

## ОРИГІНАЛЬНІ СТАТТІ

УДК 617.547-089.8:616.8-003-06](045)

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-5987202145-12>**Практичні аспекти інтраопераційного нейромоніторингу у хворих із різною патологією хребта****О. О. Барков, Д. Р. Дуплій**

ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України», Харків

*Objective.* To study the operating parameters and phenomena of intraoperative monitoring and to identify the specificity and sensitivity of its different modalities associated with postoperative neurological complications in patients with different spinal pathologies. *Methods.* The intraoperative neurophysiological monitoring (IOM) protocols of 88 patients who underwent spinal surgeries were analyzed: kyphoscoliotic spinal deformities — 58 (68 %), traumatic — 12 (13.3 %), degenerative diseases — 10 (11.7 %), neoplasms — 6 (6.7 %). In 33 (38.4 %) cases, a combination of modalities of motor evoked potentials (MEP) and transpedicular screws stimulation (TSS) was used, in 36 (41.9%) — only MEP, 17 (19.8 %) — TSS. In all cases, freerun and triggered EMG was used. *Results.* The most stable MEPs were recorded at mm. tibialis anterior, mm. abductor hallucis longus. It has been proven that an unfavorable and reliable factor of the anxiety sign is a unilateral sustained decrease in the MEP amplitude by more than 80 %. According to the TSS results 424 (97.5 %) screws are installed correctly, 1 (0.2 %) false negative case of incorrect installation. False positive results for the TSS test ranged from 34.7 to 15.4 %, depending on the chosen critical threshold of the current applied to the pedicle screw. We consider the threshold of the TSS test at 13 mA satisfactory, and below it, unsatisfactory. A group of patients was identified who had 72 screws (16.6% of all analyzed) who, according to the results of the TSS test, received an unsatisfactory assessment, and X-ray did not reveal any deviations in the position of the screws. *Conclusions.* IOM modalities are highly sensitive and specific to damage to the structures of the spinal cord and spinal nerves, but dependence on a number of external factors reduces their information content, which leads to false positive and false negative results. It was established, that the dynamics of the MEP amplitudes of the target muscles differs in information content and efficiency during surgery due to individual morphological and motor characteristics. *Key words.* Intraoperative monitoring, motor evoked potentials, screw stimulation test, spinal pathology.

*Мета.* Дослідити робочі параметри та явища інтраопераційного моніторингу та виявити специфічність і чутливість різних його модальностей у зв'язку з післяопераційними неврологічними ускладненнями в пацієнтів із різною патологією хребта. *Методи.* Проаналізовано протоколи інтраопераційних нейрофізіологічних моніторингів (ІОМ) 88 хворих, яким проведено хірургічні втручання на хребті: кіфосколіотичні деформації хребта — 58 (68 %), травматичні — 12 (13,3 %), дегенеративні захворювання — 10 (11,7 %), новоутворення — 6 (6,7 %). У 33 (38,4 %) випадках використано поєднання модальностей моторних викликаних потенціалів (МВП) і стимуляцію транспедиккулярних гвинтів (СТГ), у 36 (41,9 %) — лише МВП, 17 (19,8 %) — СТГ. У всіх випадках застосовано самопоточну і тригерну електроміографію. *Результати.* Найстабільніші МВП виявлено на mm. tibialis anterior, mm. abductor hallucis longus. Підтверджено, що несприятливим і достовірним чинником ознаки тривоги є однобічне стійке зниження амплітуди МВП більш ніж на 80 %. За результатами СТГ 424 (97,5 %) гвинти встановлено коректно, 1 (0,2 %) — хибно негативний випадок некоректного проведення. Хибно позитивні результати за тестом СТГ склали від 34,7 до 15,4 % залежно від обраного критичного порога сили струму, який надходив на транспедиккулярний гвинт. Уважаємо поріг тесту СТГ у 13 мА задовільним, а нижчий — незадовільним. Визначено групу пацієнтів, у яких встановлено 72 гвинти (16,6 % від усіх аналізованих), котрі за результатами тесту СТГ отримали незадовільну оцінку, а рентгенологічно не виявлено похибок у положенні гвинтів. *Висновки.* Модальності ІОМ високочутливі та специфічні до ушкоджень структур спинного мозку та спинномозкових нервів, але залежність від низки зовнішніх чинників знижує їхню інформативність, що призводить до отримання хибно позитивних і хибно негативних результатів. Визначено, що динаміка амплітуд МВП м'язів-мішеней відрізняється за інформативністю й ефективністю під час хірургічного втручання через індивідуальні морфологічні та моторні характеристики.

