевой синдром носил непостоянный характер, провоцировался определенным положением тела, а облегчение наблюдалось при его изменении. Общая интенсивность болевого синдрома была более выражена в голени, чем в поясничной области, что свойственно для невропатической корешковой боли. В других исследованиях дерматомная боль при радикулопатии соответствовала критериям

нейропатической только в 56,5% случаев с использованием опросника DN4 [2]. В передаче болевых сигналов участвуют А-дельта- и С-волокна. Каждый чувствительный спинномозговой корешок содержит все волокна от кожи, мышц, соединительной ткани, связок, сухожилий, суставов, костей и внутренних органов, которые находятся в зоне одного сегмента тела, или сомита. С кожей связаны преимущественно А-дельта-волокна, которые проводят острую, локализованную боль, тогда как в соединительной ткани наблюдается другой паттерн иннервации, преобладают С-волокна, которые участвуют в передаче медленной, ноющей боли. Выявленные дескрипторы боли, считающиеся «нейропатическими», по-видимому, обусловлены повреждением нервных волокон, иннервирующих глубокие субдермальные ткани нижних конечностей, и являются проекционными, а не отраженными. Следовательно, выявленные характеристики боли (как нейропатические, так и считающиеся нейропатическими) могут отражать, какие волокна, входящие в спинномозговой корешок, преимущественно вовлечены в патологический процесс и какие структуры они иннервируют – дерматомы, миотомы или склеротомы.

В данном исследовании снижение амплитуды М-ответа с короткого разгибателя пальца в большей степени и с мышцы, отводящей первый палец стопы, – в меньшей свидетельствует об аксональном повреждении и соответствующем процентном участии L5-корешка в иннервации этих мышц. Снижение амплитуды М-ответа при исследовании малоберцового нерва согласуется с данными многих предыдущих исследований [2, 15, 16] и противоречит другим [17]. Анализ этих работ показал, что снижение М-ответа наблюдалось в тех исследованиях, где были включены пациенты с различной степенью мышечной слабости [2, 15, 16]. Напротив, когда пациенты не имели слабости мышц, амплитуда не отличалась от контрольной группы [17].

Латентности F-волн – это самые изученные параметры, которые напрямую связаны с ростом, длиной конечности, полом и возрастом, и их пролонгирование при радикулопатии L5 согласуется с результатами других авторов [2–4, 18]. Наше исследование также показало, что при изучении малоберцового нерва отмечалось увеличение латентностей F-волны, а ROC-анализ продемонстрировал хорошее качество модели. В этой работе были рассчитаны прогнозируемые латентности F-волны при помощи уравнения линейной регрессии в зависимости от роста и возраста пациентов, что позволяет связать наблюдаемую латентность с прогнозируемой и, следовательно, повысить точность диагностики. Существует высокая корреляция между всеми 3 параметрами латентностей ($F_{\text{мин}}$, $F_{\text{ср}}$ и $F_{\text{макс}}$), хотя есть исследования, где показано, что $F_{\text{ср}}$ является наиболее точным параметром для клинического применения [19]. Следует также отметить замедление латентностей F-волн и с бессимптомной стороны. Подобные результаты были получены и в других исследованиях при радикулопатиях L5 и S1. Это можно объяснить тем фактом, что грыжа диска имеет тенденцию поражать оба нервных корешка, хотя 1 сторона остается субклинической [14, 17].

Второй параметр, который изменялся при исследовании малоберцового нерва, – это частота регистрации, или представленность F-волны, он показывает процент стимулов, которые приводят к образованию F-волны, и отражает состояние возбудимости в исследуемом нейронном пуле. Однако в нашем исследовании этот параметр играет меньшую роль в диагностике радикулопатии L5, а в других работах он



вообще не изменялся при радикулопатиях [4]. При исследовании малоберцового нерва F-волна записывается только с короткого разгибателя пальцев, генерируется небольшой частью двигательных единиц этой мышцы и в норме имеет простую форму, низкую частоту регистрации и даже может не регистрироваться [20]. Напротив, стимуляция большеберцового нерва активирует большую часть мышц стопы – все мышцы подошвенной поверхности и имеет 100-процентную частоту регистрации. Так как длина терминального аксона большеберцового нерва разная к различным мышцам стопы, F-волна имеет более сложную форму с несколькими пиками вследствие временной дисперсии потенциалов действия. Частота регистрации зависит от возбудимости мотонейронов, которая, в свою очередь, связана с антигравитационными мышцами (сгибатели в ногах и руках). F-волны, записанные с мышцы, отводящей большой палец стопы, являются результатом суммации объемного проведения сигналов от всех мышц стопы, иннервируемых большеберцовым нервом, а большая частота регистрации отражает большое количество сегментарных мотонейронов, способных вызвать этот ответ.

