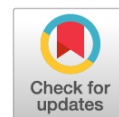


УДК 617.586-007.58+616.748.54-018.38]-053.2-08-039.73

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

Оригинальное исследование



Влияние программы длительного стретчинга трехглавой мышцы голени на угол пеннации ее головок у детей с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия

Л.В. Горобец^{1, 2}, В.М. Кенис^{1, 3}¹ Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия;² Медикал Хоум, Ростов-на-Дону, Россия;³ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Ретракция трехглавой мышцы голени имеет большое значение в патогенезе плоскостопия у детей. Она относится к перистым мышцам, и наклон ее мышечных волокон по отношению к апоневрозу может быть измерен, а полученный угол обозначают как угол перистости или угол пеннации.

Цель — оценка влияния программы длительного стретчинга трехглавой мышцы голени на угол пеннации ее головок у детей с плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия.

Материалы и методы. Обследовано 82 ребенка с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия. Угол пеннации измеряли при помощи ультразвуковой диагностики. В качестве основного упражнения рекомендовали стретчинг трехглавой мышцы голени длительностью 6 мес. Статистический анализ данных выполняли в программе SPSS v. 26.0.

Результаты. В основную группу вошли 63 ребенка, проводившие стретчинг, в контрольную — 19 детей, не использовавшие стретчинга с необходимой интенсивностью. В основной группе отмечено достоверное улучшение показателя шкалы оценки формы и положения стоп (FPI-6), тогда как в контрольной он не изменился. Исходный угол тыльной флексии стопы у детей основной группы составил $4,84 \pm 0,10^\circ$, в контрольной — $4,81 \pm 0,17^\circ$. Через 6 мес. стретчинга тыльная флексия в основной группе составила $11,34 \pm 0,24^\circ$, в контрольной — $4,85 \pm 0,19^\circ$ ($p < 0,01$). Угол пеннации головок трехглавой мышцы голени достоверно увеличился в медиальной головке икроножной и камбаловидной мышц.

Заключение. Применение длительной программы стретчинга у детей с плоскостопием привело к достоверному увеличению угла тыльной флексии стопы. Эти изменения сопровождались морфологической и функциональной перестройкой мышцы, проявляющейся достоверным увеличением угла пеннации медиальной головки икроножной и камбаловидной мышц. Дальнейшие исследования будут способствовать выявлению механизмов, лежащих в основе анатомической и функциональной перестройки мышцы, а также их влиянию на анатомические параметры стопы при плоскостопии.

Ключевые слова: плоскостопие; трехглавая мышца голени; стретчинг; угол пеннации.

Как цитировать

Горобец Л.В., Кенис В.М. Влияние программы длительного стретчинга трехглавой мышцы голени на угол пеннации ее головок у детей с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2024. Т. 12. № 4. С. 453–462. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

Original Study Article

Effects of a long-term triceps surae stretching program on the pennation angle of triceps surae heads in children with hypermobile flat foot and Achilles tendon shortening

Leonid V. Gorobets^{1, 2}, Vladimir M. Kenis^{1, 3}¹ H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia;² Medical Home, Rostov-on-Don, Russia;³ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Triceps surae retraction plays a key role in the pathogenesis of flat feet in children. This is a pennate muscle. The pennation angle is defined as the angle between triceps surae fascicles and aponeurosis.

AIM: The aim of the study was to evaluate the effect of a long-term triceps surae stretching program on the pennation angle of the triceps surae head in children with flat feet and Achilles tendon shortening.

MATERIALS AND METHODS: The study included a total of 82 children with hypermobile flat feet and Achilles tendon shortening. The pennation angle was measured by ultrasound. Triceps surae stretching was recommended for 6 months as a basic exercise. SPSS v.26.0 was used for statistical analysis of data.

RESULTS: The study group included 63 children who performed stretching exercises and the control group included 19 children who did not perform stretching exercises at the required intensity. The study group showed a significant improvement in the Foot Posture Index (FPI)-6, while the control group showed no change. The baseline foot dorsiflexion was $4.84^\circ \pm 0.10^\circ$ in the study group and $4.81^\circ \pm 0.17^\circ$ in the control group. After 6 months of stretching, dorsiflexion was $11.34^\circ \pm 0.24^\circ$ in the study group and $4.85^\circ \pm 0.19^\circ$ in the control group ($p < 0.01$). The pennation angle of the triceps surae heads showed a significant increase in the medial head of the gastrocnemius and soleus muscles.

CONCLUSIONS: A long-term stretching program in children with flat feet resulted in a significant increase in foot dorsiflexion. These changes were associated with morphological and functional muscle restructuring, manifested by a significant increase in the pennation angle of the medial head of the gastrocnemius and soleus muscles. Further research will identify the mechanisms underlying anatomical and functional muscle restructuring and their effects on anatomical foot parameters in flat feet.

Keywords: flat feet; triceps surae; stretching; pennation angle.

To cite this article

Gorobets LV, Kenis VM. Effects of a long-term triceps surae stretching program on the pennation angle of triceps surae heads in children with hypermobile flat foot and Achilles tendon shortening. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2024;12(4):453–462. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS642366>

Received: 29.11.2024

Accepted: 12.12.2024

Published online: 16.12.2024

ОБОСНОВАНИЕ

Гипермобильное плоскостопие с укорочением ахиллова сухожилия (ГПУАС) — одна из актуальных и недостаточно изученных проблем детской ортопедии. Эта патология характеризуется сочетанием снижения высоты продольного свода стопы и ограничением ее тыльной флексии, определяемым при проведении клинических тестов. В качестве особой формы плоскостопия оно было выделено Харрисом и Битом в 40-е годы XX в. [1], и с тех пор интерес к его патогенезу, диагностике и лечению не ослабевает, поскольку такие изменения, существующие длительное время, могут усиливать болевой синдром и вызывать вторичные изменения в суставах стопы в виде прогрессирующего остеоартрита.