**Ключові слова.** Інтраопераційний моніторинг, моторні викликані потенціали, тест стимуляції гвинтів, патологія хребта

## Вступ

Проведення інтраопераційного моніторингу (ІОМ) під час хірургічних втручань на хребті стало рутинною практикою в усьому світі [1]. Моніторування викликаних відповідей на таргетних м'язах дозволяє в режимі реального часу виявити іритацию нервових структур у відповідь на хірургічний вплив і негайно вжити заходів щодо усунення неврологічних ускладнень. Це підвищує впевненість хірурга в безпеці своїх дій під час маніпуляцій на хребті, наприклад: у разі корекції деформацій хребта, після проведення транспедикулярних гвинтів, що значно впливає на якість передбачуваного результату хірургічного лікування. Існує велика розбіжність критеріїв оцінювання ІОМ, їхньої специфічності, що ускладнює безпосередню інтерпретацію інтраопераційних показників [2–4]. Саме це обумовлює необхідність подальших досліджень параметрів ІОМ визначення їхньої чутливості й специфічності.

**Мета дослідження:** проаналізувати робочі параметри та явища інтраопераційного моніторингу та виявити специфічність і чутливість різних його модальностей у зв'язку з післяопераційними неврологічними ускладненнями у хворих із різною патологією хребта.

## Матеріал і методи

Роботу виконано за планом науково-дослідних робіт ДУ «ПХС ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України»: «Вивчити основні помилки та ускладнення транспедикулярної фіксації в хірургії хребта та розробити заходи їх профілактики та лікування», № державної реєстрації 0118U006949. Дослідження було обговорено та схвалено на засіданні комітету з біоетики при ДУ «ПХС ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України» (протокол № 180 від 14.05.2018).

Проаналізовано протоколи інтраопераційних нейрофізіологічних моніторингів 88 хворих, яким виконано хірургічні втручання на хребті за період із березня 2014 року по листопад 2021. Усі операції виконано із заднього доступу. У табл. 1 наведено розподіл пацієнтів за нозологіями. Два протоколи виключено з аналізу за технічними причинами (наявність зовнішніх електричних наведень).

ІОМ проводили за допомогою нейрофізіологічної системи для хірурга фірми «Medtronic» «NIM-Eclipse system». Під час виконання процедури керувалися методичними рекомендаціями Американського товариства нейрофізіологів [5].

Протягом хірургічного втручання комбіновано застосовували модальності транскраніальної електричної стимуляції (ТкЕС) із реєстрацією моторних викликаних потенціалів (МВП), самопоточну та тригерну електроміографію (ЕМГ) (*free run emg* в англійській літературі), модальність стимуляції транспедикулярних гвинтів (СТГ). Монтаж електродів проводили після початкової анестезії й інтубації пацієнта за умов ендотрахеального наркозу. Використано одноразові голчасті електроди фірми «Medtronic». Залежно від рівня інструментації, моніторували розташовані у відповідних міотомах м'язи: *mm. abdominis rectus* (Th<sub>II</sub>–Th<sub>VIII</sub>), *mm. abdominis obliquus* (Th<sub>X</sub>–Th<sub>XII</sub>), *mm. vastus lateralis* (L<sub>II</sub>–L<sub>IV</sub>), *mm. tibialis anterior* (L<sub>V</sub>–S<sub>I</sub>), *mm. abductor hallucis longus* (S<sub>I</sub>–S<sub>II</sub>) [6].

Стимулювальні спіральні електроди розташовували в ділянці проєкції моторної кори прецентральної звивини головного мозку в точках С3, С4 згідно з міжнародною класифікацією для накладання електродів під час електроенцефалографії (ЕЕГ) [5]. МВП викликали одиничними стимулами тривалістю 0,2 мс і напругою від 200 до 600 В. Реєстрували МВП одночасно на восьми каналах, де оцінювали амплітуду, латентність і форму кожного потенціалу. Першу стимуляцію проводили до початку втручання в положенні на спині, другу — після повороту в положення на животі. Отримані амплітуди МВП (від піка до піка) приймали за індивідуальні референтні значення (baseline) для хворого. Рекомендована мінімальна ефективна амплітуда МВП має перевищувати 50 мкВ [7].

Модальність СТГ базувалася на різниці електричного опору кісткової та нервової тканин. За допомогою хірургічного щупа на головку гвинта подавали постійний струм інтенсивністю від 0 до 30 мА. Якщо гвинт оточено кістковою тканиною, яка має високий опір, то струм залишається в межах штифт-каналу за сили струму до 30 мА, і не спричинює тригерну активність м'язів. Тест закінчується, результат вважається «відмінним». У разі пенетрації гвинта в спинномозковий канал

Таблиця 1  
Розподіл пацієнтів за нозологією

| Нозологія                         | Кількість хворих (n = 86) |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Кіфосколиотичні деформації хребта | 58 (68,3 %)               |
| Травматичні ушкодження хребта     | 12 (13,3 %)               |
| Дегенеративні захворювання хребта | 10 (11,7 %)               |
| Новоутворення хребта              | 6 (6,7 %)                 |

