UDC: 616.831-005:616.8-073.97

ИНСУЛТДАН КЕЙИНГИ МОТОР БУЗИЛИШЛАРНИ БАҲОЛАШДА ЭЛЕКТРОНЕЙРОМИОГРАФИЯ: КЛАССИК ТАҲЛИЛДАН СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТГАЧА БЎЛГАН ЗАМОНАВИЙ ЁНДАШУВЛАР

Асадуллаев М.М., Вахабова Н.М., Хомидов Т.З., Кодирова С.А.
Тошкент давлат тиббиёт университети (Тошкент, Ўзбекистон)

Аннотация. *Мазкур мақолада инсултдан кейинги мотор дисфункцияни баҳолашда электронейромиография (ЭНМГ)нинг эволюцион ривожи ва замонавий ўрни концептуал нуқтаи назардан кўриб чиқилади. Бунда классик игнали ва юзаки ЭНМГ таҳлилларидан бошлаб юқори зичликли юзаки ЭМГ, спастикликнинг объектив электрофизиологик маркерлари, инсултнинг ўткир давридаги диагностик имкониятлари ҳамда реабилитацияни индивидуал режалаштиришдаги аҳамиятигача бўлган ёндашувлар таҳлил қилинади. Муаллифлар марказий инсултдан сўнг периферик мотор тизим пассив ҳолатда қолмаслиги, балки фаол қайта ташкил топиш жараёнида иштирок этишини таъкидлайди ва бу ҳолат ЭНМГ орқали аниқланиши мумкинлигини асослайди.*

Шунингдек, мақолада ЭНМГ сигналларини ҳисоблаш ва сунъий интеллект асосида таҳлил қилиш истиқболлари ёритилиб, уларнинг прогнозлаш, яширин нақшларни аниқлаш ва клиник қарор қабул қилишдаги потенциали муҳокама қилинади. ЭНМГ инсултдан кейинги мотор бузилишларни баҳолашда фақат ёрдамчи диагностик усул эмас, балки патофизиологияни тушуниш, тикланиш имкониятларини баҳолаш ва шахсийлаштирилган реабилитация чораларини ишлаб чиқишда муҳим восита сифатида талқин этилади.

Калит сўзлар: *инсультдан кейинги ҳаракат бузилишлари, электронейромиография, сиртқи электромиография, ҳаракат бирликлари таҳлили, спастикликни баҳолаш, нейрофизиологик маркерлар, сунъий интеллект, нейрореабилитатсия*

ELECTRONEUROMYOGRAPHY IN THE ASSESSMENT OF POST-STROKE MOTOR IMPAIRMENT: FROM CLASSICAL ANALYSIS TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Asadullaev M.M., Vakhabova N.M., Khomidov T.Z., Kodirova S.A.
Tashkent State Medical University (Tashkent, Uzbekistan)

Abstract. *This article reviews the evolutionary development and modern role of electroneuromyography (ENMG) in the assessment of post-stroke motor dysfunction from a conceptual perspective. It analyzes approaches ranging from classical needle and surface ENMG to high-density surface EMG, objective electrophysiological markers of spasticity, diagnostic capabilities in the acute period of stroke, and their importance in individual rehabilitation planning. The authors emphasize that after a central stroke, the peripheral motor system does not remain passive, but participates in an active reorganization process, and justify that this can be detected by ENMG.*

The article also highlights the prospects for computational and artificial intelligence-based analysis of ENMG signals, discussing their potential for prediction, detection of hidden patterns, and clinical decision-making. ENMG is regarded not only as an auxiliary diagnostic method in the assessment of post-stroke motor disorders, but also as an important tool for understanding pathophysiology, identifying recovery opportunities, and developing personalized rehabilitation measures.

Key words: *post-stroke motor impairment, electroneuromyography, surface electro-myography, motor unit analysis, spasticity assessment, neurophysiological markers, artificial intelligence, neurorehabilitation*

ЭЛЕКТРОНЕЙРОМИОГРАФИЯ В ОЦЕНКЕ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ ПОСЛЕ ИНСУЛЬТА: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ОТ КЛАССИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Асадуллаев М.М., Вахабова Н.М., Хомидов Т.З., Кодирова С.А.
Ташкентский государственный медицинский университет (Ташкент, Узбекистан)

Аннотация. *Рассматриваются эволюционное развитие и современная роль электронейромиографии (ЭНМГ) в оценке двигательной дисфункции после инсульта с концептуальной точки зрения. Анализируются подходы, начиная от классической игольчатой и поверхностной ЭНМГ и заканчивая поверхностной ЭМГ высокой плотности, объективные электрофизиологические маркеры спастичности, диагностические возможности в остром периоде инсульта и их значение в индивидуальном планировании реабилитации. Авторы подчеркивают, что после центрального инсульта периферическая двигательная система не остается пассивной, а участвует в активном процессе реорганизации, и обосновывают возможность ее обнаружения с помощью ЭНМГ.*

В статье также освещаются перспективы анализа сигналов ЭНМГ с использованием вычислительных методов и искусственного интеллекта, обсуждается их потенциал для прогнозирования, выявления скрытых закономерностей и принятия клинических решений. ЭНМГ рассматривается не только как вспомогательный диагностический метод при оценке двигательных расстройств после инсульта, но и как важный инструмент для понимания патофизиологии, определения возможностей восстановления и разработки персонализированных реабилитационных мероприятий

Ключевые слова: *постинсультные двигательные нарушения, электронейромиография, поверхностная электромиография, анализ двигательных единиц, оценка спастичности, нейрофизиологические маркеры, искусственный интеллект, нейрореабилитация*

Инсултдан кейинги ҳаракат бузилишлар замонавий неврологиянинг энг мураккаб ва кўп қатламли муаммоларидан бири бўлиб қолмоқда. Клиник амалиётда ушбу ҳолат кўпинча мушак кучининг пасайиши, ҳаракат аниқлигининг йўқолиши, спастиклик ва функционал чекланишлар орқали баҳоланади. Бироқ бу белгилар марказий нерв тизимида юзага келган зарарнинг фақат якуний, ташқи ифодаси бўлиб, уларнинг ортида мураккаб нейрофизиологик жараёнлар яширинган бўлади. Клиник кўриниш билан реал ҳаракат тизим ҳолати ўртасидаги бу тафовут инсултдан кейинги тикланиш механизмларини тўлиқ тушунишни сезиларли даражада чеклайди [16].

Анъанавий ёндашувларда инсулт асосан марказий шикастланиш сифатида талқин қилинади ва периферик ҳаракат тизими нисбатан “сақланган” тизим деб қаралади. Шу сабабли диагностика ва прогнозлашда асосан клиник шкалалар, нейротасвирлаш усуллари ҳамда функционал баҳолаш воситаларига таянилади. Бироқ клиник тажрибалар шуни кўрсатадики, мушак кучи сақлангандек туюлган ҳолатларда ҳам мотор бошқаруви етарли даражада самарали бўлмаслиги, аксинча, клиник заифлик фонида баъзан функционал тикланиш кузатилиши мумкин. Бу ҳолатлар ҳаракат тизимининг фақат кортикал даражада эмас, балки периферик ва спинал даражаларда ҳам фаол қайта ташкил топишини тахмин қилишга ундайди [22].