Ретракции трехглавой мышцы голени и/или ахиллова сухожилия придают большое значение в патогенезе плоскостопия как у детей, так и у взрослых. Причины и хронология этого явления до сегодняшнего дня недостаточно очевидны. Тем не менее укорочение ахиллова сухожилия следует относить к факторам риска прогрессирования патологических изменений при плоскостопии, а оценка этого укорочения служит важным диагностическим критерием при данном состоянии. Многие авторы считают вмешательства на трехглавой мышце голени и/или ахилловом сухожилии неотъемлемой частью оперативного вмешательства при хирургическом лечении плоскостопия. При этом рассматривают как вмешательства на сухожильной части (удлинение ахиллова сухожилия разными методами), так и различного рода операции на икроножной мышце (рецепсии, апоневротомии). Хирургическое лечение плоскостопия в детском возрасте не относится к первой линии выбора, поскольку его клинические проявления у детей незначительны (по сравнению с собственно величиной деформации). В большинстве практических руководств, посвященных консервативному лечению плоскостопия, упомянуты упражнения для растяжения трехглавой мышцы голени и ахиллова сухожилия (стретчинг) в качестве базовой процедуры при данном состоянии, но систематические исследования, особенно с анализом эффективности длительной программы стретчинга, в литературе отсутствуют.

Помимо непосредственного влияния на форму стопы и высоту продольного свода, предполагают влияние стретчинга на морфологические параметры мышцы, подвергающейся растяжению. Определение этих параметров может способствовать выявлению механизмов, лежащих в основе функциональной и анатомической перестройки сухожильно-мышечного комплекса при стретчинге.

Трехглавая мышца голени относится к перистым мышцам, то есть ее мышечные волокна располагаются не вдоль оси сокращения, а прикрепляются под определенным углом к апоневротической части. Такой принцип анатомической организации мышц, согласно представлениям о физиологии мышечного сокращения, позволяет более эффективно использовать его силу [2]. Наклон

мышечных волокон по отношению к апоневрозу может быть измерен, а полученный угол обозначают как угол перистости или угол пеннации (УП) [3]. УП может быть определен при анатомическом исследовании препаратов мышц [4], при магнитно-резонансной томографии мышц [5], но наиболее часто для этой цели используют ультразвуковое исследование [6]. В последние годы опубликовано большое количество работ, посвященных оценке УП трехглавой мышцы голени и отдельных ее головок при различных физиологических и патологических состояниях [7, 8]. Большое количество исследований проведено в различных областях спортивной медицины и физиологии [9, 10], при этом описаны изменения УП в ответ на различные варианты физических тренировок (силовые упражнения, растяжки, различные режимы нагрузок и т. д.). Однако разные исследователи отмечали разнонаправленную динамику изменений УП в ответ на различные режимы воздействий. Вероятно, это связано с тем, что в соответствующих исследованиях данный показатель изучали у лиц разного возраста, с различным исходным функциональным состоянием (спортсмены, волонтеры). Применяли также различные протоколы физического воздействия на трехглавую мышцу голени.

Из нехирургических методов лечения плоскостопия у детей в целом отдают предпочтение физическим упражнениям. Среди таковых показано положительное влияние упражнений, направленных на улучшение баланса [11]. Растяжка (стретчинг) относится к процедурам с предполагаемым положительным эффектом при плоскостопии, однако ее эффективность, как ни удивительно, не была продемонстрирована в систематически организованных исследованиях. Винсент Моска в своей фундаментальной монографии [12] уделяет внимание стретчингу в качестве основной меры консервативного лечения, предлагая для этого несложное приспособление, но он также не приводит систематизированных данных относительно эффективности этой процедуры.

Нами была сформулирована гипотеза, согласно которой длительная программа стретчинга у детей с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия способствует адаптации мышцы к новым условиям функционирования, проявляющейся изменением УП головок трехглавой мышцы голени.

Данное исследование является частью более обширной работы, посвященной оценке эффективности стретчинга у детей с ГПУАС. Выявление маркеров морфологической и функциональной перестройки мышечной ткани у детей с данным состоянием позволит разработать дополнительные критерии эффективности и сформулировать предположение об адаптивных процессах при данном виде воздействия у детей с плоскостопием.

Цель — оценка влияния программы длительного стретчинга трехглавой мышцы голени на угол пеннации ее головок у детей с плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование включены 82 ребенка с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия. Диагноз устанавливали на основании клинического обследования с расчетом индекса оценки формы и положения стоп (Foot Posture Index, FPI-6), который был рекомендован Российским консенсусом по диагностике и лечению плоскостопия у детей [13]. Критериями диагноза были сочетание плоскостопия (оценка по FPI-6 8 баллов и более) и ограничение тыльной флексии стопы (менее 10°), определяемое при выполнении теста Сильвершельда при среднем положении заднего отдела стопы и выравнивании положения линии головок плюсневых костей перпендикулярно оси конечности. В группе 57 % составили девочки, 43 % — мальчики. Возраст пациентов варьировал от 7 до 17 лет, средний возраст — $11,4 \pm 2,6$ года. Пациентов с неврологической или ортопедической патологией другой природы не включали в исследование.

Для измерения УП проводили ультразвуковую диагностику с применением линейного датчика (L14-3Ws) на аппарате экспертного класса Mindray Resona I9 (Mindray Bio-Medical Electronics, Китай). Исследование выполняли в положении лежа на животе, что обеспечивало расслабление икроножной и камбаловидной мышц, стопа свисала с кушетки. УП измеряли отдельно для медиальной и латеральной головок икроножной мышцы, а также для камбаловидной мышцы. Датчик ультразвукового аппарата устанавливали параллельно оси голени. Для каждой из головок трехглавой мышцы вначале проводили ее продольное сканирование, после чего датчик располагали в ее средней части. УП определяли на одном срезе, при этом измеряли углы для трех несмежных волокон, после чего рассчитывали среднее значение между тремя измерениями.