(тобто за його некоректного розташування) струм поширюється в напрямку меншого опору через гвинт і пробій у дужці хребця до спинномозкового каналу, тобто відбувається витік струму. Це, у свою чергу, призводить до збудження нервового корінця, що проявляється як тригерна ЕМГ-активність у відповідному міотомі за меншої інтенсивності стимулу, аніж у випадку неушкодженого кіркового шару. Поріг збудження корінця спинномозкового нерва дорівнює 5 мА [8]. Отже, виникнення тригерної ЕМГ-активності в разі сили постійного струму менш ніж 6–10 мА може бути приводом для перепроведення транспедикулярного гвинта. Відсутність ЕМГ-активності в разі сили струму 30 мА є відмінною ознакою коректності встановлення транспедикулярного гвинта, 20–29 мА — доброю, а 10–19 мА — невизначеною, менше за 10 мкВ — незадовільною [8]. За наявності витіку струму в разі сили стимулу менше ніж 10 мА тест СТГ автоматично припиняється, «NIM-Eclipse system» надає сигнал тривоги у вигляді червоного кольору індикатора на моніторі та хірургічному щупі. Якщо витік відбувається за сили стимулу 10–19 мА, тест СТГ припиняють, надається сигнал попередження у вигляді жовтого індикатора. Якщо витіку струму не відбувається до 30 мА, тест СТГ закінчується, надходить сигнал «відмінно» у вигляді зеленого кольору індикатора.

У 33 (38,4 %) випадках використано поєднання модальностей МВП і СТГ, у 36 (41,9 %) — лише МВП, 17 (19,8 %) — модальність СТГ. В усіх випадках застосовано самопоточну ЕМГ (free run emg).

Отже, щоб запобігти плутанини термінів під час оцінювання результатів нейрофізіологічного тесту коректності встановлення транспедикулярного гвинта, у подальшому називатимемо позитивним результатом тесту СТГ наявність сигналів «тривога» або «попередження», а нега-

тивним — їхню відсутність (тобто наявність сигналу «відмінно»).

Результати модальностей СТГ для виявлення перфорації гвинтом медіальної ніжки дуги хребця оцінювали на підставі визначень: 1) істинно негативний (відсутність сигналів «тривога» та «попередження» тесту СТГ, інтра- або післяопераційне рентгенологічне підтвердження коректності топографічного положення гвинта); 2) істинно позитивний (наявність сигналів «тривога» або «попередження» тесту СТГ, підтвердження некоректного розташування гвинта під час інтраопераційної рентгенографії); 3) хибно негативний (відсутність сигналів «тривога» та «попередження» тесту СТГ, але виявлення некоректно розташованого гвинта на інтра- або післяопераційних рентгенограмах); 4) хибно позитивний (наявність сигналів «тривога» чи «попередження» тесту СТГ на фоні коректного розташування гвинта за інтраопераційною рентгенографією) (рис. 1).

### Результати та їх обговорення

Середня тривалість операції склала 7 год і 6 хв. За цей час проводили від 4 до 35 ТкЕС, середня кількість ( $14,3 \pm 6,49$ ). МВП — складний потенціал дії, який викликається стимуляцією рухової кори головного мозку та реєструється на периферичних м'язах-мішенях. Для ефективного виконання МВП у пацієнта, який перебуває під загальною анестезією, важливим є правильний підбір параметрів стимуляції, таких як: частота подання стимулів, міжстимульний інтервал та інтенсивність стимулів. Наприклад, групою вчених із Франції на підставі аналізу 77 операцій із приводу сколіозу показано, що оптимальна частота для стимуляції з метою отримання інтраопераційних рухових потенціалів із переднього великогомілкового м'яза, становить від 5 до 7 мс (тривалість 5 мс), міжстимульний інтервал — від 2 до 4 мс, інтенсивність стимулів — від 300 до 700 В [9].

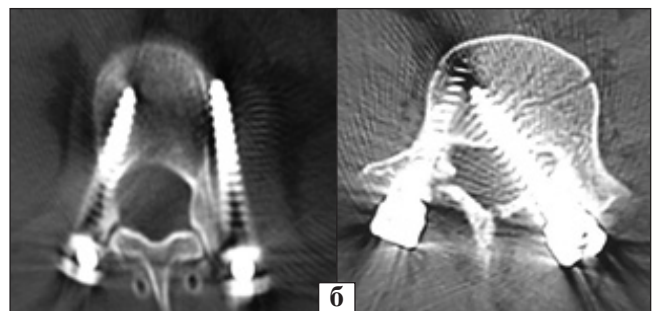


Рис. 1. Рентгенологічний контроль розташування гвинтів у хребці: коректне (а) та некоректне (б)

Зазвичай, у нашому дослідженні робоча сила стимулу складала 200 В. У випадках значних знижень амплітуд МВП або втрати сигналів (явище тривоги), для отримання ефективних МВП інтенсивність стимулу підвищували. Наприкінці хірургічного втручання, на момент накладання пов'язки, величина стимулу залишилася такою, як і на початку у 21 % випадків, у 12 % — стимул збільшували до 225 В, 14 % — до 250, 2 % — до 500 В (рис. 2).

Із плином операції та збільшенням напруги стимулу ТкЕС також зростала сила струму, яка діяла на пацієнта. У деяких випадках сила струму, що проходить через хворого, збільшувалася від першої стимуляції до останньої аж до 70 %.