Поэтому особое внимание обращает на себя значительное пролонгирование $F_{дл}$ при исследовании большеберцового нерва, а ROC-анализ показал отличное качество ее модели (площадь под кривой составила 0,933). Эти результаты значительно доминируют над $F_{мин}$ при исследовании малоберцового нерва. Об этих изменениях при радикулопатии L5-корешка ранее в литературе не сообщалось, так как принято считать, что при радикулопатии L5 исследование F-волны необходимо проводить путем стимуляции малоберцового нерва и регистрации с короткой мышцы, разгибающей пальцы стопы, которая иннервируется L5-корешком, тогда как при радикулопатии S1 – большеберцового нерва с записью с мышцы, отводящей большой палец стопы, которая иннервируется волокнами, исходящими в основном из корешка S1 [2, 4]. Однако большеберцовый нерв образуется волокнами L4–S3 спинномозговых корешков, а иннервация мышцы, отводящей первый палец стопы, происходит медиальным подошвенным нервом, который содержит волокна в большей степени корешка S1 и в меньшей – L5 [6].

Латентность F-волны и ее частота не изменялись при исследовании большеберцового нерва по сравнению с тестированием малоберцового нерва. Нормальная латентность F-волны при стимуляции большеберцового нерва обусловлена тем, что основная иннервация мышцы, отводящей большой палец стопы, обусловлена корешками S1 и S2, сегменты которых находятся ниже L5, и, следовательно, времени прохождения импульса по этим моторным волокнам требуется меньше и латентность не будет изменяться. Тогда как увеличение длительности F-волны объясняется тем, что, во-первых, длина моторного сегмента от мышцы, отводящей большой палец стопы, до сегментарных L5-мотонейронов больше и замедление проведения по L5-корешку будет отражаться на конечном компоненте F-волны, т. е. увеличении ее дисперсии или длительности F-волны; во-вторых, при радикулопатии L5 может регистрироваться A-волна, как правило, в конце F-волны и она может быть неотделима от F-волны и, следовательно, способствовать увеличению $F_{дл}$ [4, 21].

Из клинических симптомов и тестов в нашем исследовании только положительный тест Ласега был связан с пролонгированной $F_{дл}$ при стимуляции большеберцового нерва. В противоположность нашим результатам, другими исследователями

была выявлена корреляционная связь между $F_{дл}$ и мышечной слабостью, а также увеличение $F_{дл}$ при стимуляции малоберцового нерва и неизменная $F_{дл}$ при исследовании большеберцового нерва при радикулопатии L5 [3]. Также было обнаружено, что наличие хотя бы 1 клинического признака повышает вероятность отклонения при ЭНМГ-исследовании. Однако наличие нормального неврологического статуса не исключает вероятности обнаружения ЭНМГ-изменений [22]. Подчеркивается, что неврологическое и ЭНМГ-обследования должны использоваться и интерпретироваться совместно. Кроме того, ЭНМГ можно использовать для диагностики, когда клинические данные не совпадают с данными МРТ.