В качестве основного упражнения рекомендовали стретчинг трехглавой мышцы голени. Протокол стретчинга заключался в том, что родителей и ребенка подробно инструктировали, предлагая следующую процедуру: исходное положение — пациент стоит обеими стопами на прямоугольном деревянном блоке (размеры — 30–40 см в длину, 20–30 см в ширину, 15–30 мм в высоту), передний и средний отделы стопы находятся на блоке, пятки свободно свисают вниз. Спина ровная, руки на опоре. Для большей устойчивости пациентам рекомендовали выполнять упражнения, стоя напротив стены или стола, на которые можно опереться при потере равновесия. Ребенку предлагали медленно опускать пятки до касания ими опорной поверхности для растяжения трехглавой мышцы голени до появления неприятных или болевых ощущений. Это положение следовало удерживать в течение 10–15 с, затем можно было медленно возвращаться в исходное положение. Упражнения повторяли 15–20 раз в течение 15 мин. Родителям и детям настоятельно советовали придерживаться данной методики, особое внимание уделяя регулярности и длительности упражнений.

Всем пациентам, которым на первичном приеме диагностировано ГПУАС, была рекомендована программа длительного стретчинга. Через 6 мес. они были приглашены на повторный осмотр. В исследование вошли дети, которые обратились на повторный прием не ранее чем через 6 мес. и не позднее чем через 9 мес. после первичного посещения. При повторном осмотре всем пациентам были заданы вопросы о регулярности и длительности применения процедур стретчинга.

Критериями включения в основную группу были следующие показатели комплаентности: среднее количество дней стретчинга в неделю — не менее 4, количество пропусков по разным причинам (каникулы, экзамены и т. д.) — не более одной недели в месяц, длительность процедуры — не менее 10 мин. Критериями включения в контрольную группу были неисполнение рекомендаций стретчинга, либо (хотя бы один критерий) длительность стретчинга не более 1–2 мес. за прошедшее время, либо длительность однократной процедуры менее 5 мин, либо стретчинг менее трех дней в неделю. Фактически большинство детей, вошедших в контрольную группу, не воспользовались рекомендациями в отношении стретчинга; у детей, проводивших растяжки, отмечена высокая приверженность терапии, тогда как несоблюдение рекомендаций характеризовалось противоположной тенденцией — большинство детей вообще не выполняли растяжки, различные варианты неполного выполнения встречались редко. Результаты опроса родителей сопоставляли с информацией, полученной непосредственно от ребенка. Для определения включения в одну из групп в тех случаях, когда эта информация не совпадала, у детей 7–11 лет предпочтение отдавали сведениям, полученным от родителей, а у детей 12–17 лет — от ребенка.

Сбор данных и формирование базы данных проводили при помощи программы MS Excel 2019. Статистический анализ данных выполняли в программе SPSS v. 26.0 (IBM, США).

Количественные данные на первом этапе проверяли на подчинение нормальному закону распределения. Для выборок объемом менее 50 значений применяли критерий Шапиро – Уилка, для выборок объемом более 50 значений — критерий Колмогорова – Смирнова.

Для описательной статистики использовали средние значения и стандартные отклонения $M \pm SD$, медианы и квартили 25 и 75 % $Me [Q_1; Q_3]$, минимальные и максимальные значения. Для попарного сравнительного анализа независимых выборок применяли параметрический критерий t -Стьюдента – Уэлча (в случае если выборка подчинялась нормальному закону распределения) и непараметрический критерий U -Манна – Уитни (если одна из выборок или обе не подчинялись нормальному закону распределения). Для попарного сравнительного анализа зависимых выборок (до/после) использовали параметрический критерий t -Стьюдента для зависимых выборок (если выборка подчинялась нормальному закону

распределения) и непараметрический критерий Вилкоксона (если одна из выборок или обе не подчинялись нормальному закону распределения).

Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. При $p > 0,05$ статистически значимых различий не установлено.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По показателям оценки комплаентности, согласно приведенным выше критериям включения, в основную группу вошли 63 ребенка (средний возраст — 11,7 года), в контрольную — 19 детей (средний возраст — 11,6 года).

Мальчиков в основной группе было 54 %, девочек — 46,0 %, в контрольной — 64,7 % мальчиков и 35,3 % девочек. Из этих показателей можно сделать косвенный вывод, что возраст и пол ребенка не оказывают существенного влияния на комплаентность при выполнении стретчинга. Исходная оценка по шкале FPI-6 в обеих группах достоверно не различалась, что позволило проводить дальнейшие сравнения между группами. При анализе результатов программы стретчинга в основной группе отмечено достоверное улучшение показателя FPI-6 в основной группе, тогда как в контрольной он не изменился.

Результаты оценки тыльной флексии стопы и FPI-6 представлены в табл. 1.

Таблица 1. Изменение индекса оценки формы и положения стоп (FPI-6) и угла тыльной флексии через 6 мес. в основной и контрольной группах

Показатели		Основная группа		Контрольная группа		p
		до	после	до	после	
FPI-6	M ± SD	9,2 ± 0,8	7,8 ± 0,6	8,8 ± 0,6	8,8 ± 0,5	$p_1 = 0,104$ $p_2 < 0,001^{##}$
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	9 [9; 10]	8 [8; 8]	9 [8,5; 9]	9 [9; 9]	
	Min–Max	8–11	6–9	8–10	8–10	
p — различия в основной и контрольной группах до и после тренировки		<0,001**		0,954		
Угол тыльной флексии	M ± SD	4,8 ± 0,8	11,3 ± 1,9	4,8 ± 0,7	4,8 ± 0,7	$p_1 = 0,773$ $p_2 < 0,001^{##}$
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	4,9 [3,9; 5,4]	11,6 [9,2; 12,6]	4,9 [4; 5,4]	5 [4; 5,3]	
	Min–Max	3,7–6,2	8,6–14,4	3,7–6,1	3,8–6,2	
p — различия в основной и контрольной группах до и после тренировки		<0,001**		0,850		

Примечание: ** различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно непараметрическому критерию Вилкоксона для зависимых выборок; ## различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно непараметрическому критерию U-Манна – Уитни; p_1 — различия между основной и контрольной группами до тренировки; p_2 — различия между основной и контрольной группами после тренировки.