Аналіз напруги стимулу ТкЕС і сили струму показав, що електричний опір тіла пацієнта істотно не змінюється або знижується до кінця операції. Кореляція між тривалістю хірургічного втручання та приростом сили струму виявилася статистично незначною ( $R < 0,5$ ) (рис. 3). Ці результати вказують, що вимушене підвищення вольтажу стимулу ТкЕС і збільшення сили струму, який проходить через пацієнта, імовірно обумовлено зниженням збудливості рухової зони кори головного мозку та провідності нервових структур унаслідок анестезії. Наприкінці хірургічного втручання, на етапі зашивання рани,

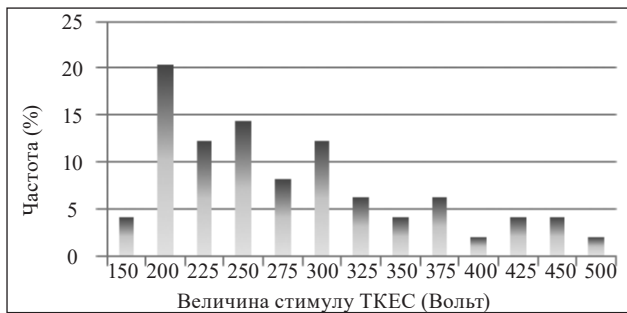


Рис. 2. Гістограма збільшення величин стимулів ТкЕС наприкінці хірургічного втручання

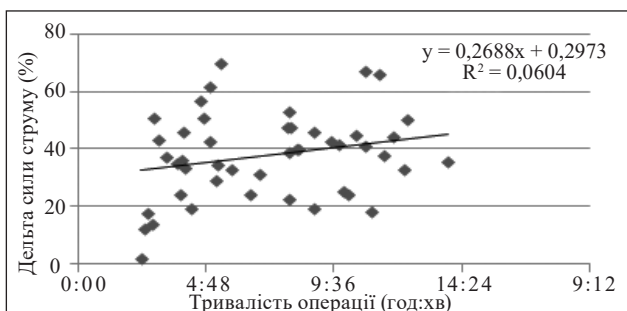


Рис. 3. Кореляція між приростом сили струму, який проходить через пацієнта, відносно референтного значення, та тривалістю хірургічного втручання

у разі сценарію ІОМ без явищ тривоги амплітуда МВП підвищується, а силу стимулу можна знизити.

Амплітуди МВП протягом хірургічного втручання значно змінюються. Для прикладу приведено графік динаміки амплітуди МВП у хворого з травматичним ушкодженням хребта (рис. 4). На ньому наведено амплітуди МВП на нижніх кінцівках (*mm. tibialis anterior*) протягом хірургічного втручання. Перші точки — це амплітуди МВП, отримані до початку операцій в 11:00, величини яких прийняті за референтні. Потім фіксували коливання амплітуд, тенденцію зростання, одноразове зниження та подальше збільшення.

Ми реєстрували МВП на *mm. tibialis anterior*, *mm. abductor hallucis longus* в усіх 86 (100 %) пацієнтів, на *mm. abdominis rectus* — у 59 (69 %), *mm. abdominis obliquus* — 64 (55 %), *mm. vastus lateralis* — 59 (69 %). Амплітуди МВП змінюються з технічних, хірургічних та анестезіологічних причин. Перші МВП реєстрували до початку втручання, останні — під час зашивання шкіри та накладання пов'язки. Проаналізовано амплітуди МВП наприкінці операції, коли дію анестезії, зазвичай, зменшено (табл. 2).

Високі амплітуди МВП зафіксовані на передньому великогомілковому м'язі та м'язах живота. МВП на чотириголовому м'язі стегна виявилися низькими, часто менші за 50 мкВ, що зменшує їхню інформативність. Такий факт можна пояснити тим, що *mm. abductor hallucis longus* — дистальний, компактний м'яз, має обширніше представництво в руховій корі порівняно, наприклад, із *mm. vastus lateralis*. На *mm. abdominis rectus* МВП були високими, але на них часто реєстрували перешкоди, обумовлені положенням пацієнта. Найстабільніші МВП спостерігали на *mm. tibialis anterior* і *mm. abductor hallucis longus*, їхні амплітуди мало схильні до механічних перешкод і змін артеріального тиску.

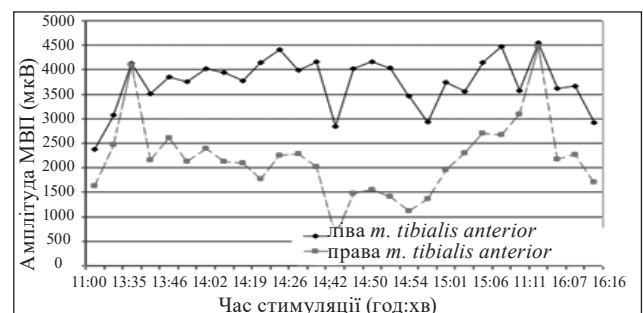


Рис. 4. Динаміка амплітуд МВП під час хірургічного втручання

Таким чином, амплітуди МВП таргетних м'язів відрізняються за інформативністю через індивідуальні морфологічні та моторні характеристики (рис. 5).

