**УДК 615.8**
**DOI: https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-21**

**Володимир ВАЩИШИН, асп.**
**ORCID ID: 0009-0003-0005-1924**
**e-mail: v.vashchyshyn@oberig.ua**
**Клініка "Оберіг", Київ, Україна**

# ЗАСТОСУВАННЯ SRT НА ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ БЕЗ 6D-СТОЛА

**Вступ.** ***За останні роки спостерігається істотне зростання кількості медичних лінійних прискорювачів в Україні. Проте переважна більшість цього обладнання не має в комплектації 6D-стола, що унеможливлює застосування корекції на поворот пацієнта і залишає можливість лише трансляційних поправок. З іншого боку, з кожним роком у протоколах лікування все більше з'являється показів до використання SRS (stereotactic radiosurgery), SBRT (stereotactic body radiation therapy) та SRT (stereotactic radiation therapy), проведення яких вимагає використання 6D-стола, тобто необхідність трансляційних і ротаційних поправок положення пацієнта.***

**Методи.** ***У процесі дослідження було застосовано методи визначення амплітуди похибок, спричинених поворотами під час укладання пацієнта, та їх корекції, щоб в окремих випадках застосовувати SRT без 6D-стола.***

**Результати.** ***У дослідженні розглянуто лише лікування патологій головного мозку. Для оцінювання ротаційних похибок було проаналізовано дані зміщень 66 пацієнтів, що лікували патології головного мозку. Отже, результати не можуть бути застосовані щодо інших частин тіла.***

**Висновки.** ***Результати дослідження можуть розширити можливості використання наявних в Україні лінійних прискорювачів, покращуючи якість надання медичних послуг онкологічним пацієнтам (також є можливість лікувати деякі неонкологічні патології, наприклад, аденоми гіпофіза).***

**Ключові слова:** ***SRT (stereotactic radiation therapy), DVH (dose volume histogram), ротаційні похибки, PTV (planning target volume).***

## Вступ

SRT є невід'ємною частиною сучасної променевої терапії головного мозку. Такий метод використовує високі разові дози за невелику кількість фракцій (1–5 фракцій), що дає кращі клінічні результати та приводить до суттєвого скорочення тривалості лікування. Порівняно з конвенційною терапією SRT потребує значно більшої точності підведення дози (Klein et al., 2005, p. 13–14). Це можна забезпечити більш точними алгоритмами обчислення дози, використанням додаткових систем іммобілізації пацієнта та контролем положення пацієнта за допомогою CBCT (cone beam computed tomography).

Для реалізації контролю положення пацієнта потрібні спеціальні інструменти для корекції (Lips et al., 2009, p. 6–7). Корекції положення пацієнта поділяють на трансляційні та ротаційні. Трансляційні поправки реалізуються на всіх лікувальних столах лінійних прискорювачів, а ротаційні поправки можливі лише на столах з такою функцією.

**© Ващишин Володимир, 2024**

В Україні переважна більшість прискорювачів не мають 6D-стола, тобто не можуть застосовувати поправки на ротаційні зміщення пацієнта. Таким чином, для більшості лікувальних центрів питання щодо можливості використання SRT головного мозку без наявності 6D-стола наразі дуже актуальне, оскільки 6D-стіл сприяв би збільшенню спектра інструментів у лікуванні пацієнтів.

**Методи**

Для дослідження можливості проведення SRT на прискорювачах без 6D-стола потрібно знати амплітуди похибок укладання пацієнта. Похибки поділяють на трансляційні та ротаційні. Трансляційні похибки – це лінійні переміщення вздовж осей *x* (ліво-право, ML), *y* (вверх-вниз, AP), *z* (вперед-назад, CC). Ротаційні похибки – це повороти навколо ізоцентра pitch(φ), roll(ψ), rotation (θ) (зазвичай називають yaw, rtn, або CW/CCW).

Трансляційні похибки завжди можна скорегувати з використанням MV-MV, kV-kV або CBCT на звичайному столі. Існують кілька варіантів вирішення проблеми ротаційної похибки: використання додаткових систем іммобілізації пацієнта, переукладення пацієнта або використання 6D-стола для автоматичної корекції повороту. Але неможливо зробити поправку на ротаційні похибки без переукладення пацієнта або наявності 6D-стола. Тому потрібно кількісно оцінити амплітуди ротаційних похибок для їх корекції.

