



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт возрастной физиологии Российской академии
образования»
(ФГБНУ «ИВФ РАО»)

**УЗЛОВЫЕ ПЕРИОДЫ РАЗВИТИЯ МЫШЕЧНОЙ ФУНКЦИИ
У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПЕДАГОГОВ И
РОДИТЕЛЕЙ

Москва – 2017

Авторы: Сонькин В.Д., д.б.н., профессор; Тамбовцева Р.В., д.б.н., профессор;
Маслова Г.М., Букреева Д.П., Васильева Р.М., к.б.н.

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	4
<u>Введение.</u> Определение понятий	5
<u>Раздел 1.</u> Физические возможности детей школьного возраста	9
Правило поверхности М.Рубнера и его приложение к онтогенезу	9
Возрастные изменения энергетического обмена	11
Возрастные изменения физических возможностей ребенка	14
Методологические проблемы изучения физических возможностей детей и подростков	20
<u>Раздел 2.</u> Рост и развитие опорно-двигательного аппарата.	24
Рост и развитие костного скелета.	24
Рост и развитие скелетных мышц.	30
Мышечное волокно.	30
Онтогенез мышечных волокон.	32
Дифференцировка мышц в период полового созревания.	34
Роль половых гормонов.	36
Этапы развития скелетных мышц.	37
Динамика роста скелетных мышц.	39
<u>Раздел 3.</u> Онтогенез энергетических источников в скелетных мышцах	41
Биохимические исследования энергетики скелетных мышц.	41
Аэробный (окислительный) источник.	42
Анаэробно-гликолитический (лактацидный) источник.	47
Фосфагенный (алактатный) источник.	49
Возрастные этапы становления энергетики мышечной деятельности.	50
<u>Заключение</u>	52
Рекомендованная литература	53

Список сокращений

АП – анаэробный порог

БАВ – биологически активные вещества

БФ МКД – быстрая (алактатная) фракция максимального кислородного долга (л)

ДК – дыхательный коэффициент – отношение выделенного углекислого газа к потребленному за то же время кислороду (безразмерные единицы)

ДО – дыхательный объем (мл)

ЖЕЛ – жизненная емкость легких (мл)

ИНПД – интенсивность накопления пульсового долга (уд/с)

КПД (кпд) – коэффициент полезного действия (% или безразмерные единицы)

МАМ – максимальная анаэробная мощность (Вт, Вт/кг, кГм/мин)

МКД – максимальный кислородный долг (л)

МОД – минутный объем дыхания, то же, что и ЛВ – легочная вентиляция

МПК – максимальное потребление кислорода (л/мин или мл/мин/кг)

МФ МКД – медленная (лактаcidная) фракция максимального кислородного долга (л)

ОО – основной обмен (Ккал/час; Ккал/кг/мин; Вт)

СМИ – средства массовой информации

ЦНС – центральная нервная система

ЧД – частота дыхания (дых. цикл/мин)

ЧСС – частота сокращений сердца (уд/мин)

EVCO₂ – скорость выделения углекислого газа (л/мин или мл/мин/кг)

PWC170 – физическая работоспособность (мощность работы) при пульсе 170 уд/мин (Вт; Вт/кг; кГм/мин; кГм/мин/кг)

VO₂ – скорость потребления кислорода (л/мин или мл/мин/кг)

ВВЕДЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЙ

Узловыми периодами онтогенеза называют такие точки на траектории развития, когда в организме происходят наиболее важные (судьбоносные) преобразования количественных и качественных характеристик. Восходящая фаза онтогенеза представляет собой почти непрерывный поток изменений, связанных с ростом и развитием. Рост и развитие обычно употребляются как понятия тождественные, неразрывно связанные между собой. Между тем, биологическая природа этих процессов различна, различны их механизмы и последствия.

Рост - это количественное увеличение биомассы организма за счет увеличения геометрических размеров и массы отдельных его клеток или увеличения числа клеток благодаря их делению.