Таблица 2. Изменение угла пениции для правой нижней конечности через 6 мес. в основной и контрольной группах

Мышцы	Показатель	Угол пениции				p
		основная группа		контрольная группа		
		до	после	до	после	
Камбаловидная мышца	M ± SD	15,9 ± 4,2	18,6 ± 4,9	15,3 ± 3,4	14,3 ± 3,2	p ₁ = 0,543 p ₂ < 0,001 [#]
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	15,3 [12,2; 18,4]	17,9 [14,3; 31,5]	15 [13; 17]	15 [12; 16]	
	Min–Max	8–25,5	9,4–29,8	8–22	8–21	
p — различия в основной и контрольной группах до и после тренировки		0,002*		0,385		
Латеральная головка икроножной мышцы	M ± SD	14,7 ± 3,6	14,5 ± 3,5	14,4 ± 4,3	13,2 ± 4,1	p ₁ = 0,283 p ₂ = 0,068
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	14,3 [12,1; 16,3]	14,3 [11,6; 16,3]	14 [11,5; 15]	12 [10; 14]	
	Min–Max	8–23,5	8–22	9–23	8–22	
p — различия в основной и контрольной группах до и после тренировки		0,717		0,231		
Медиальная головка икроножной мышцы	M ± SD	22,5 ± 4,6	26,3 ± 5,4	23,7 ± 4,1	21,9 ± 3,6	p ₁ = 0,471 p ₂ = 0,002 ^{##}
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	23,4 [18,2; 25,2]	27,2 [21,3; 29,6]	24 [22,5; 26]	22 [21; 24]	
	Min–Max	13–31,6	15,3–36,7	13–31	12–27	
p — различия в основной и контрольной группах до и после тренировки		<0,001**		0,071		

Примечание. * Различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно параметрическому критерию t-Стьюдента для зависимых выборок; ** различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно непараметрическому критерию Вилкоксона для зависимых выборок; # различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно параметрическому критерию t-Стьюдента – Уэлча для независимых выборок; ## различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно непараметрическому критерию U-Манна – Уитни для независимых выборок; p_1 — различия между основной и контрольной группами до тренировки; p_2 — различия между основной и контрольной группами после тренировки.

Таблица 3. Изменение угла пеннации для левой нижней конечности через 6 мес. в основной и контрольной группах

Мышцы		угол пеннации				p
		основная группа		контрольная группа		
		до	после	до	после	
Камбаловидная мышца	M ± SD	13,6 ± 4,3	15,7 ± 4,7	13,4 ± 3,3	12,1 ± 2,7	p ₁ = 0,873 p ₂ = 0,008 ^{##}
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	12,2 [10,2; 16,1]	14,2 [11,8; 18,7]	14 [10,5; 16]	12 [10; 15]	
	Min–Max	7–26	8,1–29,6	8–20	8–16	
p — различия в основной и контрольной группах до и после тренировки		0,015**		0,208		
Латеральная головка икроножной мышцы	M ± SD	15,1 ± 3,7	15 ± 3,6	14,2 ± 3,8	13,1 ± 3,5	p ₁ = 0,331 p ₂ = 0,55
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	15,3 [12,3; 18]	15,3 [12,2; 18]	15 [11,5; 16]	14 [11; 15]	
	Min–Max	8–22,9	8–22,4	8–22	8–20	
p — различия в основной и контрольной группах до и после тренировки		0,842		0,379		
Медиальная головка икроножной мышцы	M ± SD	21 ± 4,1	24,3 ± 4,9	21,5 ± 4,8	19,5 ± 4,5	p ₁ = 0,686 p ₂ < 0,001 [#]
	Me [Q ₁ ; Q ₃]	21,4 [18,4; 23,2]	24,8 [21,2; 26,9]	22 [19; 24]	20 [16; 22]	
	Min–Max	12–30,6	13,9–35,8	12–30	11–27	
p — различия в основной и контрольной группах до и после тренировки		<0,001*		0,23		

Примечание. *Различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно параметрическому критерию t -Стьюдента для зависимых выборок; **различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно непараметрическому критерию Вилкоксона для зависимых выборок; # различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно параметрическому критерию t -Стьюдента – Уэлча для независимых выборок; ## различия статистически значимы при $p < 0,05$ согласно непараметрическому критерию U -Манна – Уитни; p_1 — различия между основной и контрольной группами до тренировки; p_2 — различия между основной и контрольной группами после тренировки.

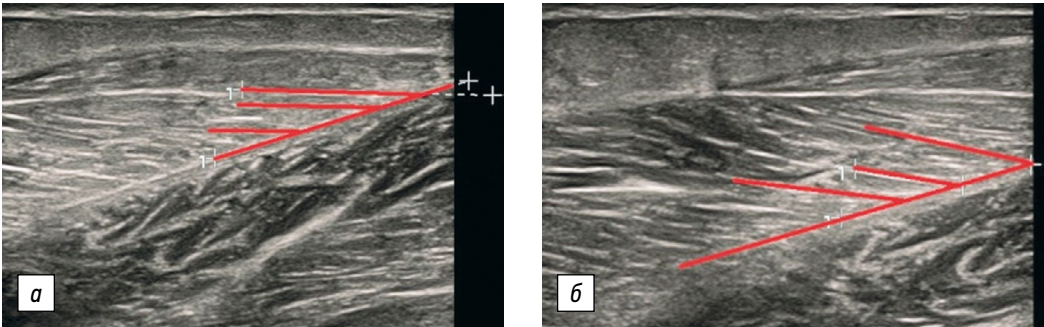


Рисунок. Ультрасонограммы медиальной головки икроножной мышцы пациента с гипермобильным плоскостопием и укорочением ахиллова сухожилия — увеличение угла пеннации: а — до начала программы стретчинга; б — через 6 мес. ее регулярного применения