Электронейромиография (ЭНМГ) айнан ушбу яширин қатламни очиб берувчи усул сифатида аҳамият касб этади. ЭНМГ мушак ва нерв фаолиятини тўғридан-тўғри электрофизиологик сигнал орқали баҳолаш имконини бериб, ҳаракат бир-

ликлар, нерв-мушак узатиш механизмларини ва периферик нейронларнинг функционал ҳолатини аниқлашга хизмат қилади. Инсулт борасида эса ЭНМГ фақат периферик асоратларни истисно қилиш воситаси эмас, балки марказий зарбадан кейин ҳаракат тизимида кечаётган мослашувчан ва маладаптив (нотўғри ёки самарасиз компенсатор механизмлар) жараёнларни тушуниш калити сифатида қаралиши лозим [5].

Сўнгги йилларда инсултдан кейин периферик ҳаракат тизими пассив ҳолатда қолмаслиги, балки фаол қайта ташкил топиш жараёнларида иштирок этиши тобора кўпроқ эътироф этилмоқда. Ҳаракат бирликлар сони ва юкланишининг ўзгариши, реиннервация белгиларининг пайдо бўлиши, мушак ичидаги фаолликнинг нотекис тақсимланиши ва патологик ко-активация нақшлари клиник белгилар юзага чиқишидан олдин ҳам шаклланиши мумкин. Ушбу жараёнлар фақат клиник кузатув орқали эмас, балки айнан ЭНМГ ёрдамида аниқланади ва миқдорий баҳоланади [20].

Замонавий ЭНМГ эса классик игнали ва юзаки текширувлар билан чекланиб қолмайди. Юқори зичликли юзаки ЭМГ мушак фаоллигини фазовий харита сифатида таҳлил қилиш имконини беради, спастикликнинг электрофизиологик “имзо”си аниқлашга қаратилган ёндашувлар эса субъектив баҳолашдан объектив ўлчовларга ўтиш имконини яратади. Ўткир инсулт даврида ЭНМГ орқали олинадиган эрта белгилар эса тикланиш потенциалини ва реабилитация стратегиясини олдиндан белгилашда муҳим ахборот манбаи бўлиши мумкин [8].

Бундан ташқари, ЭНМГ сигналининг мураккаблиги уларни анъанавий таҳлил усуллари билан тўлиқ англашни қийинлаштиради. Шу нуқтаи назардан, ҳисоблаш усуллари ва сунъий интеллект асосидаги ёндашувлар ЭНМГдан олинадиган маълумотларни чуқурроқ талқин қилиш, яширин нақшларни аниқлаш ва прогнозлаш имкониятларини сезиларли даражада кенгайтиради. Бу эса ЭНМГни нафақат диагностик, балки қарор қабул қилишни қўллаб-қувватловчи стратегик воситага айлантиради [19].

Мазкур мақолада инсултдан кейинги ҳаракат бузилишларини баҳолашда электронейромиографиянинг замонавий ўрни концептуал ёндашув асосида кўриб чиқилади. Классик таҳлиллардан тортиб, юқори технологияли ва сунъий интеллектга асосланган усулларгача бўлган йўналишлар бир бутун тизим сифатида талқин қилиниб, ЭНМГнинг патофизиологияни тушуниш, прогнозлаш ва шахсийлаштирилган реабилитацияни шакллантиришдаги имкониятлари муҳокама қилинади [10].

Инсултдан кейинги ЭНМГ ўзгаришларининг патофизиологик асослари

Инсултдан кейинги ҳаракат бузилишлари тушунишда асосий хатолардан бири уларни фақат кортикал шикастланиш оқибати сифатида талқин қилишдир. Бундай ёндашув ҳаракат тизимини қатъий иерархик моделда, яъни “марказ буйруқ беради, периферия эса фақат бажаради” деб тасаввур қилади. Аслида эса ҳаракат тизими кўп даражали, ўзаро боғланган ва динамик тизим бўлиб, марказий зарба ушбу тизимнинг барча бўғинларида функционал ўзгаришларни бошлаб беради. ЭНМГда кузатиладиган ўзгаришлар айнан шу кўп қатламли патофизиологиянинг периферик даражадаги аксидир [22].

Марказий инсултдан сўнг кортикоспинал таъсирнинг камайиши спинал мотонейронлар учун фақат “сигнал йўқолиши” ни англатмайди. Улар афферент ва эфферент баланснинг бузилиши шароитида янги фаолият режимига ўтади. Натижада айрим ҳаракат бирликлари функционал жиҳатдан “йўқолган” дек кўринса, бошқалари ортиқча юклама остида ишлай бошлайди. ЭНМГда бу ҳолат ҳаракат бирлиги потенциалларининг амплитуда ва давомийлик ўзгаришлари, ресруитмент (яъни ихтиёрий қисқариш вақтида ҳаракат бирликларининг етарли ва мувозанатли жалб қилинмаслиги) нақшларининг бузилиши ҳамда кучга нисбатан номутаносиб фаоллик билан намоён бўлади. Бу жараёнлар мушак заифлигининг сабаби эмас, балки кўпинча унинг электрофизиологик субстрати (механизми) ҳисобланади [18].

Инсултдан кейинги даврда ҳаракат бирликлари даражасидаги қайта ташкил топиш икки йўналишда кечиши мумкин: функционал жиҳатдан фойдали мослашиш ёки самарасиз компенсация. Биринчи ҳолатда қолган ҳаракат бирликлари юкни мувозанатли тарзда қабул қилиб, ҳаракатни қисман тиклашга хизмат қилади. Иккинчи ҳолатда эса чекланган сонли ҳаракат бирликлари ҳаддан ташқари фаоллашиб, куч сақлангандек кўринса-да, ҳаракат сифати ва аниқлиги ёмонлашади. ЭНМГ айнан ушбу икки ҳолатни клиник белгилар пайдо бўлишидан олдин фарқлаш имконини беради [21].

Патофизиологик жиҳатдан муҳим масалалардан яна бири – марказий бузилишдан кейин периферик ҳаракат нейронлари фаолияти пассив қолмаслиги ҳақидаги тушунчалардир. Кортикал таъсирнинг узоқ муддатли камайиши спинал мотонейронлар даражасида функционал сусайиш, синаптик узилишлар ва қисман денервацияга ўхшаш ҳолатларни юзага келтириши мумкин. Бу жараён анатомик дегенерациядан кўра кўпроқ функционал характерга эга бўлиб, ЭНМГда МУҲП (Мушакнинг умумлашган ҳаракат потенциали – ing. CMAP – Compound Muscle Action Potential) амплитудасининг пасайиши, ҳаракат бирликлари фаоллигининг сустлашиши ва вақт ўтиши билан реиннервация белгиларининг пайдо бўлиши орқали намоён бўлади. Шу маънода, ЭНМГ инсултдан кейинги “марказий-периферик чегаранинг” шартли эканини кўрсатиб беради [5].