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При радикулопатии L5 болевой синдром в нижних конечностях характеризовался как нейропатическими, так и считающимися ненейропатическими дескрипторами боли, которые провоцировались положением тела. ЭНМГ-данные показали снижение амплитуды М-ответа с короткого разгибателя пальца и увеличение длительности при исследовании большеберцового нерва, что повышает информативность F-волн при оценке повреждения корешка L5. Отклонение параметров F-волн как с поврежденной, так и с неповрежденной стороны свидетельствует о субклиническом повреждении корешка на бессимптомной стороне. Подробный анамнез болевого синдрома, связанного с положением тела, клинические данные в сочетании с электрофизиологическими и нейровизуализационными методами могут обеспечить всестороннее понимание этих радикулопатий. Устранение причинных факторов и ранние терапевтические вмешательства имеют важное значение для предотвращения дальнейшего повреждения и восстановления нарушенной функции.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Cho SC, Ferrante MA, Levin KH, et al. Utility of electrodiagnostic testing in evaluating patients with lumbosacral radiculopathy: An evidence-based review. *Muscle Nerve*. 2010;42(2):276–82. doi: 10.1002/mus.21759
2. Mondelli M, Aretini A, Arrigucci U, et al. Clinical findings and electrodiagnostic testing in 108 consecutive cases of lumbosacral radiculopathy due to herniated disc. *Neurophysiol Clin*. 2013;43(4):205–15. doi: 10.1016/j.neucli.2013.05.004
3. Zheng C, Liang J, Nie C, et al. F-waves of peroneal and tibial nerves in the differential diagnosis and follow-up evaluation of L5 and S1 radiculopathies. *Eur Spine J*. 2018;27(8):1734–43. doi: 10.1007/s00586-018-5650-9
4. Pastore-Olmedo C, González O, Gejjo-Barrientos E. A study of F-waves in patients with unilateral lumbosacral radiculopathy. *Eur J Neurol*. 2009;16(11):1233–39. doi: 10.1111/j.1468-1331.2009.02764.x
5. Albeck MJ. Diagnostic value of electrophysiological tests in patients with sciatica. *Acta Neurol Scand*. 2000;101(4):249–54. doi: 10.1034/j.1600-0404.2000.09005.x
6. Prives MG, Lysenkov NK, Bushkovich VI, eds. *Human Anatomy*. Textbook. 13th ed. Moscow: GEOTAR Media; 2023.
7. Kuzmenko VV, Fokin VA, Mattis ER, et al. Psychological methods of quantitative assessment of pain. *Soviet Medicine*. 1986;49(10):44–48. (in Russian)
8. Bakhtadze MA, Bolotov DA, Kuzminov KO, et al. Linguistic adaptation of the Russian version of the Short-form McGill Pain Questionnaire-2. *Zh Nevrol Psikhiatr Im S.S. Korsakova*. 2016;116(7):42–45. doi: 10.17116/jnevro20161167142-45. (in Russian)
9. Khodulev VI, Kabyłka AV. Combined duration of the composite F-wave population – a new electroneuromyographic parameter in the study of radiculopathies. *Clinical neurophysiology and neurorehabilitation*. Proceedings of the Eighth scientific and practical conference with international participation, St. Petersburg, November 12–13, 2020. 2020. P. 132–133. (in Russian)
10. Durrant DH, True JM. *Myelopathy, radiculopathy, and peripheral entrapment syndromes*. Boca Raton: CRC Press; 2001.
11. Shor YM. Pain syndrome in a patient with compression radiculopathy. *Russian Journal of Pain*. 2013(4):30–32. (in Russian)
12. Olizarovich MV, Latysheva VY. Epidemiological and clinical characteristics of a single-level lumbar intervertebral disc herniation. *Health and Ecology Issues*. 2015(3):20–24. doi: 10.51523/2708-6011.2015-12-3-4. (in Russian)
13. Kabyłka AV, Khodulev VI, Vlasava SV. Analysis of the structure of pain syndrome in discogenic radiculopathy L5, S1. *Russian Journal of Pain*. 2022;20(Supplement):40–41. doi: 10.17116/pain2022200325. (in Russian)



14. Khodulev VI, Kabyłka AV, Kovalev AA. Clinical and electroneuromyographic characteristics of patients with isolated S1 radiculopathy. *Meditsinskie Novosti*. 2023;347(8):54–57. (in Russian)
15. Matsui H, Kanamori M, Kawaguchi Y, et al. Clinical and electrophysiologic characteristics of compressed lumbar nerve roots. *Spine*. 1997;22(18):2100–05. doi: 10.1097/00007632-199709150-00007
16. Nafissi S, Niknam S, Hosseini SS. Electrophysiological evaluation in lumbosacral radiculopathy. *Iran J Neurol*. 2012;11(3):83–86.
17. Yousif S, Ahmed A, Abdelhai A, et al. Nerve conduction studies in patients with lumbosacral radiculopathy caused by lumbar intervertebral disc herniation. *Adv Orthop*. 2020;2020:1–6. doi: 10.1155/2020/8882387
18. Berger AR, Sharma K, Lipton RB. Comparison of motor conduction abnormalities in lumbosacral radiculopathy and axonal polyneuropathy. *Muscle Nerve*. 1999;22(8):1053–57. doi: 10.1002/(SICI)1097-4598(199908)22:8<1053:AID-MUS7>3.0.CO;2-Y
19. Fisher MA. Electrophysiology of radiculopathies. *Clin Neurophysiol*. 2002;113(3):317–35. doi: 10.1016/S1388-2457(02)00018-4
20. Aminoff MJ, Goodin DS, Parry GJ, et al. Electrophysiologic evaluation of lumbosacral radiculopathies: electromyography, late responses, and somatosensory evoked potentials. *Neurology*. 1985;35(10):1514–18. doi: 10.1212/wnl.35.10.1514
21. Khodulev VI, Kabyłka AV. Features of early changes in late response in L5 radiculopathy. *Health and Ecology Issues*. 2024;21(3):106–13. doi: 10.51523/2708-6011.2024-21-3-15. (in Russian)
22. Tamara D Lauder. Physical examination signs, clinical symptoms, and their relationship to electrodiagnostic findings and the presence of radiculopathy. *Phys Med Rehabil Clin*. 2002;13(3):451–67. doi: 10.1016/S1047-9651(02)00006-2