Развитие - это качественные преобразования в многоклеточном организме, которые протекают за счет *дифференцировочных процессов* (увеличение разнообразия клеточных структур) и приводят к качественным и количественным изменениям функций организма.

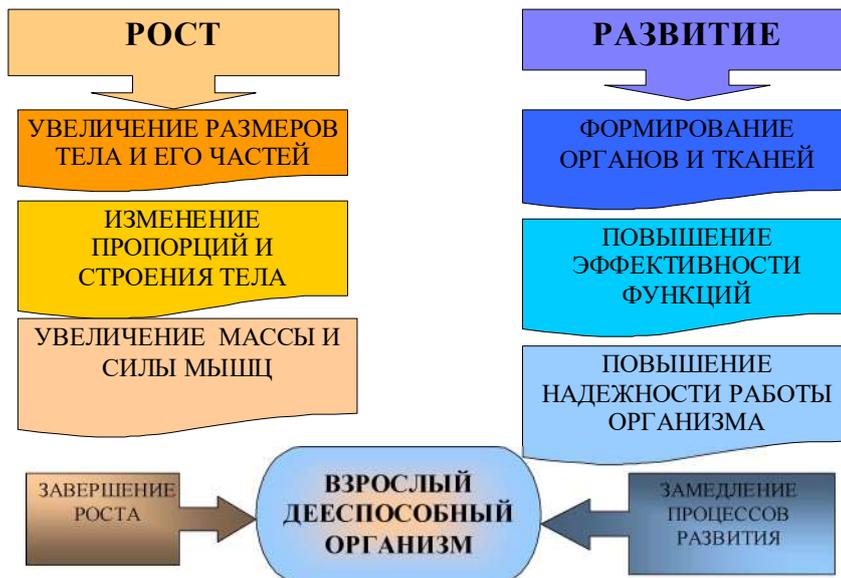


Рис.1. Схема, иллюстрирующая различие процессов роста и развития

Взаимосвязь роста и развития проявляется, в частности, в том, что определенные стадии развития могут наступать только при достижении определенных размеров тела. Так, половое созревание у девочек может наступить только тогда, когда масса тела достигнет определенной величины (для представителей европейской расы это около 48 кг). Активные ростовые

процессы также не могут продолжаться на одной и той же стадии развития бесконечно.

Дифференцировочные процессы, или *дифференцировка* - это появление специализированных клеток нового качества из мало специализированных клеток-предшественниц.

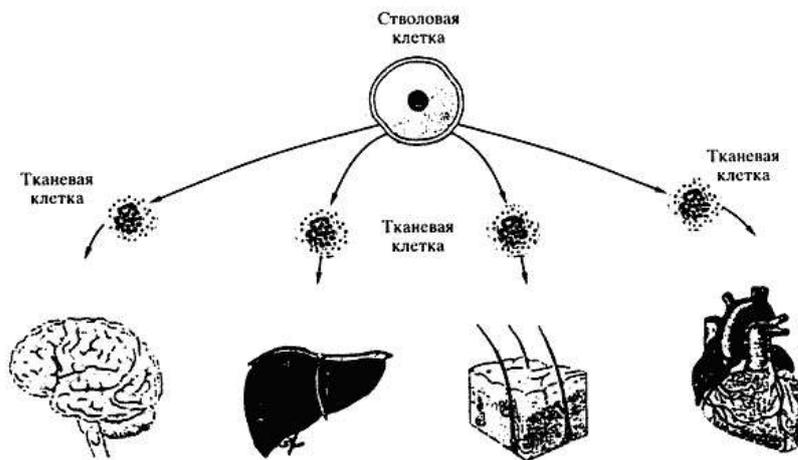


Рис. 2. Схема, поясняющая смысл дифференцировочных процессов

Процессы **роста** приводят к появлению количественных различий структур и функций развивающегося организма. Процессы **развития** обуславливают появление качественных различий в морфологической структуре и организации деятельности физиологических систем.