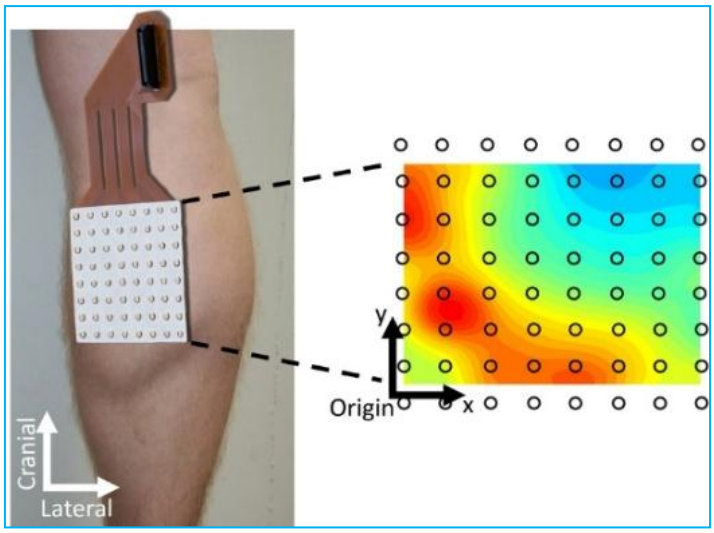
Мушак даражасида эса инсултдан кейинги ўзгаришлар бир хил тақсимланмаган бўлади. Айрим толалар ва сегментлар фаол қатнашаётган бир пайтда, бошқалари деярли иштирок этмайди. Бу ҳолат клиник текширувда кўринмаслиги мумкин, бироқ электрофизиологик жиҳатдан мушак ичидаги функционал парчаланиш сифатида намоён бўлади. Натижада мушак ягона функционал бирлик сифатида эмас, балки нотекис фаолликка эга тузилма сифатида ишлайди. Ушбу дисбаланс кейинчалик спастиклик, ко-активация ва ҳаракат стереотипларининг шаклланишига замин яратади [8].

Шундай қилиб, инсултдан кейинги ЭНМГ ўзгаришлари периферик асоратларнинг тасодифий йиғиндиси эмас, балки марказий зарбага жавобан юзага келадиган тизимли патофизиологик жараёнларнинг мантиқий натижасидир. ЭНМГ бу жараёнларни мушак ва нерв даражасида “кўринадиган” қилади ҳамда клиник белгилар билан электрофизиологик механизмлар ўртасидаги узилишларни тушунтириш имконини беради [19]. Айнан шу сабабли ЭНМГ инсултдан кейинги ҳаракат бузилишларини баҳолашда ёрдамчи эмас, балки тушунтирувчи ва прогнозловчи восита сифатида қаралиши лозим.

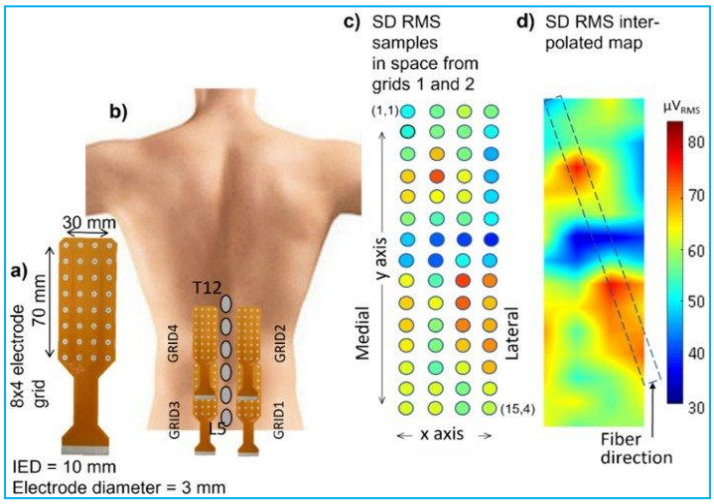
Нейропластикликни баҳолашда ЭНМГнинг илғор технологиялари

Инсултдан кейинги тикланиш жараёнлари кўпинча “нейропластиклик” тушунчаси билан изоҳланади, бироқ амалиётда ушбу жараён қаерда, қанчалик ва қандай шаклда кечаётганини аниқлаш мураккаблигича қолмоқда. Клиник баҳолашлар ва тасвирлаш усуллари марказий ўзгаришларни кўрсатиши мумкин, аммо ҳаракат тизимининг периферик даражадаги реал функционал қайта ташкил топишини бевосита акс эттирмайди. Замонавий ЭНМГ технологиялари айнан шу бўшлиқни тўлдириб, нейропластикликни абстракт тушунча эмас, балки ўлчанадиган физиологик жараён сифатида талқин қилиш имконини беради [13].

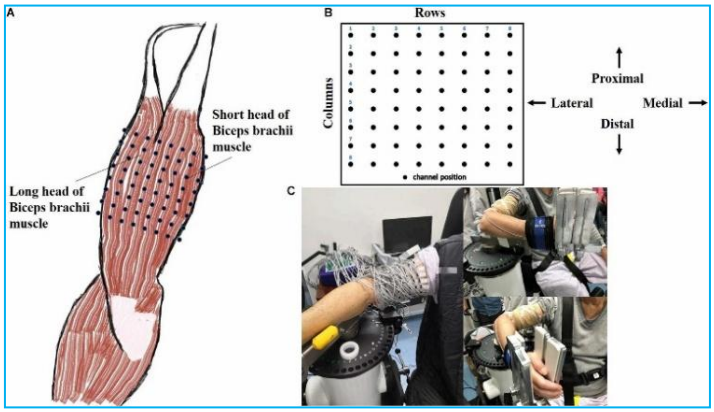
Анъанавий юзаки ва игнали ЭНМГ мушак фаоллигини вақт ўтиши билан таҳлил қилишга йўналтирилган бўлса, юқори зичликли юзаки ЭМГ мушакни фазовий жиҳатдан кўриш имконини яратади. Бу ёндашувда мушак ягона функционал бирлик сифатида эмас, балки турли даражада фаоллашаётган сегментлар мажмуи сифатида намоён бўлади [7]. Инсултдан кейин айнан шу фазовий нотекислик айрим ҳудудларнинг ортиқча юкланиши, бошқаларининг эса клиник жиҳатдан кўринмайдиган функционал “нофаоллигини” белгиловчи муҳим омил бўлиб чиқади.



1-расм. **Юқори зичликли юзаки ЭМГ ёрдамида мушак фаоллигининг фазовий харитаси ва электрод массиви жойлашуви [23]**



2-расм. **Юзаки ЭМГ сигналлари асосида RMS қийматларининг фазовий тақсимланиши ва интерполяция қилинган фаоллик харитаси [1]**



3-расм. **Бицепс мушагида юқори зичликли юзаки ЭМГ электродларининг анатомик йўналишлар бўйича жойлашуви ва экспериментал ёзиб олиш жараёни [28]**

Юқори зичликли юзаки ЭМГ ёрдамида мушак ичидаги фаоллик харитаси тузилганда, инсултдан кейинги нейропластиклик кўпинча бир хил йўналишда эмас, балки тарқоқ тарзда кечаётгани аниқланади. Бу ҳолатда мушакнинг айрим қисмлари компенсатор равишда кучлироқ фаоллашади, бошқалари эса деярли иштирок этмайди. Бундай қайта тақсимланиш қисқа муддатда ҳаракатни таъминлагандек туюлиши мумкин, аммо узоқ муддатда ҳаракат стереотипларининг бузилиши ва самарасиз компенсациянинг мустаҳкамланишига олиб келади. ЭНМГ ушбу жараённи клиник заифлик юзага чиқишидан олдин аниқлаш имконини берди [6].