Для оцінювання ротаційних похибок було проаналізовано дані зміщень 66 пацієнтів, що лікували патології головного мозку (усі пацієнти використовували термопластичні маски і стандартні підголовники). Загальна кількість проаналізованих фракцій становила 1386. Для аналізу були долучені результати kV-kV та CBCT знімків. Середні амплітуди поворотів для кожного кута визначали як

$$\overline{\varphi_k} = \frac{1}{n_k}\sum_{i}^{n_k} |\Delta\varphi_i|\,; \quad \overline{\psi_k} = \frac{1}{n_k}\sum_{i}^{n_k} |\Delta\psi_i|\,; \quad \overline{\theta_k} = \frac{1}{n_k}\sum_{i}^{n_k} |\Delta\theta_i|\,,$$

де $n_k$ – кількість фракцій *k*-го пацієнта. Розподіл середніх амплітуд ротаційних зміщень представлено на рис. 1. Усі повороти мають приблизно однакові середні похибки та їхні розподіли серед пацієнтів. Середні та медіанні значення приблизно дорівнюють одне одному для всіх осей обертання і становлять 0,7–0,8°; 95 % пацієнтів мають абсолютні середні значення відхилень менше 1,8–2,0° (рис. 1). Окремо слід зазначити, що ці значення можуть дещо відрізнятися залежно від набору іммобілізуючих пристроїв та досвіду персоналу, який проводить укладання. Але за рахунок того, що більшість іммобілізуючих пристроїв різних виробників не мають суттєвих відмінностей, то ці результати можна застосовувати й на інші набори укладання з термопластичними масками (Fu et al., 2007, p. 1).

Для практичного застосування потрібно зробити 2 наближення:

1) можемо вважати, що поворот навколо однієї осі приводить до зміщення лише в одній площині;

2) максимальні зміщення для 95 % пацієнтів менші або дорівнюють 2°, тому для корекції за відсутності 6D-стола можна використовувати поправку на 2°.

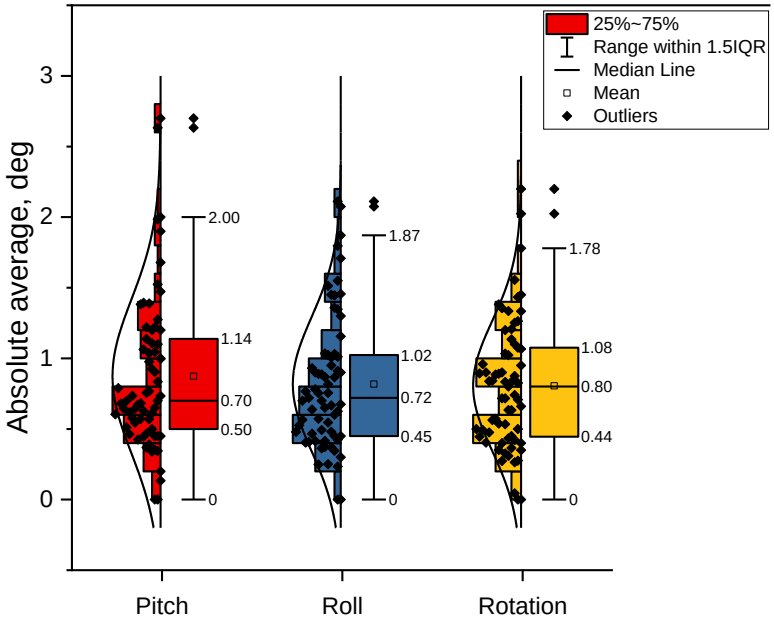



**Рис. 1. Графік "whisker and box" розподілу ротаційних похибок**

Зміщення точки під час повороту на 2° буде залежати лише від відстані до точки обертання, у нашому випадку до ізоцентра пучків:

$$x \approx r * \sin\alpha = r * \sin 2^\circ \approx 0{,}035 * r,$$

де $x$ – додаткове розширення PTV, $r$ – відстань від ізоцентра до найвіддаленішої точки PTV.