Исследованию процессов роста и дифференцировки были посвящены многочисленные работы ученых в первой половине XX века. Большой вклад в разрешение этих проблем внесли выдающиеся отечественные ученые - академик И.И.Шмальгаузен, проф. М.С.Мицкевич, акад. Б.Л.Астауров, и другие. Они показали, что рост и дифференцировка - фундаментальные процессы развития любого живого организма. Причем никогда не бывает так, что та или иная ткань одновременно находится в состоянии роста и в состоянии дифференцировки, эти этапы всегда чередуются. Биохимические исследования последних десятилетий позволили на молекулярном уровне понять причины такого чередования: организация метаболических путей в клетке, накапливающей биомассу без качественных изменений (рост), и в клетке, претерпевающей качественные структурные перестройки (дифференцировка), принципиально различна. Вопрос о том, каким образом синхронизируются ростовые и дифференцировочные процессы в клетках одного типа (в составе одной ткани) остается до настоящего времени открытым. Ясно, что в такой

синхронизации принимает участие центральная нервная система, доказано также синхронизирующее влияние многих гормонов (например, гормона роста и половых гормонов). Однако детальные механизмы подобной синхронизации еще недостаточно изучены. Следует подчеркнуть, что если внутри одной ткани, как правило, большинство клеток синхронно вступают в стадию роста или в стадию дифференцировок, то для разных тканей эта закономерность может и не соблюдаться.

Дифференцировка клеток и тканей в онтогенезе.

Наименее специализированной, то есть недифференцированной, можно считать зиготу - зародышевую клетку, образующуюся в результате слияния материнской яйцеклетки с отцовским сперматозоидом. Генетический аппарат зиготы содержит полный двойной набор хромосом, и все дальнейшее развитие организма представляет собой активацию или репрессию той или иной части генома, который от зародышевой клетки полностью и без изменений передается всем ее потомкам в процессе каждого акта деления. В зависимости от того, какая часть генома активируется в новообразовавшейся клетке, из этой клетки формируется специализированная, принадлежащая конкретной ткани (например, клетка крови, или мышечное волокно, или жировая клетка и т.п.). Активация того или иного участка генетического кода регулируется другими генами, в которых записана последовательность событий, необходимых для приобретения клеткой определенной «специальности». Пока еще не ясно, почему в той или иной клетке активируется именно этот, конкретный участок наследственной информации, который представляет собой «план строительства» данной клетки. В самом начале эмбрионального периода (в первые 2-3 недели) каким-то образом на этот процесс влияет местоположение клеток. Было высказано даже предположение о существовании некоей биогенетической энергии (Гурвич, Белоусов), которая управляет этим процессом, созданы математические модели, которые позволяют рассчитать форму и состояние эмбриона на начальных этапах развития, однако физическая сущность этой энергии до сих пор не выяснена, а математическая модель перестает работать после определенной стадии развития). Когда начинают формироваться нервные клетки, то уже они принимают на себя регуляцию развития тех тканей, к которым эти нервные клетки протягивают свои окончания. Деятельность генетического аппарата клетки столь сложна, что в последние годы признанной является точка зрения, вполне соответствующая сегодняшнему уровню развития технического прогресса. Согласно этому представлению, в ядре каждой клетки функционирует своеобразный молекулярный компьютер, который и осуществляет управление всеми процессами, включая бесконечный ряд биохимических реакций, а также тонкое

управление генетическим аппаратом. При этом клетки осуществляют между собой непрерывный обмен информацией примерно по такой же схеме, как функционирует всемирная информационная сеть Интернет. Для передачи информации используются гуморальные (с помощью растворенных в крови и межклеточной жидкости веществ) и нервные (с помощью проведения электрического сигнала) каналы. Мозг, согласно этим представлениям, исполняет роль центрального процессора и сервера, куда стекается информация ото всех тканей и даже отдельных клеток, именно там вырабатываются стратегические решения, а все остальные клетки организма узнают об этих решениях благодаря тем же гуморальным и нервным каналам информации. Таким образом осуществляется управление всеми функциями организма, каждой отдельной клеточкой тела, в том числе – управление процессами роста и дифференцировки.