Замонавий ЭНМГ ёндашувларининг муҳим жиҳатларидан бири – вақт ва фазо ўлчамларининг бирлаштиришдир. Ҳаракат вақтида мушак фаоллигининг қачон бошланиши, қанчалик давом этиши ва қайси сегментларда устунлик қилиши биргаликда таҳлил қилинганда, нейропластикликнинг функционал йўналиши ҳақида анча аниқ тасаввур ҳосил бўлади [30]. Бу ёндашув инсултдан кейинги тикланишни “куч ошиши” ёки “балл яхшиланиши” билан эмас, балки ҳаракат бошқарувининг қай даражада самарали қайта ташкил топаётгани билан баҳолашга имкон беради.

Илғор ЭНМГ технологиялари нейропластикликни фақат ижобий ҳодиса сифатида эмас, балки йўналишга эга жараён сифатида кўрсатади. Айрим ҳолларда кузатилаётган ўзгаришлар функционал тикланишга хизмат қилса, бошқа вазиятларда улар ҳаракатни соддалаштириш эвазига аниқлик ва мослашувчанликни йўқотишга олиб келиши мумкин. Ушбу фарқни аниқлаш клиник баҳолашдан кўра электрофизиологик таҳлилга кўпроқ таянади [2]. Шу нуқтаи назардан, ЭНМГ нейропластикликни баҳолаш воситаси эмас, балки унинг сифатини аниқловчи мезон сифатида намоён бўлади.

Натижада, замонавий ЭНМГ технологиялари инсултдан кейинги тикланишни статик ҳолат сифатида эмас, балки динамик ва фазовий жиҳатдан мураккаб жараён сифатида тушунишга имкон беради. Мушак фаоллигининг яширин қайта тақсимланишини аниқлаш, компенсатор ва ҳақиқий тикланиш ўртасидаги фарқни ажратиш ҳамда реабилитация стратегиясини индивидуал мослаштириш айнан ушбу ёндашувлар орқали амалга оширилади [9]. Шу сабабли, илғор ЭНМГ инсултдан кейинги нейропластикликни тушунишда марказий бўғинлардан бирига айланмоқда.

Спастикликнинг объектив электрофизиологик баҳоланиши

Биламизки, инсултдан кейинги спастиклик клиник амалиётда энг кўп учрайдиган ва бир вақтнинг ўзида энг мураккаб талқин қилинадиган ҳолатлардан биридир. У кўпинча мушак тонусининг ошиши сифатида баҳоланади ва клиник шкалалар билан тавсифланади. Бироқ бундай ёндашув спастикликнинг фақат ташқи кўринишини акс эттиради, унинг ҳаракат бошқаруви даражасидаги мураккаб механизмларини эса очиб бера олмайди. Натижада, спастиклик кўпинча бир хил клиник ном остида турли патофизиологик ҳолатларни бирлаштирган ноаниқ тушунча сифатида қолади [15].

Электрофизиологик нуқтаи назардан қаралганда, спастиклик мушакнинг пассив ҳолатдаги қаттиқлигидан кўра, марказий назоратнинг бузилиши фонида юзага келадиган ғайритабиий фаоллик режимидир. Бу ҳолатда мушаклар ихтиёрий ва ихтиёрсиз фаоллик ўртасидаги чегарани йўқотади, ҳаракат бирликлари эса вазифага мос келмайдиган тарзда ишлай бошлайди. ЭНМГ спастикликни айнан шу даражада, яъни ҳаракат бирликлари ва уларнинг фаоллашиш механизмлари орқали баҳолаш имконини беради [25].

Спастикликнинг муҳим электрофизиологик белгиларидан бири мушакнинг доимий ёки ярим доимий тоник фаоллигидир. Тинч ҳолатда ёки минимал сезувчи таъсир фонида ҳам қайд этиладиган ушбу фаоллик мушакнинг “дам олиш” режими бузилганини кўрсатади. Клиник текши-

рувда бу ҳолат баъзан сезилмаслиги мумкин, бироқ ЭНМГ орқали у аниқ ба миқдорий қайд этилади [27]. Бу эса спастикликнинг субъектив баҳосидан объектив ўлчовларга ўтиш имконини яратади.

Ҳаракат ёки пассив чўзиш вақтида пайдо бўладиган ЭМГ жавоблари спастикликнинг рефлектор компонентини акс эттиради. Бу жавобларнинг кечикиши, давомийлиги ва интенсивлиги мушак тонусининг қанчалик рефлектор механизмлар билан бошқарилаётганини кўрсатади. Айрим ҳолатларда спастиклик кучли клиник ифодага эга бўлмаган ҳолда ҳам, электрофизиологик жиҳатдан эрта ва патологик рефлекс фаоллик билан намоён бўлиши мумкин. Бу эса ЭНМГни спастикликни эрта аниқлаш ва динамик кузатишда муҳим воситага айлантиради [3].

Спастикликда агонист ва антагонист мушаклар ўртасидаги мувозанатнинг бузилиши алоҳида аҳамиятга эга. Нормал ҳаракатда бу мушаклар кетма-кет ва мувофиқлашган тарзда фаоллашади, спастикликда эса уларнинг патологик бир вақтда фаоллашуви кузатилади. Ушбу коактивация ҳаракатни барқарорлаштиргандек кўринса-да, амалда уни секинлаштиради, қўполлаштиради ва энергия сарфини оширади. ЭНМГ ушбу ҳолатни аниқ қайд этиб, спастикликнинг функционал оқибатларини баҳолаш имконини беради [11].

Муҳим жиҳатлардан яна бири шундаки, спастиклик электрофизиологик жиҳатдан бир хил ҳодиса эмас. Баъзи беморларда у асосан рефлектор механизмлар устунлиги билан кечса, бошқаларда тоник фаоллик ёки патологик ко-активация етакчи бўлиши мумкин. Клиник шкалалар бу фарқларни ажрата олмайди, ЭНМГ эса спастикликнинг индивидуал “электрофизиологик профили”ни шакллантириш имконини беради. Бу эса даволаш ва реабилитация стратегиясини танлашда муҳим аҳамият касб этади [19].

Шу нуқтаи назардан, спастикликни ЭНМГ ёрдамида баҳолаш уни фақат мавжуд ёки мавжуд эмас деган иккилик ёндашувдан чиқариб, мураккаб ва ўзгарувчан ҳаракат назорат бузилиши сифатида талқин қилишга имкон беради. ЭНМГ спастикликни клиник белги сифатида эмас, балки электрофизиологик жараён сифатида очиб беради ва унинг оғирлиги, механизми ҳамда вақт давомида қандай ўзгараётганини объектив тарзда баҳолаш имконини яратади.