Таким чином, ізотропним розширенням PTV на значення $x$ можна компенсувати максимальні зміщення через ротаційну похибку.

**Результати**

Для практичної реалізації описаного вище підходу ще необхідно врахувати ряд факторів, які можуть вплинути на результуючий дозовий розподіл. Вплив цих факторів можна оцінити при використанні повороту на реальних лікувальних планах з різними геометріями. Розглянемо кілька показових використань такого емпіричного підходу на прикладі пацієнтів з різною геометрією таргетів.

**Випадок 1:** аденома гіпофіза, 2,6/4,8 сс об'єм CTV (clinical tumor volume) / PTV, регулярна несферична геометрія, 4 некомпланарні арки. Під час повороту на 2° не змінюється покриття PTV та CTV, тому такий план можна лікувати без використання 6D-стола (рис. 2).

**Випадок 2:** метастаз головного мозку, 0,7/1,9 сс об'єм CTV/PTV, сферична геометрія, 4 некомпланарні арки. Під час повороту на 2° не змінюється покриття PTV та CTV, тому такий план можна лікувати без використання 6D-стола (рис. 3).

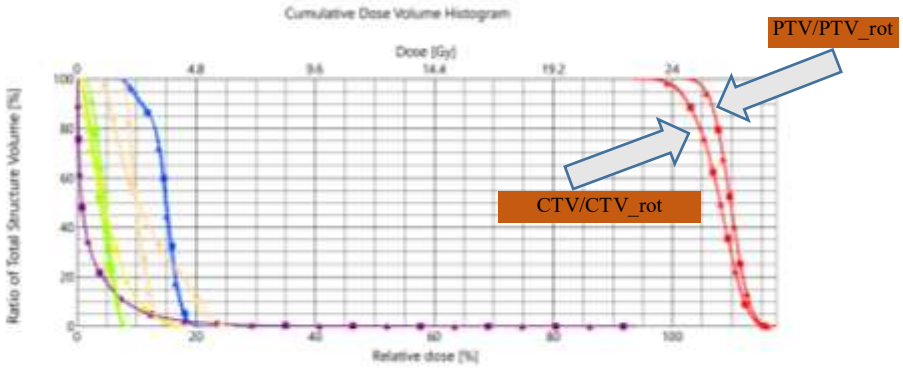



**Рис. 2. DVH оригінального плану і зміщеного на 2°.**
**Спостерігається відсутність зміни покриття PTV та CTV під час повороту на 2°**

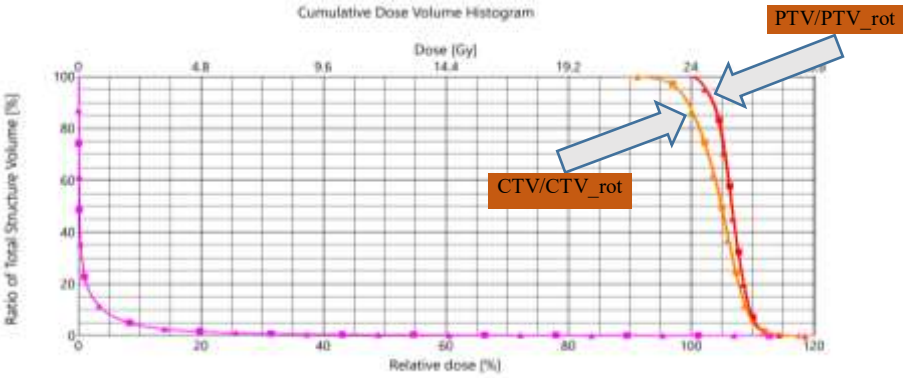



**Рис. 3. DVH оригінального плану і зміщеного на 2°.**
**Спостерігається відсутність зміни покриття PTV та CTV під час повороту на 2°**

**Випадок 3:** менінгіоматоз, 9,8/19,3 сс об'єм CTV/PTV (загальна кількість GTV – 12), неправильна форма, велика кількість окремих таргетів, 5 компланарних арок.