Рис. 3. Начальный этап развития эмбриона: стадия четырех бластомеров

Первые этапы развития зиготы представляют собой простое увеличение числа неотличимых друг от друга клеток - сначала зигота делится на 2, потом каждая из них еще на 2, то есть образуется 4 клетки, затем - 8, 16, 32 и т.д. Эти эмбриональные клетки называются бластомерами, они похожи, как две капли воды. Однако уже на стадии 32 бластомеров начинают выявляться некоторые особенности отдельных клеток, связанные с их местоположением. По мере увеличения числа бластомеров эти различия все возрастают. Часть из этих клеток, образующих вместе сферу, увеличивается в размере более, чем другие. Постепенно организм эмбриона приобретает вид удлинненной замкнутой с одного конца трехслойной трубочки (наподобие червя), причем клетки апикального (головного) и каудального (хвостового) концов все более расходятся по своим свойствам, не только внешним, но и внутренним, метаболическим. Более того, клетки наружного слоя (эктодерма), внутреннего (энтодерма) и промежуточного (мезодерма) оказываются существенно различными по своим свойствам, а также по своей роли в дальнейшем развитии организма. Так, наружный, эктодермальный слой клеток дает начало кожным

покровам, костям и нервной ткани. Средний, мезодермальный слой, служит «прародителем» всех мышц организма. Клетки внутреннего слоя, энтодермы, формируют все паренхиматозные органы (печень, почки, селезенка, железы внутренней секреции, жировые клетки и т.п.) и эпителий желудочно-кишечного тракта. Все эти сложнейшие преобразования, приводящие постепенно к формированию совершенно не схожих между собой клеточных структур и разных по форме и функции тканей, являются проявлением дифференцировочных процессов. Именно в этом и заключается развитие - от единственной зародышевой клетки - до организма, насчитывающего миллиарды клеток различной специализации.

Сроки развития и созревания детского организма. Долгое время существовало убеждение, что дифференцировочные процессы в основном заканчиваются во внутриутробном периоде, а дальнейшее развитие связано преимущественно с особенностями роста отдельных органов. В последние десятилетия убедительно показано, что это не так: многие ткани организма продолжают развиваться, в том числе и путем дифференцировочных процессов, вплоть до завершения полового созревания. Особенно длителен период созревания возбудимых тканей - нервной и мышечной.

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕЙ ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА

Правило поверхности М.Рубнера и его приложение к онтогенезу



Исследуя энергетические процессы в организме животных и человека, известный немецкий физиолог Макс Рубнер в конце XIX века показал, что организм теплокровных животных подчиняется так называемому "правилу поверхности", согласно которому скорость образования энергии организмом пропорциональна площади поверхности тела. Рубнер исходил из неопровержимо доказанного к тому времени закона сохранения энергии, согласно которому в любой системе, в том числе и в живом организме, количество образованной (с одной стороны) и использованной или рассеянной (с другой стороны) энергии в сумме обязательно равны друг другу.

Этот важнейший из физических законов стал активно использоваться для объяснения множества физиологических феноменов во второй половине XIX века. На нем, в частности, основаны все расчеты калорической стоимости пищевых продуктов, расчеты суточных и производственных энергозатрат и