Инсулт реабилитациясида ЭНМГга асосланган ёндашувлар

Инсултдан кейинги реабилитация кўпинча бир хил алгоритмлар асосида олиб борилади. Яъни мушак кучини ошириш, спастикликни камайтириш ва функционал машқларни такрорлаш. Бироқ клиник амалиёт шуни кўрсатадики, бир хил ёндашув турли беморларда кескин фарқли натижалар беради. Бу фарқ кўпинча клиник баҳолаш орқали тушунтириб бўлмайди [17]. Бизнинг фикримизча, бу ҳолат реабилитация қарорлари ҳаракат тизимининг реал функционал ҳолатига эмас, унинг ташқи кўринишига асосланиб қабул қилиниши билан боғлиқ.

ЭНМГ ушбу муаммони тубдан ўзгартирувчи восита бўлиши мумкин. У мушакнинг “ишлаяптими ёки йўқми” деган саволдан кўра, қандай ишлаётгани, қайси ҳаракат бирликлари ҳисобига ва қандай юкланишда ишлаётганини кўрсатади. Бу маълумот реабилитация стратегиясини танлашда ҳал қилувчи аҳамиятга эга [8]. Бизнинг қарашимизда, ЭНМГ реабилитацияда баҳолаш усули эмас, балки қарор қабул қилиш механизми сифатида ишлатилиши керак.

ЭНМГ асосида реабилитацияни йўналтириш, аввало, мушакларни уч тоифага ажратиш имконини беради: тикланиш потенциалига эга бўлган мушаклар, асосан компенсатор механизмлар ҳисобига ишлаётган мушаклар ва функционал жиҳатдан деярли иштирок этмаётган мушаклар. Клиник кўринишда бу мушаклар бир хил баҳоланиши мумкин, бироқ электрофизиологик уларнинг реабилитацияга жавоби тубдан фарқ қилади [21]. Шу са-

бабли, ЭНМГсиз олиб борилган реабилитация баъзида нотўғри мушакларга нотўғри юклама бериш билан якунланади.

Ҳаракат вақтида ЭНМГ орқали мушакларнинг фаоллашиш кетма-кетлиги ва вақти таҳлил қилинганда, кўпинча тикланиш эмас, балки компенсатор стратегиялар устунлиги аниқланади. Бундай ҳолларда бемор ҳаракатни бажараётгандек кўринса-да, у нотўғри ҳаракат нақшлари ҳисобига амалга оширилади [2]. Биз-нингча, реабилитация асосий вазифаси кучни ошириш эмас, балки нотўғри компенсацияни эрта аниқлаш ва уни мустаҳкамланишидан олдин тўхтатиш бўлиши керак. ЭНМГ айнан шу вазифани бажаришга имкон беради.

ЭНМГга асосланган ёндашув биофеедбаск ва функционал электр стимуляция билан уйғунлашганда айниқса самарали бўлади. Мушак фаоллиги ва реал вақт режимида кузатилганда, бемор ва мутахассис қайси мушак ҳақиқатан ҳам вазифани бажараётганини ва қайси бири фақат фон фаоллиги билан чекланаётганини аниқ кўра олади. Бу реабилитацияни интуитив жараёндан бошқариладиган жараёнга айлантиради [10]. Бизнинг фикримизча, бу ўзгариш реабилитация самарадорлигига жисмоний машқлар интенсивлигидан кам бўлмаган даражада таъсир кўрсатади.

Муҳим жиҳатлардан яна бири шундаки, ЭНМГ реабилитация жараёнида вақт ўтиши билан юзага келадиган ўзгаришларни динамик тарзда баҳолаш имконини беради. Клиник яхшиланиш бўлмасдан туриб ҳам электрофизиологик ижобий силжишлар пайдо бўлиши мумкин ёки аксинча, клиник яхшиланиш фонида компенсатор механизмлар чуқурлашиб бориши эҳтимоли мавжуд [14]. Шу нуқтаи назардан, ЭНМГ реабилитацияни фақат бошлашда эмас, балки унинг тўғри йўналишда кетаётганини назорат қилишда ҳам муҳим восита ҳисобланади.

Хулоса қилиб айтганда, ЭНМГга асосланган реабилитация ёндашуви инсултдан кейинги тикланишни стандарт протоколлар мажмуи сифатида эмас, балки индивидуал ҳаракат тизимига мослаштирилган жараён сифатида талқин қилишга имкон беради. Бизнингча, ЭНМГ реабилитацияда ёрдамчи техника эмас, шахсийлаштирилган терапиянинг марказий элементларидан бири бўлиши лозим.

Ўткир инсултда игнали ЭНМГнинг ўрни

Ўткир инсулт даврида электрофизиологик текширувлар, хусусан игнали ЭНМГ амалиётда нисбатан кам қўлланилади. Бунга бир қатор омиллар сабаб бўлади: беморнинг оғир бўлган умумий аҳволи, инвазивликка эҳтиёткор муносабат ҳамда кенг тарқалган қарашга кўра, эрта даврда периферик ҳаракат аппаратида сезиларли ўзгаришлар бўлмаслиги ҳақидаги тасаввурлар. Натижада игнали ЭНМГ кўпинча инсултдан кейинги кечки босқичларга қолдирилади ёки умуман режалаштирилмайди [24]. Бизнингча, бу ёндашув ўткир даврнинг муҳим диагностик ва прогностик имкониятларини чеклайди.

Ўткир инсулт марказий зарба сифатида қаралса-да, унинг периферик ҳаракат тизимига таъсири вақт бўйича кечиккан ва бир маромда бўладиган жараён эмас. Кортикоспинал таъсирнинг кескин камайиши спинал мотонейронлар фаоллашиш чегарасининг ўзгаришига, ихтиёрий фаолликнинг сусайишига ва ҳаракат бирликлари синхронизациясининг бузилишига олиб келиши мумкин. Ушбу ўзгаришлар анатомик денервация шаклида намоён бўлмаслиги мумкин, бироқ игнали ЭНМГ орқали функционал даражада аниқланиши эҳтимоли мавжуд [18].

Ўткир даврда игнали ЭНМГда кузатиладиган энг муҳим белгилар спонтан фаолликнинг мавжудлиги ёки йўқлиги, ихтиёрий қисқариш вақтида ресруитментнинг сифати ҳамда ҳаракат бирлик потенциалларининг фаоллашиш хусусиятларидир. Бу белгилар мушак ва нервда қайтарилмас структурал шикастланишни эмас, балки марказий бошқарувнинг бузилиши фонида юзага келган функционал дисбалансни акс эттиради. Шу жиҳатдан, эрта ЭНМГ натижалари “зарарланиш даражаси”и эмас, балки ҳаракат тизимининг

мослашувчанлик имкониятларини кўрсатиши мумкин [5]. Бизнинг фикримизча, ўткир инсултда игнали ЭНМГнинг асосий қиймати ташхис қўйишдан кўра, прогнозлаш билан боғлиқ. Ихтиёрий фаолликнинг мутлақ йўқлиги, жуда суст ёки парчаланиб кетган ресруитмент нақшлари кейинги даврда секин ва чекланган тикланиш эҳтимолини кўрсатиши мумкин. Аксинча, клиник заифлик фонида ҳам ҳаракат бирликлари фаоллашувининг сақланиб қолиши ҳатто номукаммал шаклда бўлса ҳам, реабилитацияга жавоб бериш потенциалидан далолат беради. Бу ахборот реабилитацияни қачон ва қандай интенсивликда бошлаш масаласида муҳим аҳамиятга эга.