Розглянемо PTV1, яке є найвіддаленіше від ізоцентра. Якщо врахувати поправку на поворот 2°, то розширення PTV1 буде $\Delta x \approx 0{,}035 * r$ = 0,32 см. Це суттєво змінить об'єм опромінення з 1,7 сс об'єму PTV1 до 5,8 сс, що становить приріст у 241 %. Але, на відміну від попередніх випадків, лікувати такий план за відсутності 6D-стола без корекції на ротацію вже не можна, оскільки під час повороту на 2° значно погіршується покриття PTV (рис. 4), що робить такий план клінічно невиправданим. Тому потрібно розширити PTV на 0,32 см та переоптимізувати пучки опромінення.

Емпірична компенсація повороту через розширення PTV1 забезпечила достатній рівень покриття дозою (рис. 5), але ціною значного підвищення навантаження на головний мозок: 20 Gy отримувало 12,2 сс, а з розширенням – 20 Gy вже отримувало б 18,4 сс головного мозку (структура brain-GTV).

Далі розглянемо, як вплине ротація на PTV2, що розташована на відстані 3,8 см від ізоцентра.

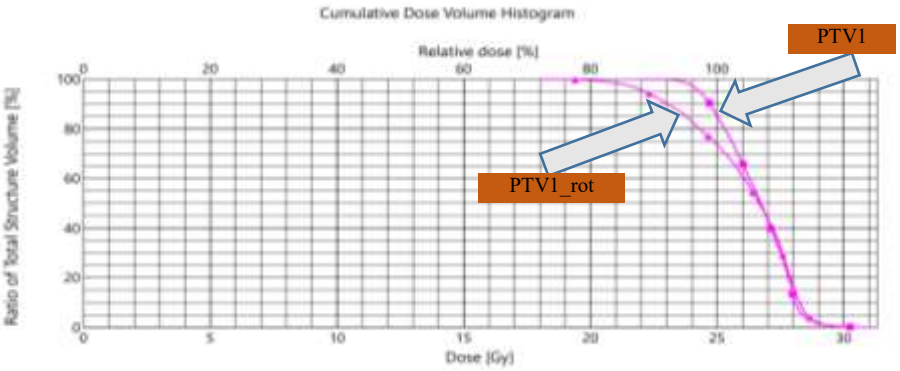



**Рис. 4. DVH оригінального плану PTV1 і зміщеного на 2°.**
**Спостерігається значна зміна покриття PTV1 під час повороту на 2°**