Саме тому необхідно використовувати максимально можливу кількість м'язів для моніторингу. Наприклад, у разі інструментації сегмента L<sub>V</sub>–S<sub>I</sub> не слід обмежуватися лише переднім великоомілковим м'язом, а моніторувати також м'язи стопи та стегна. У пацієнтів із грубими деформаціями хребта певною мірою компресований спинний мозок, що в умовах анестезії може порушувати провідність кортикоспінальним трактом.

Загальні фізіологічні зміни, такі як зниження артеріального тиску та температури тіла, відображаються одночасним зниженням МВП на всіх каналах і повертаються до початкових значень після відповідних заходів. Різні фахівці сигналом тривоги вважають зниження амплітуд відносно референтних від 30 до 50–80 % [10, 11].

У нашому дослідженні двостороннє зменшення амплітуд МВП більш, ніж на 80 % спостерігали в 17 (19 %) випадках. Це зниження було оборотним і після підвищення інтенсивності стимулу амплітуди МВП досягали референтних значень. В однієї пацієнтки (2 %) відзначено одностороннє стійке падіння амплітуд МВП на *mm. tibialis anterior* і *mm. abductor hallucis longus*. У післяопераційному періоді в неї розвився нижній монопарез.

Ще в одному випадку однобічного зниження МВП, яке спостерігали через 1,5 год після хірургічної маніпуляції (відкритого вправлення L<sub>V</sub> хребця за умов спондилолітезу IV ступеня) амплітуда впала на *mm. tibialis anterior* у 20 разів, а на *mm. abductor hallucis longus* — знизилась лише на 16 %. У ранньому післяопераційному пе-

ріоді в пацієнтки виявлено монопарез із подальшим відновленням на 10-ту добу. В інших випадках ознак неврологічного дефіциту не визначено.

Також ми провели стимуляцію 435 гвинтів на рівнях Th<sub>IX</sub>–S<sub>I</sub> (табл. 3). Інтраопераційне перепроведення гвинтів виконано в 11 випадках у 9 хворих. Критерієм перепроведення гвинтів був сигнал «тривога» та ознаки некоректного його розташування за результатами рентген-контролю. Ревізійних хірургічних втручань із приводу некоректного встановлення гвинтів у подальшому не проводили.

Істинно негативні результати (відсутність сигналу «тривога» та ознак некоректно розташованого гвинта) отримано в 62 (72 %) пацієнтів, яким встановлено 424 (97,5 %) гвинти. При цьому 284 (86 %) гвинти пройшли тест на силі стимулу більше ніж 20 мА, усі — більш ніж 13 мА. Істинно позитивні результати отримано в 9 (1,05 %) пацієнтів за встановлення 11 (2,5 %) гвинтів. СТГ у всіх був нижче 13 мА, а у 8 (72,7 %) гвинтів нижче 10 мА. Хибно негативний результат спостерігали в однієї хворої, з одним гвинтом (0,2 %).

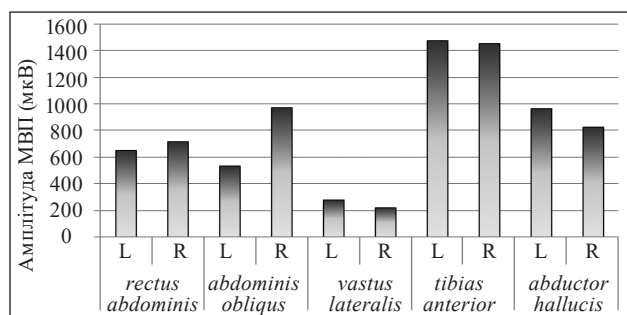


Рис. 5. Гістограма амплітуд МВП. По осі ординат вказано амплітуда МВП (мкВ) і сторону м'язу

Таблиця 2

#### Результати аналізу амплітуд МВП під час хірургічного втручання на хребті

| М'яз                            | Бік   | Середня амплітуда МВП (μВ) | Стандартна похибка | Макс. | Мін. | Інтервал | Кількість |
|---------------------------------|-------|----------------------------|--------------------|-------|------|----------|-----------|
| <i>abdominis rectus</i>         | лів.  | 655,98                     | ±728,23            | 3017  | 18   | 2999     | 41        |
|                                 | прав. | 721,02                     | ±1205,67           | 7127  | 14   | 7127     | 41        |
| <i>abdominis obliquus</i>       | лів.  | 535,73                     | ±86,31             | 1444  | 98   | 1346     | 22        |
|                                 | прав. | 974,05                     | ±237,13            | 3975  | 20   | 3955     | 22        |
| <i>vastus lateralis</i>         | лів.  | 282,73                     | ±68,29             | 1370  | 29   | 1341     | 26        |
|                                 | прав. | 220,92                     | ±63,82             | 1647  | 15   | 1632     | 26        |
| <i>tibialis anterior</i>        | лів.  | 1479,98                    | ±183,65            | 4993  | 106  | 4887     | 49        |
|                                 | прав. | 1454,31                    | ±179,35            | 4590  | 106  | 4484     | 49        |
| <i>abductor hallucis longus</i> | лів.  | 969,10                     | ±127,20            | 3645  | 19   | 3626     | 49        |
|                                 | прав. | 829,51                     | ±138,55            | 3692  | 20   | 3672     | 49        |