Шу билан бирга, ўткир даврда игнали ЭНМГни мутлақ ва универсал усул сифатида талқин қилишдан эҳтиёт бўлиш лозим. Ушбу текширув бемор танлашни, вақтни тўғри белгилашни ва натижаларни контекстда талқин қилишни талқин талаб қилади [26]. Бизнингча, игнали ЭНМГ ўткир инсултда стандарт текширув эмас, балки танланган ҳолатларда қўлланиладиган, юқори маълумот берувчи усул сифатида қаралиши керак. Унинг натижалари клиник ҳолат, нейротасвирлаш ва бошқа электрофизиологик кўрсаткичлар билан биргаликда баҳоланиши лозим.

Ўткир даврдан сурункали босқичга ўтишда игнали ЭНМГ динамик ўзгаришларни кузатиш имконини беради. Дастлаб функционал характерга эга бўлган бузилишларнинг вақт ўтиши билан қайта тикланиши ёки аксинча, иккиламчи периферик ўзгаришлар билан чуқурлашиши мумкин. Ушбу жараёнларни эрта босқичда аниқлаш кейинги даволаш ва реабилитация стратегиясини мослаштиришга хизмат қилади [21].

Хулоса қилиб айтганда, игнали ЭНМГ ўткир инсултда кам қўлланилишига қарамай, у марказий зарбадан кейинги ҳаракат тизими ҳолати ҳақида ноёб ва чуқур ахборот бера оладиган усулдир. Бизнингча, у ўткир даврни “кутиш босқичи” сифатида эмас, балки ҳаракат тизимининг дастлабки жавобини тушуниш имконияти сифатида кўришга ёрдам беради ва шу орқали кейинги тикланиш йўлини янада онгли равишда режалаштиришга замин яратади.

Инсултда ЭНМГ сигналларини баҳолаш ва сунъий интеллект асосидаги ёндашувлар

Электронейромиографик сигналлар мураккаб, кўп ўлчамли ва вақт бўйича ўзгарувчан бўлиб, уларни анъанавий визуал ёки оддий квантитатив таҳлил ёрдамида таҳлил қилиш қийин. Клиник амалиётда ЭНМГ кўпинча бир нечта кўрсаткичлар – амплитуда, латенсия ёки фаоллик мавжудлиги билан чекланади. Бироқ бу ёндашув ЭНМГ сигналларида яширинган мураккаб нақшларни, айниқса инсултдан кейинги динамик қайта ташкил топиш жараёнларини очиб бера олмайди [8]. Бизнингча, айнан шу нуқтада ҳисоблаш усуллари ва сунъий интеллект ЭНМГнинг ҳақиқий салоҳиятини юзага чиқаради.

Сунъий интеллект ёндашувларининг асосий афзаллиги ЭНМГ сигналига алоҳида параметрлар мажмуи сифатида эмас, балки мураккаб тузилишга эга бўлган бутун жараён сифатида қараш имконини беришидадир. Ҳаракат бирликлари фаоллигининг вақт бўйича тақсимланиши, фазовий нотекислик, частота спектридаги ўзгаришлар ва ҳаракатга мослашувчан жавоблар алоҳида-алоҳида баҳоланишдан кўра, ягона модел доирасида таҳлил қилинганда анча мазмунли ахборот беради [12]. Бу ёндашув инсултдан кейинги ҳаракат тизимини “нормал ёки патологик” деган иккилик мезондан чиқариб, узлуксиз ва индивидуал спектр сифатида кўришга имкон беради.

Бизнинг фикримизча, сунъий интеллектнинг ЭНМГдаги энг муҳим вазифаси шифокорни алмаштириш эмас, балки кўз билан кўриб бўлмайдиган электрофизиологик нақшларни кўринадиган қилишдир. Масалан, клиник жиҳатдан бир хил даражада заифликка эга бўлган икки беморда ЭНМГ сигналларининг ишки тузилиши тубдан фарқ қилиши мумкин. Анъанавий таҳлилда бу фарқ эътибордан четда

қолади, ҳисоблаш моделларида эса у прогноз ва реабилитацияда жавобни белгиловчи асосий омилга айланишини мумкин [6].

Ҳисоблаш ёндашувлари ЭМГ асосида прогнозлаш масаласида ҳам янги имкониятлар яратади. Инсултдан кейинги тикланиш кўпинча ноаниқ ва индивидуал бўлиб, клиник баҳолаш унинг йўналишини олдиндан аниқ белгилашга қодир эмас. ЭНМГ сигналларидан олинадиган мураккаб хусусиятлар асосида яратилган моделлар ҳаракат тикланиши эҳтимолини, реабилитацияга жавоб бериш даражасини ёки компенсатор стратегияларнинг устунлашишини олдиндан кўрсатиши мумкин [13]. Бу эса реабилитацияни кечиккан реакция эмас, балки олдиндан режалаштирилган стратегия сифатида ташкил этиш имконини беради.

Шу билан бирга, сунъий интеллектни ЭНМГга қўллашда эҳтиёткорлик муҳим. Алгоритмлар клиник контекстдан узилган ҳолатда талқин қилинганда, улар нотўғри ёки фойдасиз хулосаларга олиб келиши мумкин. Бизнингча, сунъий интеллект клиник қарорни автоматик чиқарувчи тизим эмас, балки шифокор тафаккурини кенгайтирувчи восита сифатида ишлатилиши керак. ЭНМГ сигналидаги мураккабликни соддалаштириш эмас, балки уни клиник маънога эга бўлган шаклда талқин этиш асосий мақсад бўлиши лозим [29].

Келажакда ЭНМГ ва сунъий интеллект интеграцияси инсултдан кейинги ҳаракат бузилишларини баҳолашни статик текширувдан динамик мониторинг тизимига айлантириши мумкин. Реабилитация жараёнида реал вақт режимида ўзгариб бораётган электрофизиологик кўрсаткичлар асосида терапия интенсивлиги, йўналиши ва давомийлигини мослаштириш имконияти пайдо бўлади [4]. Бизнингча, бу ёндашув ЭНМГни фақат диагностик усулдан чиқариб, индивидуал бошқариладиган реабилитация тизимининг марказий компонентига айлантиради.

Хулоса қилиб айтганда, сунъий интеллект ЭНМГни мураккаблаштирувчи эмас, балки уни клиник жиҳатдан янада мазмунли қилувчи омилдир. Тўғри қўлланилганда, у инсултдан кейинги ҳаракат тизимини тушуниш, прогнозлаш ва бошқаришда янги босқични бошлаб бериши мумкин. Бизнингча, ЭНМГ ва сунъий интеллект интеграцияси келажак масаласи эмас, балки ҳозирданоқ онгли равишда шакллантирилиши керак бўлган клиник концепциядир.

Муҳокама.