Как показывают данные табл. 1, исходный угол тыльной флексии стопы у детей основной группы составил $4,84 \pm 0,10^\circ$, контрольной — $4,81 \pm 0,1^\circ$, то есть различия не были значимы ($p_1 = 0,773$). Через 6 мес. и более после начала программы стретчинга величина тыльной флексии в основной группе составила $11,34 \pm 0,24^\circ$, в контрольной — $4,85 \pm 0,19^\circ$ ($p_2 < 0,01$). Аналогично в контрольной группе не было зафиксировано значимых различий до начала стретчинга и после завершения программы ($p = 0,850$), а в основной группе изменения были статистически значимы ($p < 0,01$).

Результаты измерения УП через 6 мес. в основной и контрольной группах для правой нижней конечности представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Как следует из в табл. 2 и 3, УП медиальной головки икроножной мышцы и камбаловидной мышцы продемонстрировал достоверное увеличение, тогда как для латеральной головки икроножной мышцы данный показатель статистически значимо не изменился. На рисунке представлены ультрасонограммы медиальной головки икроножной мышцы пациента с ГПУАС до начала программы стретчинга и через 6 мес. ее регулярного применения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Причины ретракции трехглавой мышцы голени при плоскостопии доподлинно неизвестны и остаются предметом для обсуждения и поводом для дальнейших

исследований. Для выявления потенциальных причин ретракции необходимо изучение анатомических и физиологических изменений в трехглавой мышце, которые позволили бы пролить свет на происходящие в ней процессы. Среди методов исследования мышц ультразвуковой метод — один из наиболее распространенных. Он позволяет в режиме реального времени оценивать ряд анатомических параметров, характеризующих состояние мышечной ткани. Очевидные патологические изменения мышц, такие как разрывы, фиброз, атрофия, имеют более или менее четкие критерии. Однако у детей с первичными формами плоскостопия (не связанными с заболеваниями и повреждениями костной, нервной или мышечной системы) такого рода изменения встречаются редко и не могут рассматриваться в качестве универсальной причины снижения высоты свода стопы. Можно предположить, что изменения в трехглавой мышце голени, сопутствующие ретракции, носят накопительный характер и развиваются постепенно, начиная с незначительных отклонений от нормальных показателей. В этой связи обнаружение начальных изменений со стороны мышцы, характерных для детей с плоскостопием, может способствовать выявлению фундаментальных механизмов ретракции при данном состоянии. Среди количественных параметров, характеризующих состояние трехглавой мышцы голени, один из наиболее часто анализируемых и обсуждаемых — так называемый угол пеннации (угол перистости).

Как показали проведенные нами исследования, длительная программа стретчинга трехглавой мышцы голени достоверно привела к увеличению амплитуды тыльной флексии детей с ГПУАС. Ультразвуковое исследование также показало адаптивные морфологические изменения со стороны головок икроножной мышцы в виде увеличения УП медиальной головки икроножной мышцы и камбаловидной мышцы. В контрольной группе пациентов не обнаружено достоверных изменений УП. Таким образом, продемонстрировано влияние стретчинга в виде изменения параметров перистости мышцы, что предположительно влияет на ее функции.

Поскольку ретракцию трехглавой мышцы голени предполагают в качестве одного из ключевых звеньев патогенеза плоскостопия, представляется важным, помимо собственно констатации изменения формы стопы, изучение адаптивных механизмов со стороны трехглавой мышцы голени. В этой связи нами проведено исследование, целью которого было изучение влияния длительного курса стретчинга на морфологию трехглавой мышцы, а именно на изменение УП ее головок. Предшествовавшие исследования показали, что как «острое», так и «хроническое» растяжение трехглавой мышцы может влиять на величину УП, при этом разные авторы отмечают разнонаправленный эффект этих воздействий. Сопоставление представленных нами изменений с изменениями со стороны стопы составляет предмет наших дальнейших исследований.

Безусловно, патогенез плоскостопия не сводится к ретракции трехглавой мышцы голени и ее последствиям. В клинической практике встречается множество детей с плоскостопием без ретракции, кроме того, нельзя исключать вторичной ретракции в качестве адаптивного механизма при снижении высоты свода стопы и вальгусном положении ее заднего отдела. Эти предположения на сегодняшний день не доказаны, что не снижает их ценности в качестве гипотезы, требующей дальнейшего научного обоснования. Дальнейшие исследования, в том числе с применением количественных методов оценки морфологии мышц, позволят расширить наши знания в этой сложной области.

Программа длительного стретчинга трехглавой мышцы голени оказалась эффективной у детей с ГПУАС — ее адекватное, комплаентное использование привело к достоверному увеличению тыльной флексии стопы с 5 до 11°. Как показало ультразвуковое исследование трехглавой мышцы голени, эти изменения сопровождаются параллельными изменениями ее морфологии — увеличением УП ее головок, что объективно свидетельствует об адаптации мышцы к измененным условиям функционирования.

Соотношения УП и ретракции трехглавой мышцы голени у детей представлены в единичных публикациях, касающихся пациентов с детским церебральным параличом. Так, Т.А. Wren и соавт. [14] сообщили, что УП незначительно отличается у детей с фиксированным и динамическим эквинусом, при этом у детей, которым проводили хирургическое устранение эквинуса, УП был достоверно больше, чем у детей с эквинусом.