Наявність сигналу «тривога» за коректно встановлених гвинтів, спостерігали в 13 (15,1 %) пацієнтів у разі встановлення 151 гвинта на величині тесту до 19 мА, серед них у 7 осіб тест СТГ був нижчим за 10 мА. Хибно позитивний результат отримано відповідно у 34,7 і 15,4 % випадків.

Отже, під час проведення 84 гвинтів за результатом СТГ від 10 до 19 мА істинно позитивний результат отримано лише у 3 гвинтів нижче ніж 13 мА (2 гвинти — 11 мА, 1 — 13 мА). Тест СТГ від 13 до 19 мА показав коректне розташування 81 гвинта. Це свідчить, що висновок про «позитивний» або «негативний» результат тесту СТГ залежить від обраного порога сигналу тривоги. У нашому дослідженні результат СТГ нижчий за 19 мА класифікували як сигнал попередження, невизначеності, а нижчий за 10 мА — визначеної тривоги за рекомендаціями «Medtronic» [8]. Інші автори пропонують поріг тривоги нижче ніж 10–12 мА і навіть нижче за 5 мА оцінювати як незадовільний [12].

За результатами виконаного дослідження пропонуємо вважати поріг тесту СТГ у 13 мА задовільним, а нижче — незадовільним, оскільки

було 3 гвинти некоректно розташованих за СТГ 11–13 мА, а після перепроведення тесту СТГ становив 25–30 мА. Чутливість тесту СТГ за нашими результатами встановила 91,67 %; специфічність за умов порогу 19 мА — 73,74 %, 10 мА — 86,36 %. Отримані показники відповідають результатам досліджень інших вчених. Зокрема, за результатами тесту СТГ для 3 112 гвинтів на рівнях L<sub>I</sub>–S<sub>I</sub> істинно позитивні результати в 7,8 % отримано в діапазоні від 2,6 до 19,8 мА. Чутливість і специфічність оцінено в 93,33 % і 92,88 % [13].

За критерієм тесту СТГ хворих розподілили на 3 групи (рис. 6). У першій групі (21 пацієнт) перевірено 137 гвинтів за сили струму 30 мкВ, тобто оцінювали як відмінний результат. У другій (8 осіб) перевірено 74 гвинти, з яких 26 (35,2 %) оцінено на «відмінно», 24 (32,4 %) — «добре», 24 (32,4 %) — «невизначено». Третю групу склали 15 пацієнтів, у яких за результатами тесту СТГ 117 гвинтів якість їхнього встановлення класифіковано як незадовільну в 72 (61,5 %) випадках, невизначену — 37 (31,6 %), добру — лише у 8 (6,8 %).

Таким чином, виявлено групу пацієнтів, у яких тест СТГ був незадовільний на всіх гвинтах, але вони були встановлені коректно, і неврологічних ускладнень не спостерігали. Переконливих клінічних особливостей пацієнтів 3 групи не виявлено. Це питання потребує окремого дослідження.

Деякі автори пропонують використовувати не лише модальність СТГ, а й модальність стимуляції стінок каналу до проведення гвинта. Зокрема, науковці з Італії показали на 161 коректно встановленому гвинті, що поріг локальної стимуляції стінок штифт-каналу був ( $7,5 \pm 2,46$ ) мА, проти ( $21,8 \pm 6,8$ ) мА за стимуляції гвинтів. У результаті порівняння цих двох порогів на окремих гвинтах визначено, що за СТГ відбувся непередбачуваний витік струму від 10 до 90 % випадків, що призвело до збільшення хибно позитивних результатів. Крім того, у разі локальної стимуляції