Мазкур мақолада келтирилган ёндашувлар инсултдан кейинги ҳаракат бузилишларини баҳолашда электронейромиографиянинг ўрни анъанавий талқиндан анча кенг эканини кўрсатади. ЭНМГни фақат периферик нерв-мушак тизимини текширувчи ёрдамчи усул сифатида кўриш ҳаракат тизимининг марказий зарбага жавобан қандай қайта ташкил топишини тушунишда жиддий чекловлар яратади [22]. Бизнингча, инсултдан кейинги ҳаракат дисфункцияси марказий ва периферик жараёнларнинг қатъий ажралган натижаси эмас, балки уларнинг узлуксиз ва ўзаро боғланган ўзгаришлари маҳсулидир.

Мақолада муҳокама қилинган патофизиологик механизмлар шуни кўрсатадики, марказий зарбадан кейин периферик ҳаракат аппарати пассив ҳолатда қолмайди. Ҳаракат бирликлари фаоллиги, ресруитмент нақшлари, мушак ичидаги фазовий фаоллик ва рефлектор механизмлар марказий бошқарувдаги ўзгаришларга мослашган. Ушбу мослашув ҳар доим ҳам функционал тикланишга олиб келмайди, айрим ҳолатда у компенсатор ва самарасиз ҳаракат мослашишлари мустаҳкамланишига сабаб бўлади. ЭНМГнинг асосий вазифаси айнан шу икки ҳолатни, яъни ҳақиқий тикланиш ва яширин компенсацияни клиник белгилар пайдо бўлишидан олдин ажратиб бериш имкониятидир [21].

Замонавий ЭНМГ технологиялари, хусусан юқори зичликли юзаки ЭМГ, мушак фаоллигини вақт ва фазо бўйича таҳлил қилиш орқали нейропластикликни абстракт тушунчадан ўлчанадиган ҳодисага

айлантиради. Бу ёндашув клиник баҳолашда кўпинча эътибордан четда қоладиган мушак ичидаги нотекис фаоллик ва патологик қайта тақсимланишни аниқлашга имкон беради [8]. Бизнингча, айнан ушбу “яширин қатлам” инсултдан кейинги ҳаракат сифатини белгиловчи муҳим омиллардан биридир.

Спастикликка электрофизиологик нуқтаи назардан ёндашиш унинг клиник баҳосидаги субъективликни камайтиради. Спастикликни фақат тонус ошиши сифатида эмас, балки ҳаракат бошқарувининг бузилган тартиби сифатида талқин қилиш реабилитация ёндашувларини тубдан ўзгартиради. ЭНМГ орқали аниқланадиган тоник фаоллик, рефлектор жавоблар ва агонист-антагонист ко-активация спастикликнинг электрофизиологик профилини шакллантириш имконини беради [3]. Бу эса бир хил клиник баҳога эга бўлган беморларда нега терапия самараси фарқ қилишини тушунтиради.

Реабилитация контекстида ЭНМГга асосланган ёндашув стандарт протоколлар билан индивидуал ҳаракат тизими ўртасидаги тафовутни яққол кўрсатади. Бизнингча, реабилитация самарадорлиги машқлар интенсивлигидан кўра, қайси мушаклар ва қайси ҳаракат шакллари мустаҳкамланаётганига кўпроқ боғлиқ. ЭНМГ нотўғри компенсацияни эрта аниқлаш ва уни барқарорлашиб кетишидан олдин тузатиш имконини беради [10]. Шу жиҳатдан, ЭНМГ реабилитацияда баҳоловчи восита эмас, балки фаол бошқарув механизми сифатида қаралиши лозим.

Ўткир инсулт даврида игнали ЭНМГни қўллаш масаласи баҳсли бўлса-да, ушбу мақолада келтирилган қарашлар эрта электрофизиологик ўзгаришлар ҳаракат тизимининг тикланиш потенциали ҳақида муҳим ахборот бериши мумкинлигини кўрсатади [24]. Бу ахборот ташхисдан кўра прогнозлаш ва реабилитацияни режалаштириш учун муҳимроқ бўлиб, ўткир даврни “кутиш босқичи” сифатида эмас, балки фаол баҳолаш даври сифатида талқин қилиш зарурлигини таъкидлайди.

Сунъий интеллект ва ҳисоблаш машиналари ЭНМГни янги босқичга олиб чиқади. Бизнингча, ушбу технологияларнинг асосий вазифаси клиник қарорни автоматлаштириш эмас, балки ЭНМГ сигналларида яширинган мураккаб нақшларни очиб беришдир. Клиник жиҳатдан ўхшаш беморлар орасидаги электрофизиологик фарқларни аниқлаш, прогнозлаш ва терапияни мослаштириш имкониятлари айнан шу интеграция орқали кенгаяди. Шу билан бирга, сунъий интеллект фақат клиник контекст билан уйғунлашгандагина ҳақиқий қийматга эга бўлиши мумкин [29].

Умуман олганда, ушбу мақолада ЭНМГ инсултдан кейинги ҳаракат бузилишларини баҳолашда ёрдамчи ёки иккиламчи усул сифатида эмас, балки марказий ва периферик жараёнларни боғловчи асосий восита сифатида талқин қилинади. Бизнингча, ЭНМГга бундай ёндашув ҳаракат тикланишини тушуниш, прогнозлаш ва бошқаришда янада аниқлик ва индивидуалликни таъминлайди ҳамда инсулт реабилитациясида концептуал ўзгаришларга замин яратади.

Хулоса.

Инсултдан кейинги ҳаракат бузилишларни баҳолашда электронейромиография анъанавий равишда периферик асоратларни аниқловчи ёрдамчи усул сифатида қаралиб келинган. Ушбу мақолада илгари сурилган қарашлар эса ЭНМГнинг роли бундан анча кенг эканини кўрсатади. Инсултда марказий зарарланиш бўлишига қарамай, унинг оқибатлари ҳаракат тизимининг барча даражаларида, яъни ҳаракат бирликларидан тортиб мушак ичидаги фаоллик тақсимланишигача намоён бўлади ва айнан ЭНМГ ушбу жараёнларни бевосита аниқлаш имконини беради.

ЭНМГ орқали ҳаракат бирликлари қайта ташкил топиши, мушак фаоллигининг фазовий ва вақт бўйича ўзгариши, спастикликнинг электрофизиологик профили ҳамда компенсатор ва ҳақиқий тикланиш ўртасидаги фарқ аниқланади.

Бу эса клиник баҳолаш билан электрофизиологик механизмлар ўртасидаги узилишни камайтиради ва ҳаракат дисфункциясини фақат натижа сифатида эмас, балки жараён сифатида талқин қилиш имконини беради. Шу нуқтаи назардан, ЭНМГ инсултдан кейинги ҳаракат тизими ҳолатини тушунтирувчи ва прогнозловчи восита сифатида алоҳида аҳамият касб этади.

Реабилитация жараёнида ЭНМГга асосланган ёндашув стандарт протоколлардан индивидуал ҳаракат тизимига мослаштирилган ҳолга ўтиш зарурлигини кўрсатади. Мушак кучини оширишдан кўра, тўғри ҳаракат стратегияларини шакллантириш ва самарасиз компенсацияни эрта аниқлаш реабилитация самарадорлигини белгиловчи асосий омиллардан бири бўлиб чиқади. ЭНМГ ушбу жараённи объектив ва динамик тарзда бошқариш имконини беради.