Физиологическое значение УП широко обсуждается в литературе. На сегодняшний день не существует единого мнения о непосредственном влиянии данного показателя на сократительную способность и другие функциональные параметры мышц. Большинство авторов связывают увеличение УП с повышением сократительной способности и увеличением силы эффективного сокращения мышцы, но ряд исследователей придерживаются противоположной точки зрения, основываясь на экспериментальных данных. Вероятно, данные противоречия обусловлены тем, что УП связан с так называемой кривой длина — сила — универсальным законом функционирования мышечной ткани, согласно которому сила мышечного сокращения увеличивается при растяжении мышцы до определенной величины, после которой снижается [15].

Таким образом, УП, вероятно, не является универсальным индикатором контрактильности мышцы, но его изменение свидетельствует о процессах физиологической адаптации мышцы к данным механическим условиям. В доступной литературе мы не обнаружили исследований, посвященных изменению УП при плоскостопии у детей. М. Nakamura и соавт. изучали влияние стретчинга различной длительности у здоровых взрослых добровольцев. Применяли стандартный протокол стретчинга (три подхода по 60 с с 30-секундными интервалами, 3 дня в неделю,

в течение 4 нед.), при этом значимых изменений УП достигнуто не было [16]. В то же время в исследовании T. Mizuno, также с включением здоровых взрослых добровольцев, отмечено увеличение УП у лиц, которым проводили статический стретчинг, как в изолированном виде, так и в сочетании с электростимуляцией, по сравнению с контрольной группой, после 8 нед. тренировки, хотя величина этого изменения была погранично достоверна [17]. I. Panidi и соавт. [18] провели исследование, в рамках которого подростки, занимающиеся спортом (средний возраст — 13 лет), применяли стретчинг. Авторы наблюдали уменьшение УП латеральной головки икроножной мышцы и отсутствие изменений в медиальной. S.R. Freitas и P. Mil-Homens изучали влияние интенсивного восьминедельного протокола стретчинга на архитектуру двуглавой мышцы бедра и продемонстрировали уменьшение этого параметра после тренировок [19].

R.W.-I. Miskowicz исследовал ближайшие эффекты стретчинга у здоровых взрослых добровольцев [2]. Автор выявил увеличение УП после данной процедуры. L.G. Dennis [20] также изучал непосредственные эффекты статического стретчинга и обнаружил увеличение УП как для медиальной, так и для латеральной головки икроножной мышцы.

В рамках настоящего исследования УП рассчитывали отдельно для правой и левой стопы. Общая тенденция (увеличение УП медиальной головки икроножной и камбаловидной мышц при отсутствии достоверной его динамики для латеральной головки икроножной мышцы) была продемонстрирована нами для обеих нижних конечностей. Однако значения этих показателей отличались. В предшествовавших исследованиях была определена разница УП между правыми и левыми конечностями [21]. Авторы объясняли это наличием доминантной нижней конечности. Для определения доминантной нижней конечности могут быть использованы различные методики, но, в отличие от способов, созданных для верхней конечности, их точность неочевидна, особенно у детей. Тем не менее наша работа подчеркивает несимметричность как исходных морфологических параметров, так и их динамики после длительной программы стретчинга. Этот факт необходимо в дальнейшем изучать, особенно ввиду нередко встречающейся асимметрии плоскостопия, что мы и планируем в следующих исследованиях.

Помимо прочего, наше исследование продемонстрировало низкую комплаентность пациентов в отношении рекомендаций врача по проведению стретчинга. Примечательно, что ни возраст ребенка, ни его пол в группе исследования не влияли на регулярность выполнения упражнений, следовательно, для выявления причин низкой приверженности терапии в дальнейшем целесообразно изучить иные факторы, такие как образовательный уровень родителей, экономические и социальные особенности семьи и др. Необходимо также отметить, что в основной группе детей с высокой приверженностью

программе длительного стретчинга более половины занимались спортом на регулярной основе, тогда как в контрольной группе практически все дети спортом не занимались. Это наблюдение требует дальнейшего осмысления для улучшения понимания роли консервативного лечения у детей, занимающихся и не занимающихся спортом.

Упражнения для растяжения ахиллова сухожилия — стандартное назначение, рекомендуемое всем пациентам с ГПУАС на амбулаторном приеме или при проведении профилактического осмотра. На практике эффективность этого назначения невелика, в связи с чем у значительного количества пациентов положительная динамика отсутствует, что можно рассматривать в качестве одного из показаний для хирургического лечения. Исследование, проведенное нами, показало, что как увеличение тыльной флексии, так и функциональная и морфологическая адаптация трехглавой мышцы голени, характеризующиеся изменением УП, отмечены у пациентов, которые методично следовали длительной программе стретчинга. В этой связи можно рекомендовать врачам больше внимания уделять разъяснению родителям и детям важности данной процедуры, ее регулярности и адекватной длительности, что, очевидно, повысит общую эффективность лечения у детей с ГПУАС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное нами исследование показало, что длительная программа стретчинга трехглавой мышцы голени у детей с ГПУАС привела к достоверному увеличению угла тыльной флексии стопы. Эти изменения сопровождались морфологической и функциональной перестройкой мышцы, проявляющейся увеличением УП обеих головок икроножной и камбаловидной мышц. Данный параметр (УП) можно использовать в качестве критерия мониторинга эффективности стретчинга, поскольку в контрольной группе подобные изменения обнаружены не были. Дальнейшие исследования будут способствовать выявлению непосредственных механизмов, лежащих в основе анатомической и функциональной перестройки мышцы, а также их влиянию на анатомические параметры стопы при плоскостопии.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках темы НИР «Мониторинг состояния опорно-двигательного аппарата у детей, занимающихся спортом и не занимающихся спортом, на основе комплексной оценки уровня двигательной активности, клинико-визуализирующих, биомеханических параметров, а также биомаркеров состояния костной и мышечной ткани» (регистрационный номер 1023030700030-9-3.2.10).

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

Этический комитет. Протокол исследования детей одобрен локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России (протокол заседания № 24-4-2 от 19.11.2024).