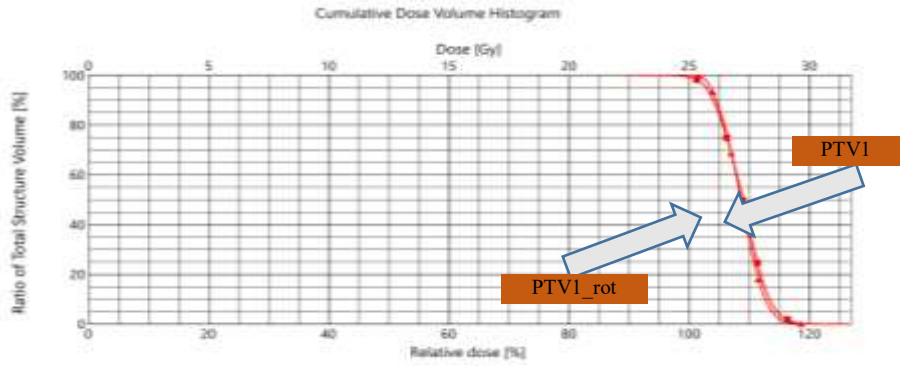



**Рис. 5. DVH PTV1 оригінального і зміщеного на 2° планів**
**з урахуванням додаткового розширення PTV1**

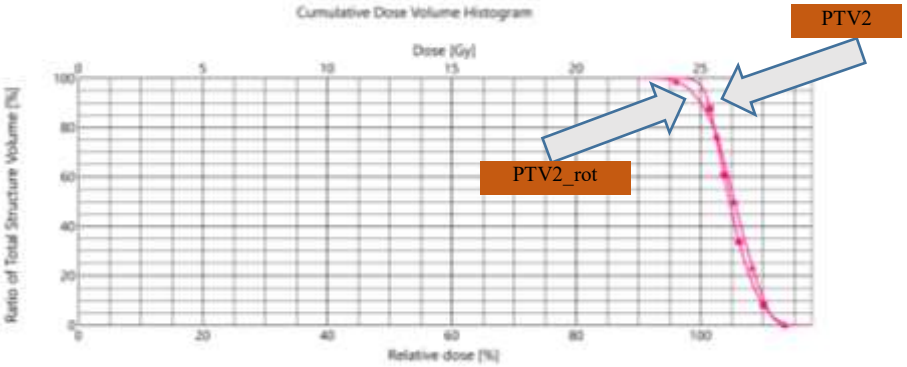



**Рис. 6. DVH оригінального плану на PTV2 і зміщеного на 2°.**
**Спостерігається значна зміна покриття PTV2 під час повороту на 2°**

Помітна значна зміна в покритті PTV2 під час повороту на 2° (рис. 6), тому необхідно зробити поправку на ротацію. З урахуванням повороту на 2°, розширення PTV2 буде $\Delta x \approx 0{,}035 * r$ = 0,13 см, що змінить об'єм PTV2 із 5,1 сс об'єму до 8,1 сс, тобто відсотковий приріст становитиме 53 %. Додаткове розширення PTV2 дало змогу ефективно відновити покриття (рис. 7) за відсутності 6D-стола за рахунок збільшення об'єму опромінення та збільшенням навантаження на головний мозок з 12,2 сс отримувало 20 Gy до 13,8 сс – 20 Gy.

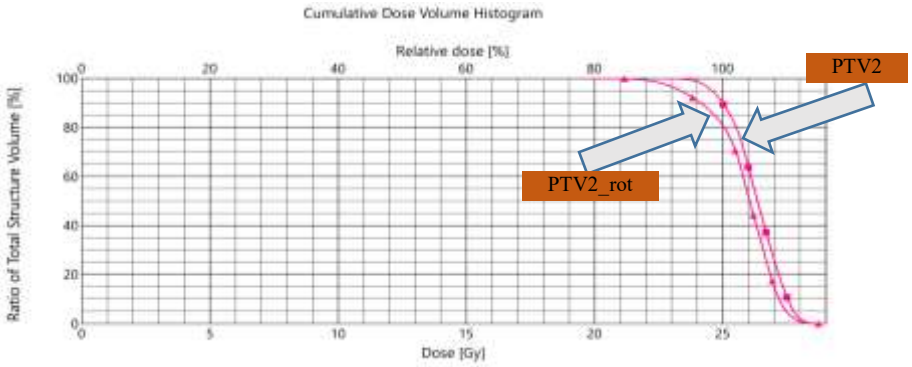



**Рис. 7. DVH PTV2 оригінального і зміщеного на 2°**
**планів з урахуванням додаткового розширення PTV2**

Отже, початкові припущення щодо компенсації ротаційної похибки на практиці виявилися ефективини для відновлення дозового покриття таргетів, але при цьому збільшуючи навантаження на здорові тканини. Такий метод можна застосовувати, якщо є значний дозовий запас у дозовій толерантності критичних органів. В окремих випадках геометрії таргетів повороти на 2° взагалі не впливали на клінічну значимість лікувального плану, що дозволило б проводити SRT без додаткової корекції за відсутності 6D-стола.

**Дискусія і висновки**

У результаті статистичної обробки результатів укладення пацієнтів з патологіями головного мозку було визначено, що pitch, roll та rotation мають дуже схожі максимальні середні амплітуди ротаційних зміщень – 1,8–2°. Медіани ротаційних зміщень становлять 0,7–0,8°. Тобто, якщо вважати, що відсутність 6D-стола спряжена з максимальною ротаційною похибкою в 2° кожної осі обертання, то звичайне розширення PTV дозволить скомпенсувати її, що було продемонстровано в розгляді практичних випадків.

Підсумовуючи, можемо виділити ряд індикаторів, які дозволили б проводити SRT патологій головного мозку без 6D-стола:

- великі та середні за розміром таргети;
- сферична симетрія таргета;
- розміщення ізоцентра в геометричному центрі таргета;

- наявність лише одного таргета;
- відстань від поверхні більше 1 см;
- використання VMAT.