Ўткир инсулт даврида игнали ЭНМГнинг эҳтиёткорлик билан қўлланилиши ҳаракат тизимининг тикланиш потенциали ҳақида муҳим прогноз ахборотини тақдим этиши мумкин. Бу ёндашув ўткир босқични пассив кузатув даври эмас, балки кейинги реабилитация йўлини онгли белгилаш имконияти сифатида кўришга ундайди.

Сунъий интеллект ва ҳисоблаш ёндашувлари ЭНМГни янада чуқурроқ талқин қилиш имкониятларини очади. Тўғри клиник контекстда қўлланилганда, ушбу технологиялар электрофизиологик сигналларда яширин нақшларни аниқлаш, прогнозлаш ва шахсийлаштирилган реабилитацияни муҳим ёрдамчи воситага айланади. Бироқ уларнинг қиймати шифокор қарорини алмаштиришда эмас, балки уни янада асосли қилишда намоён бўлади.

Хулоса қилиб айтганда, электронейромиография инсултдан кейинги ҳаракат бузилишларини баҳолашда иккиламчи диагностик усул эмас, балки патофизиологияни тушуниш, тикланиш имкониятларини аниқлаш ва индивидуал реабилитация стратегияларини шакллантиришда марказий ўрин тутувчи восита сифатида қаралиши лозим. Бизнингча, ЭНМГга бундай ёндашув инсулт реабилитациясида клиник қарор қабул қилиш жараёнини янги босқичга олиб чиқади.

АДАБИЁТЛАР

1. Campanini I., Merlo A., Disselhorst-Klug C. et al. Fundamental concepts of bipolar and high-density surface EMG understanding and teaching for clinical, occupational, and sport applications // Sensors. – 2022. – Vol. 22, №11. – P. 4150.

2. Cheung V.C.K., Turolla A., Agostini M. et al. Muscle synergy patterns as physiological markers of motor cortical damage // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2012. – Vol. 109, №36. – P. 14652-14656.

3. Dietz V., Sinkjaer T. Spastic movement disorder: impaired reflex function and altered muscle mechanics // Lancet Neurol. – 2007. – Vol. 6, №8. – P. 725-733.

4. Dobkin B.H. Rehabilitation after stroke // New Engl. J. Med. – 2005. – Vol. 352, №16. – P. 1677-1684.

5. Dumitru D., Amato A.A., Zwarts M.J. Electrodiagnostic Medicine. – 2nd ed. – Philadelphia: Hanley & Belfus, 2002.

6. Farina D., Holobar A. Characterization of human motor units from surface EMG decomposition // Proc. IEEE. – 2016. – Vol. 104, №2. – P. 353-373.

7. Farina D., Merletti R. A novel approach for estimating muscle fiber conduction velocity by spatial filtering of surface EMG signals // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 2003. – Vol. 50, №12. – P. 1340-1351.

8. Farina D., Merletti R., Enoka R.M. The extraction of neural strategies from the surface EMG // J. Appl. Physiol. – 2014. – Vol. 117, №11. – P. 1215-1230.

9. Farina D., Negro F., Jiang N. Identification of common synaptic inputs to motor neurons from the rectified electromyogram // J. Physiol. – 2013. – Vol. 591, №10. – P. 2403-2418.

10. Giggins O.M., Persson U.M., Caulfield B. Biofeedback in rehabilitation // J. Neuroeng. Rehabil. – 2013. – Vol. 10. – P. 60.

11. Gracies J.M. Pathophysiology of spastic paresis. I: Paresis and soft tissue changes // Muscle Nerve. – 2005. – Vol. 31, №5. – P. 535-551.

12. Holobar A., Zazula D. Multichannel blind source separation using convolution kernel compensation // IEEE Trans. Signal Process. – 2007. – Vol. 55, №9. – P. 4487-4496.

13. Krakauer J.W., Carmichael S.T., Corbett D., Wittenberg G.F. Getting neurorehabilitation right: what can be learned from animal models? // Neurorehabil. Neural Repair. – 2012. – Vol. 26, №8. – P. 923-931.

14. Kwakkel G., Kollen B.J., Krebs H.I. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke // Neurorehabil. Neural Repair. – 2008. – Vol. 22, №2. – P. 111-121.

15. Lance J.W. The control of muscle tone, reflexes, and movement: Robert Wartenberg Lecture // Neurology. – 1980. – Vol. 30, №12. – P. 1303-1313.

16. Langhorne P., Bernhardt J., Kwakkel G. Stroke rehabilitation // Lancet. – 2011. – Vol. 377, №9778. – P. 1693-1702.

17. Langhorne P., Coupar F., Pollock A. Motor recovery after stroke: a systematic review // Lancet Neurol. – 2009. – Vol. 8, №8. – P. 741-754.

18. Lemon R.N. Descending pathways in motor control // Annu. Rev. Neurosci. – 2008. – Vol. 31. – P. 195-218.

19. Li S., Francisco G.E., Rymer W.Z. A new definition of spasticity: functional, clinical, and mechanistic perspectives // Muscle Nerve. – 2021. – Vol. 64, №5. – P. 521-530.

20. McComas A.J. Motor unit estimation: methods, results, and present status // Muscle Nerve. – 1995. – Vol. 18, №4. – P. 369-379.

21. McComas A.J. Motor unit remodeling after neurological injury // Muscle Nerve. – 2001. – Vol. 24, №5. – P. 639-647.

22. Nudo R.J. Recovery after brain injury: mechanisms and principles // Front. Hum. Neurosci. – 2013. – Vol. 7. – P. 887.

23. Pincheira P.A., Martinez-Valdes E., Guzman-Venegas R.A. et al. HD-sEMG in post-stroke upper limb muscle assessment // Front. Neurol. – 2021. – Vol. 12. – P. 650968.

24. Preston D.C., Shapiro B.E. Electromyography and Neuromuscular Disorders: Clinical-Electrophysiologic Correlations. 3rd ed. – Philadelphia: Elsevier, 2013.

25. Sheean G. The pathophysiology of spasticity // Europ. J. Neurol. – 2002. – Vol. 9, Suppl. 1. – P. 3-9.

26. Sheean G., McGuire J.R. Spastic hypertonia and movement disorders: pathophysiology, clinical features, and quantification // Muscle Nerve. – 2009. – Vol. 39, №5. – P. 693-709.

27. Sinkjaer T., Magnussen I. Passive, intrinsic and reflex-mediated stiffness in ankle dorsiflexors // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry. – 1994. – Vol. 57, №1. – P. 47-52.

28. Tian Xie, Yan Leng, Yihua Zhi et al. Quantitative assessment of spasticity using surface EMG // J. Neural Eng. – 2023. – Vol. 20, №1. – P. 016001.

29. Topol E.J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence // Nat. Med. – 2019. – Vol. 25, №1. – P. 44-56.

30. Tresch M.C., Jarc A. The case for and against muscle synergies // Curr. Opin. Neurobiol. – 2009. – Vol. 19, №6. – P. 601-607.