Таблиця 3  
Результати тесту стимуляції транспецикулярних гвинтів

| Рівень фіксації   | Бік   | Результат тесту СТГ (мА) |       |       |      | Усього гвинтів |
|-------------------|-------|--------------------------|-------|-------|------|----------------|
|                   |       | 30                       | 20–29 | 19–10 | < 10 |                |
| Th <sub>IX</sub>  | лів.  | —                        | —     | —     | 1    | 1              |
|                   | прав. | —                        | —     | —     | 1    | 1              |
| Th <sub>X</sub>   | лів.  | 2                        | —     | 2     | 2    | 6              |
|                   | прав. | 2                        | —     | 2     | 2    | 6              |
| Th <sub>XI</sub>  | лів.  | 6                        | —     | 2     | 4    | 12             |
|                   | прав. | 6                        | —     | 2     | 5    | 13             |
| Th <sub>XII</sub> | лів.  | 7                        | 1     | 6     | 3    | 17             |
|                   | прав. | 7                        | —     | 6     | 4    | 17             |
| L <sub>I</sub>    | лів.  | 10                       | 5     | 2     | 6    | 23             |
|                   | прав. | 10                       | 5     | 3     | 5    | 23             |
| L <sub>II</sub>   | лів.  | 13                       | 3     | 2     | 3    | 21             |
|                   | прав. | 11                       | 2     | 5     | 2    | 20             |
| L <sub>III</sub>  | лів.  | 18                       | 3     | 6     | 4    | 31             |
|                   | прав. | 18                       | 4     | 4     | 5    | 31             |
| L <sub>IV</sub>   | лів.  | 20                       | 5     | 5     | 3    | 33             |
|                   | прав. | 21                       | 6     | 3     | 4    | 34             |
| L <sub>V</sub>    | лів.  | 23                       | 5     | 5     | 4    | 37             |
|                   | прав. | 22                       | 4     | 7     | 3    | 36             |
| S <sub>I</sub>    | лів.  | 19                       | 2     | 12    | 4    | 37             |
|                   | прав. | 20                       | 4     | 10    | 2    | 36             |
| Усього гвинтів    |       | 235                      | 49    | 84    | 67   | 435            |

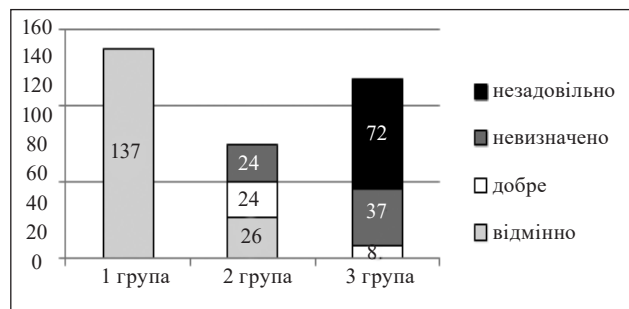


Рис. 6. Розподіл пацієнтів за результатами тесту СТГ

каналу автори не спостерігали випадків хибно негативних результатів на відміну від тесту СТГ. Поріг стимуляції штифт-каналу наближався до порогу прямого збудження корінця (2,6 мА;  $p < 0,05$ ). Отже, автори наголошують, що локальна стимуляція каналу струму перед проведенням гвинта значно безпечніша та попереджає ушкодження стінки дужки хребця травмонебезпечним, об'ємним і різьбленим гвинтом [14].

В іншому дослідженні визначено, що ІОМ може бути корисним інструментом, але слід пам'ятати про можливість отримання як хибно позитивних результатів, які обумовлюють подовження операції та крововтрати, так і хибно негативних, що спричиняють ускладнення [15]. Отже, успіх хірургічного втручання залежить від досвіду й індивідуальних уподобань хірурга. Рациональним є спільне використання як ІОМ, так і візуалізаційної навігації [16].

## Висновки

Модальності ІОМ високочутливі та специфічні до ушкоджень структур спинного мозку та спинномозкових нервів, але залежність від низки зовнішніх чинників знижує їхню інформативність, що призводить до хибно позитивних і хибно негативних результатів.

Динаміка амплітуд МВП м'язів-мішеней відрізняється за інформативністю й ефективністю під час хірургічного втручання через індивідуальні морфологічні та моторні характеристики. Найстабільніші МВП зафіксовано на *mm. tibialis anterior*, *mm. abductor hallucis longus*. Підтверджено, що несприятливим і достовірним чинником ознаки тривоги є однобічне стійке зниження амплітуди МВП більш ніж на 80 %. За результатами СТГ отримано 424 (97,5 %) коректно проведених гвинти, та один хибно негативний випадок (0,2 %) некоректного проведення, який підтверджено післяопераційним рентгеноконтролем. Хибно позитивні результати за тестом СТГ склали від 34,7 до 15,4 % залежно від обраного критичного порогу сили струму, який надходить на транспедикулярний гвинт. За результатами дослідження рекомендуємо поріг нижче ніж 13 мА вважати критичним, що обов'язково потребує перевірки коректності проведення гвинта під контролем рентгенографії.

Водночас виявлено групу пацієнтів, у яких встановлено 72 гвинти (16,6 % від загальної кількості аналізованих), які за результатами тесту СТГ отримали незадовільну оцінку, а рентгено-

логічно не виявлено похибок у їхньому топографічному положенні.