связанные с ними научно обоснованные величины потребности человека в продуктах питания, и многое другое. Широкое исследование энергопродукции организма с помощью специально оборудованных камер, позволявших очень точно улавливать любые изменения теплосодержания в замкнутом объеме, позволили получить множество фактов и закономерностей, которыми до сих пор оперирует научная биоэнергетика. Одна из таких закономерностей – «правило поверхности» М.Рубнера. Основанием для вывода о том, что продукция тепла у млекопитающих всегда пропорциональна площади поверхности тела, послужили данные, полученные на взрослых собаках разных пород, которые сильно различались размерами тела. Оказалось, что мелкие по размерам тела собаки вырабатывают в единицу времени неожиданно большое количество энергии по сравнению с крупными животными. Рубнер рассуждал так: поскольку вся энергия, образующаяся в организме, рано или поздно превращается в тепло (это действительно так: что бы мы ни делали, мы затрачиваем энергию, а она, в конце концов, превращается либо в движение, либо в тепло), его нужно рассеивать в окружающее пространство, чтобы сохранять постоянной температуру тела. У млекопитающих, к которым относится и человек, для этого есть несколько специальных приспособлений (например, потоотделение), но главное – это излучение тепла с поверхности тела. Поэтому чем больше эта поверхность, тем большее количество тепла должен производить организм, чтобы удерживать температуру тела постоянной, а соотношение скорости образования тепла и площади поверхности тела должно быть константой. К тому времени уже было известно, что у маленьких детей интенсивность обменных процессов очень высокая, это требовало своего физиологического объяснения, и эксперименты М.Рубнера дали ему возможность такое объяснение предложить.

Надо сказать, что эта работа М.Рубнера произвела такое впечатление на научное физиологическое сообщество, что и до сих пор многие показатели, сравниваемые у представителей разных видов животных или разных возрастных групп внутри одного вида, соотносят для сопоставления с площадью поверхности тела. Следует заметить, что прием этот хотя и интересный, но не бесспорный, поскольку поверхность тела ответственна за рассеивание энергии, а за производство энергии ответственна активная масса тела. Между тем, при увеличении линейных размеров тела его поверхность возрастает пропорционально квадрату, а масса – пропорционально кубу изменения длины, то есть гораздо быстрее. По этой причине во многих случаях для сравнения энергопродукции различных по размерам тела организмов более удобно и, главное, более правильно, пользоваться отношением ее величины не к площади поверхности, а к массе тела.

Возрастные изменения энергетического обмена

Так или иначе, полученные в конце XIX - начале XX века фактические данные убеждали: с возрастом интенсивность обменных процессов в организме снижается. Это было особенно четко показано для условий так называемого «основного обмена», то есть состояния полного покоя, когда ни пищеварительная, ни мышечная, ни другие энергоемкие системы организма не вносят дополнительный вклад в энергопродукцию. Такое состояние у человека бывает утром натощак. Были рассчитаны простейшие математические уравнения, которые описывали возрастное снижение интенсивности основного обмена у человека от рождения до старости. Наиболее известное из них – уравнение Кляйбера. В то же время, постепенно накапливались данные о том, что в первые 2-3 года жизни ребенка интенсивность основного обмена сначала ниже, а затем даже выше величин, требуемых по теоретическому уравнению Кляйбера, и только с возраста 4-5 лет устанавливается соответствующая "правилу поверхности" скорость метаболизма в условиях основного обмена (см. рис.4). Таким образом, оказывалось, что постнатальный онтогенез в первом приближении можно поделить на две части - первые 4-5 лет жизни развивающийся организм представлялся физиологам как "молодой", у которого возрастные изменения связаны с морфофункциональным созреванием основных физиологических систем, а затем начинают преобладать влияния процессов роста и увеличения размеров тела, и в результате - организм постепенно перестает быть "маленьким".