А рядом ознак, які перешкоджають проведенню SRT без ротаційної корекції можна вважати:

- дуже маленькі за розміром таргети (<1 сс).
- нерегулярна геометрія;
- розміщення ізоцентра поза межами PTV;
- велика кількість таргетів;
- близькість або прилягання до поверхні;
- використання IMRT.

Важливо зазначити, що сферично-симетричні таргети розміром більше 1 сс, геометричний центр яких збігається з ізоцентром, взагалі можуть не потребувати додаткової корекції, а тому відсутність 6D-стола ніяк не вплине на клінічну ефективність.

**Подяки, джерела фінансування.** Висловлюємо подяку генеральному директору Клініки "Оберіг" Рибчуку Віктору Олександровичу за надану можливість використовувати обладнання для розрахунків лікувальних планів. Висловлюємо подяку завідуючій відділенням променевої терапії Сілаєвій Ользі Святославівні за допомогу в організації проведення дослідження.

**Список використаних джерел**

Fu, W., Yang, Y., Yue, N.J., Heron, D.E., & Huq, S.M. (2007). Study of rotational setup errors and their dosimetric impacts on head and neck IMRT treatments using kilovoltage cone-beam computed tomography (kV CBCT). *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 69, S188.

Klein, E.E., Drzymala, R.E., Purdy, J.A., & Michalski, J. (2005). Errors in radiation oncology: a study in pathways and dosimetric impact. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 6, 81–94.

Lips, I.M., van der Heide, U.A., Kotte, A.N.T.J., van Vulpen, M., & Bel, A. (2009). Effect of translational and rotational errors on complex dose distributions with off-line and on-line position verification. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 74, 1600–1608.

**References**

Fu, W., Yang, Y., Yue, N.J., Heron, D.E., & Huq, S.M. (2007). Study of rotational setup errors and their dosimetric impacts on head and neck IMRT treatments using kilovoltage cone-beam computed tomography (kV CBCT). *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 69, S188.

Klein, E.E., Drzymala, R.E., Purdy, J.A., & Michalski, J. (2005). Errors in radiation oncology: a study in pathways and dosimetric impact. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 6, 81–94.

Lips, I.M., van der Heide, U.A., Kotte, A.N.T.J., van Vulpen, M., & Bel, A. (2009). Effect of translational and rotational errors on complex dose distributions with off-line and on-line position verification. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 74, 1600–1608.

**Отримано редакцією збірника / Received: 04.08.24**
**Прорецензовано / Revised: 18.08.24**
**Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24**

**Volodymyr VASHCHYSHYN, PhD Student**
**ORCID ID: 0009-0003-0005-1924**
**e-mail: v.vashchyshyn@oberig.ua**
**Oberig Clinic, president of UAMP, Kyiv, Ukraine**

# APPLICATION OF SRT ON LINEAR ACCELERATORS WITHOUT A 6D TABLE

**Introduction.** ***Over the past few years, the number of linear accelerators in Ukraine has grown significantly, but not a single one has appeared that has a 6D couch for correcting rotational misalignment. Because of this, many doctors are hesitant to perform high-dose SRT treatment regimens. On the other hand, the number of indications for SRT in international protocols is growing every year. Thus, modern aggressive treatment methods are difficult to apply in our realities, since there is little data on the total error caused by rotational error.***

**Methods.** ***The methods of this study are the determination and evaluation of amplitudes of head rotational errors and their compensation mechanisms for the possibility of SRT on linear accelerators without a 6D couch. This will increase the frequency of SRT use for brain pathologies and improve the effectiveness of radiation therapy for this segment of cancer patients.***

**Results.** ***The study only considered treatment of brain pathologies. To assess rotational errors, displacement data from 66 patients treated for brain pathologies were analyzed. Therefore, the results cannot be applied to other parts of the body.***

**Conclusions.** ***The results of the study will allow us to increase the frequency of use of NRT for brain pathologies and improve the effectiveness of radiation therapy for this segment of cancer patients.***

**Keywords:** ***SRT (stereotactic radiation therapy), 6D couch, linear accelerator, rotational error.***

Автор В. Ващишин заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author V. Vashchyshyn declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.