Информированное согласие на публикацию. Респонденты подтвердили свое согласие на обработку деперсонализированных данных и их публикацию.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Наибольший вклад распределен следующим образом: Л.В. Горбеев — сбор, анализ и обработка материала, подготовка текста статьи; В.М. Кенис — разработка концепции, поиск и анализ литературы, подготовка текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harris R.I., Beath T. Hypermobility flat-foot with short tendo achillis // *J Bone Joint Surg Am.* 1948. Vol. 30A, N 1. P. 116–140.
2. Miskowiec R.W.I. The acute effects of stretching on pennation angle and force production [dissertation abstract]. 2012. 30 p. doi: 10.31390/gradschool_theses.2322
3. Масенко В.Л., Коков А.Н., Григорьева И.И., и др. Лучевые методы диагностики саркопении // *Исследования и практика в медицине.* 2019. Т. 6, № 4. С. 127–137. EDN: VIXNRI doi: 10.17709/2409-2231-2019-6-4-13
4. Wu I.T., Hyman S.A., Norman M.B., et al. Muscle architecture properties of the deep region of the supraspinatus: a cadaveric study // *Orthop J Sports Med.* 2024. Vol. 12, N 10. ID: 23259671241275522. doi: 10.1177/23259671241275522
5. Zhang Y., Herbert R.D., Bilston L.E., et al. Three-dimensional architecture of the human subscapularis muscle in vivo // *J Biomech.* 2023. Vol. 161. ID: 111854. doi: 10.1016/j.jbiomech.2023.111854
6. Jiang W., Chen C., Xu Y. Muscle structure predictors of vertical jump performance in elite male volleyball players: a cross-sectional study based on ultrasonography // *Front Physiol.* 2024. Vol. 15. ID: 1427748. doi: 10.3389/fphys.2024.1427748
7. Wang R., Fu S., Huang R., et al. The diagnostic value of musculoskeletal ultrasound in the quantitative evaluation of skeletal muscle in chronic thyrotoxic myopathy: a single-center study in China // *Int J Gen Med.* 2024. Vol. 17. P. 3541–3554. doi: 10.2147/IJGM.S472442
8. Fu H., Wang L., Zhang W., et al. Diagnostic test accuracy of ultrasound for sarcopenia diagnosis: a systematic review and meta-analysis // *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2023. Vol. 14, N 1. P. 57–70. doi: 10.1002/jcsm.13149
9. Moeskops S., Oliver J.L., Radnor J.M., et al. Effects of neuromuscular training on muscle architecture, isometric force production, and stretch-shortening cycle function in trained young female gymnasts // *J Strength Cond Res.* 2024. Vol. 38, N 9. P. 1640–1650. doi: 10.1519/JSC.0000000000004856
10. Radnor J.M., Oliver J.L., Waugh C.M., et al. Muscle architecture and maturation influence sprint and jump ability in young boys: a multistudy approach // *J Strength Cond Res.* 2022. Vol. 36, N 10. P. 2741–2751. doi: 10.1519/JSC.0000000000003941
11. Димитриева А.Ю., Кенис В.М. Среднесрочные результаты тренировок баланса тела у детей младшего школьного возраста с генерализованной гипермобильностью суставов и симпто-

- матическим мобильным плоскостопием: когортное исследование // *Педиатрическая фармакология.* 2021. Т. 18, N 5. P. 346–358. EDN: YVHYML doi: 10.15690/pf.v18i5.2326
12. Mosca V.S. Principles and management of pediatric foot and ankle deformities and malformations. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
13. Димитриева А.Ю., Кенис В.М., Клычкова И.Ю., и др. Результаты первого российского Дельфийского консенсуса по диагностике и лечению плоскостопия у детей // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста.* 2023. Т. 11, № 1. С. 49–66. EDN: CAHOCE doi: 10.17816/PTORS112465
14. Wren T.A., Cheatwood A.P., Rethlefsen S.A., et al. Achilles tendon length and medial gastrocnemius architecture in children with cerebral palsy and equinus gait // *J Pediatr Orthop.* 2010. Vol. 30, N 5. P. 479–484. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181e00c80
15. Moo E.K., Leonard T.R., Herzog W. The sarcomere force-length relationship in an intact muscle-tendon unit // *J Exp Biol.* 2020. Vol. 223, Pt 6. ID: jeb215020. doi: 10.1242/jeb.215020
16. Nakamura M., Yoshida R., Sato S., et al. Comparison between high- and low-intensity static stretching training program on active and passive properties of plantar flexors // *Front Physiol.* 2021. Vol. 12. ID: 796497. doi: 10.3389/fphys.2021.796497
17. Mizuno T. Combined effects of static stretching and electrical stimulation on joint range of motion and muscle strength // *J Strength Cond Res.* 2019. Vol. 33, N 10. P. 2694–2703. doi: 10.1519/JSC.0000000000002260
18. Panidi I., Bogdanis G.C., Terzis G., et al. Muscle architectural and functional adaptations following 12-weeks of stretching in adolescent female athletes // *Front Physiol.* 2021. Vol. 12. ID: 701338. doi: 10.3389/fphys.2021.701338
19. Freitas S.R., Mil-Homens P. Effect of 8-week high-intensity stretching training on biceps femoris architecture // *J Strength Cond Res.* 2015. Vol. 29, N 6. P. 1737–1740. doi: 10.1519/JSC.0000000000000800
20. Lacey G.D. The effects of static stretching on pennation angle and muscle power production in the triceps surae complex // *Honors College Theses.* 2017.
21. Manal K., Roberts D.P., Buchanan T.S. Optimal pennation angle of the primary ankle plantar and dorsiflexors: variations with sex, contraction intensity, and limb // *J Appl Biomech.* 2006. Vol. 22, N 4. P. 255–263. doi: 10.1123/jab.22.4.255