**Конфлікт інтересів.** Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

## Список літератури

1. Does intraoperative CT navigation increase the accuracy of pedicle screw placement in pediatric spinal deformity surgery? A systematic review and meta-analysis / M. D. Kadiyala, W. N. Sankar, T. D. Flynn [et al.] // *Spine Deformity*. — 2021. — DOI: 10.1007/s43390-021-00385-5.
2. Biscevic M. Intraoperative Neuromonitoring in Spine Deformity Surgery: Modalities, Advantages, Limitations, Medico legal Issues — Surgeons' Views / M. Biscevic, A. Sehic, F. Krupic // *Review EFORT Open Review*. — 2020. — Vol. 5 (1). — P. 9–16. — DOI: 10.1302/2058-5241.5.180032.
3. Triggered electromyography is a useful intraoperative adjunct to predict postoperative neurological deficit following lumbar pedicle screw instrumentation / R. Reddy, R. Chang, D. Coutinho [et al.] // *Global Spine Journal*. — 2021. — DOI: 10.1177/21925682211018472.
4. Deletis V. Basic methodological principles of multimodal intraoperative monitoring during spine surgeries / V. Deletis // *European Spine Journal*. — 2007. — Vol. 16 (Suppl 2). — P. S147–S152. — DOI: 10.1007/s00586-007-0429-4.
5. American Society of Neurophysiological Monitoring. Intraoperative motor evoked potential monitoring — a position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring / D. B. Macdonald, S. Skinner, J. Shils [et al.] // *Clinical Neurophysiology*. — 2013. — Vol. 124 (12). — P. 2291–2316. — DOI: 10.1016/j.clinph.2013.07.025.
6. Heuristic map of myotomal innervation in humans using direct intraoperative nerve root stimulation / C. M. Schirmer, J. L. Shils, J. E. Arle [et al.] // *Journal of Neurosurgery. Spine*. — 2011. — Vol. 15 (1). — P. 64–70. — DOI: 10.3171/2011.2.SPINE1068.
7. Intraoperative neuromonitoring practice patterns in spinal deformity surgery: a global survey of the Scoliosis Research Society / P. Y. Dikmen, M. F. Halsey, A. Yucekul [et al.] // *Spine deformity*. — 2021. — Vol. 9 (2). — P. 315–325. — DOI: 10.1007/s43390-020-00246-7.
8. NIM-ECLIPSE SD System User's Manual, Version 3.5.350.
9. Optimal parameters of transcranial electrical stimulation for intraoperative monitoring of motor evoked potentials of the tibialis anterior muscle during pediatric scoliosis surgery / E. Azabon, V. Manel, N. Andre-Obadia [et al.] // *Neurophysiologie Clinique*. — 2013. — Vol. 43 (4). — P. 243–250. — DOI: 10.1016/j.neucli.2013.08.001.
10. Transcranial motor evoked potential monitoring for the detection of nerve root injury during adult spinal deformity surgery / H. Ushirozako, G. Yoshida, S. Kobayashi [et al.] // *Asian Spine Journal*. — 2018. — Vol. 12 (4). — P. 639–647. — DOI: 10.31616/asj.2018.12.4.639.
11. Transcranial electrical motor-evoked potential monitoring during surgery for spinal deformity: a study of 145 patients / D. D. Langeloo, A. Lelivelt, H. Louis Journée [et al.] // *Spine*. — 2003. — Vol. 28 (10). — P. 1043–1050. — DOI: 10.1097/01.BRS.0000061995.75709.78.
12. Mikula A. L. The use of intraoperative triggered electromyography to detect misplaced pedicle screws: a systematic review and meta-analysis / A. L. Mikula, S. K. Williams, P. A. Anderson // *Journal of Neurosurgery. Spine*. — 2016. — Vol. 24 (4). — P. 624–638. — DOI: 10.3171/2015.6.SPINE141323.
13. Intraoperative electromyographic monitoring to optimize safe lumbar pedicle screw placement — a retrospective analysis / A. K. Kaliya-Perumal, J. R. Charng, C. C. Nju [et al.] // *BMC Musculoskeletal Disorders*. — 2017. — Vol. 18 (1). — DOI:

- 10.1186/s12891-017-1594-1.
14. Troni W. Focal hole versus screw stimulation to prevent false negative results in detecting Pedicle breaches during spinal instrumentation / W. Troni, C. A. Benech, R. Perez // *Clinical Neurophysiology*. — 2018. — Vol. 130 (4). — P. 573–581. — DOI: 10.1016/j.clinph.2018.11.029.
  15. Effectiveness of EMG use in pedicle screw placement for thoracic spinal deformities / A. Oner, C. G. Ely, J. T. Hermsmeyer, D. C. Norvell // *Evidence-based spine-care journal*. — 2012. — Vol. 3 (1). — P. 35–43. — DOI: 10.1055/s-0031-1298599.
  16. Combining pedicle screw stimulation with spinal navigation, a protocol to maximize the safety of neural elements and minimize radiation exposure in thoracolumbar spine instrumentation / S. Z. Kassis, L. K. Abukwedat, A. K. Msaddi [et al.] // *European spine journal*. — 2016. — Vol. 25 (6). — P. 1724–1728. — DOI: 10.1007/s00586-015-3973-3.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021

---

## PRACTICAL ASPECTS OF INTRAOPERATIVE NEUROMONITORING IN PATIENTS WITH DIFFERENT SPINAL PATHOLOGIES

O. O. Barkov, D. R. Duplii

Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kharkiv

✉ Oleksandr Barkov, MD, PhD in Traumatology and Orthopaedics: a.barkov.79@gmail.com

✉ Diana Duplii, PhD in Biol. Sci.: duplijd@gmail.com