REFERENCES

1. Harris RI, Beath T. Hypermobility flat-foot with short tendo achillis. *J Bone Joint Surg Am.* 1948;30A(1):116–140.
2. Miskowiec RWI. The acute effects of stretching on pennation angle and force production [dissertation abstract]. 2012. 30 p. doi: 10.31390/gradschool_theses.2322
3. Masenko VL, Kokov AN, Grigorieva II, et al. Radiology methods of the sarcopenia diagnosis. *Research and Practical Medicine Journal.* 2019;6(4):127–137. EDN: VIXNRI doi: 10.17709/2409-2231-2019-6-4-13
4. Wu IT, Hyman SA, Norman MB, et al. Muscle architecture properties of the deep region of the supraspinatus: a cadav-

- eric study. *Orthop J Sports Med.* 2024;12(10):23259671241275522. doi: 10.1177/23259671241275522.
5. Zhang Y, Herbert RD, Bilston LE, et al. Three-dimensional architecture of the human subscapularis muscle *in vivo*. *J Biomech.* 2023;161:111854. doi: 10.1016/j.jbiomech.2023.111854
 6. Jiang W, Chen C, Xu Y. Muscle structure predictors of vertical jump performance in elite male volleyball players: a cross-sectional study based on ultrasonography. *Front Physiol.* 2024;15:1427748. doi: 10.3389/fphys.2024.1427748
 7. Wang R, Fu S, Huang R, et al. The diagnostic value of musculo-skeletal ultrasound in the quantitative evaluation of skeletal muscle in chronic thyrotoxic myopathy: a single-center study in China. *Int J Gen Med.* 2024;17:3541–3554. doi: 10.2147/IJGM.S472442
 8. Fu H, Wang L, Zhang W, et al. Diagnostic test accuracy of ultrasound for sarcopenia diagnosis: A systematic review and meta-analysis. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2023;14(1):57–70. doi: 10.1002/jcsm.13149
 9. Moeskops S, Oliver JL, Radnor JM, et al. Effects of neuromuscular training on muscle architecture, isometric force production, and stretch-shortening cycle function in trained young female gymnasts. *J Strength Cond Res.* 2024;38(9):1640–1650. doi: 10.1519/JSC.0000000000004856
 10. Radnor JM, Oliver JL, Waugh CM, et al. Muscle architecture and maturation influence sprint and jump ability in young boys: a multistudy approach. *J Strength Cond Res.* 2022;36(10):2741–2751. doi: 10.1519/JSC.0000000000003941
 11. Dimitrieva AY, Kenis VM. Medium-term results of body balance trainings in primary school-aged children with generalized joint hypermobility and symptomatic mobile flat foot: cohort study. *Pediatric Pharmacology.* 2021;18(5):347–358. EDN: YVHYML doi: 10.15690/pf.v18i5.2326
 12. Mosca VS. *Principles and management of pediatric foot and ankle deformities and malformations.* Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2014.
 13. Dimitrieva AY, Kenis VM, Klychkova IYu. Results of the first russian delphi survey on the diagnosis and treatment of flatfoot in children. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery.* 2023;11(1):49–66. EDN: CAHOCE doi: 10.17816/PTORS112465
 14. Wren TA, Cheatwood AP, Rethlefsen SA, et al. Achilles tendon length and medial gastrocnemius architecture in children with cerebral palsy and equinus gait. *J Pediatr Orthop.* 2010;30(5):479–484. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181e00c80
 15. Moo EK, Leonard TR, Herzog W. The sarcomere force-length relationship in an intact muscle-tendon unit. *J Exp Biol.* 2020;223(Pt 6):jeb215020. doi: 10.1242/jeb.215020
 16. Nakamura M, Yoshida R, Sato S, et al. Comparison between high- and low-intensity static stretching training program on active and passive properties of plantar flexors. *Front Physiol.* 2021;12:796497. doi: 10.3389/fphys.2021.796497
 17. Mizuno T. Combined effects of static stretching and electrical stimulation on joint range of motion and muscle strength. *J Strength Cond Res.* 2019;33(10):2694–2703. doi: 10.1519/JSC.0000000000002260
 18. Panidi I, Bogdanis GC, Terzis G, et al. Muscle architectural and functional adaptations following 12-weeks of stretching in adolescent female athletes. *Front Physiol.* 2021;12:701338. doi: 10.3389/fphys.2021.701338
 19. Freitas SR, Mil-Homens P. Effect of 8-week high-intensity stretching training on biceps femoris architecture. *J Strength Cond Res.* 2015;29(6):1737–1740. doi: 10.1519/JSC.0000000000000800
 20. Dennis, Lacey G. The effects of static stretching on pennation angle and muscle power production in the triceps surae complex. *Honors College Theses.* 2017.
 21. Manal K, Roberts DP, Buchanan TS. Optimal pennation angle of the primary ankle plantar and dorsiflexors: variations with sex, contraction intensity, and limb. *J Appl Biomech.* 2006;22(4):255–263. doi: 10.1123/jab.22.4.255

ОБ АВТОРАХ

Леонид Владимирович Горобец, аспирант;
ORCID: 0000-0001-9424-3713;
e-mail: gorobetsleonid@gmail.com

* **Владимир Маркович Кенис**, д-р мед. наук, профессор;
адрес: Россия, 196603, Санкт-Петербург,
Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68;
ORCID: 0000-0002-7651-8485;
eLibrary SPIN: 5597-8832;
e-mail: kenis@mail.ru

AUTHOR INFORMATION

Leonid V. Gorobets, MD, PhD student;
ORCID: 0000-0001-9424-3713;
e-mail: gorobetsleonid@gmail.com

* **Vladimir M. Kenis**, MD, PhD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
address: 64–68 Parkovaya str., Pushkin,
Saint Petersburg, 196603, Russia;
ORCID: 0000-0002-7651-8485;
eLibrary SPIN: 5597-8832;
e-mail: kenis@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author