Рис. 4. Возрастные изменения скорости роста и интенсивности метаболизма

Таблица 1

Структура энергетических затрат организма

ЭНЕРГОЗАТРАТЫ ОРГАНИЗМА								
БАЗАЛЬНЫЙ МЕТАБОЛИЗМ			ФУНКЦИЯ			РОСТ И РАЗВИТИЕ [АДАПТАЦИЯ]		
ФУТИЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ	МИНИ- МАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ФУНКЦИЙ	РЕПАРА- ТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ	ВНЕШНЯЯ РАБОТА +			СИНТЕЗЫ [АНА- БОЛИЗМ]	ДЕСТРУК- ЦИЯ УСТАРЕВ- ШИХ СТРУКТУР [КАТА- БОЛИЗМ]	АКТИВА- ЦИЯ ГЕНОМА
			ГОМЕОСТАЗ [ПОСТО- ЯНСТВО ВНУТРЕН- НЕЙ СРЕДЫ]	ГОМЕО- МОРФОЗ [ПОСТО- ЯНСТВО ФОРМЫ]	ГОМЕОРЕЗ [ПОСТО- ЯНСТВО РАЗВИВА- ЮЩИХСЯ СИСТЕМ]			

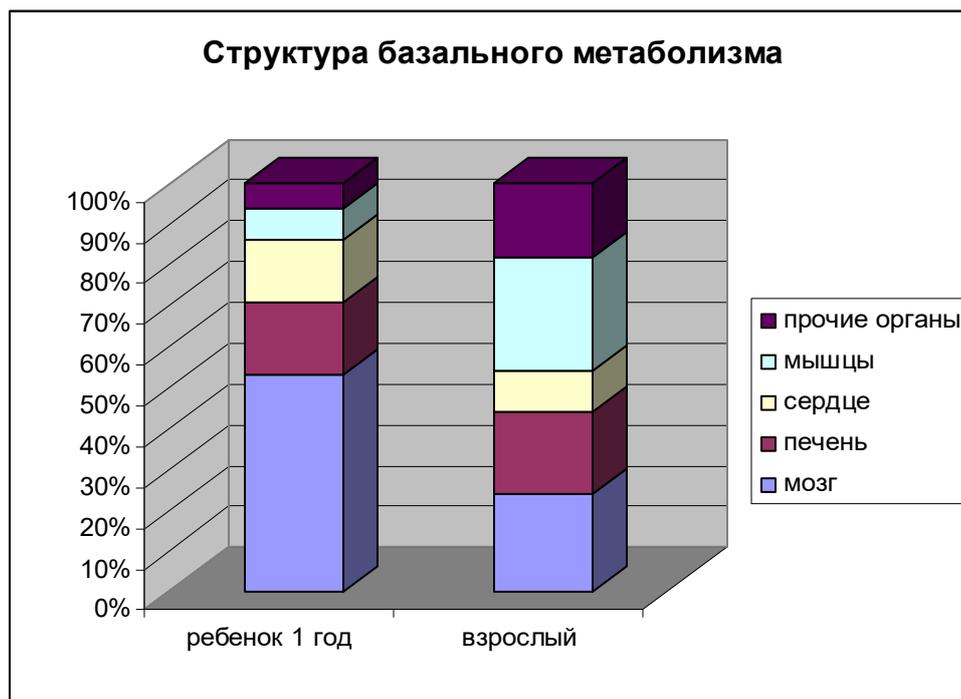


Рис.5. Возрастные различия структуры основного обмена у детей и взрослых

Действительно, начиная с 4-5-летнего возраста, относительная величина многих показателей, нормированная по массе тела, остается постоянной, поскольку они изменяются пропорционально изменениям массы тела. Так, среднее значение величины сердечного выброса в 7 лет составляет 23 мл, а в 17 лет 60 мл - показатель увеличивается в 2,6 раза, в среднем ровно на эту же величину за этот возрастной интервал увеличивается и масса тела. Точно в такой же пропорции увеличивается у мальчиков дыхательный объем (190 и 500 мл), жизненная емкость легких (1200 и 3200 мл), и т.д.. Даже такой показатель, как величина максимального потребления кислорода (МПК), от 7 до 17 лет у не занимающихся спортом мальчиков возрастает также в 2,6 раза (1150 и 3000 мл кислорода в мин. соответственно). Его относительная (по отношению к массе тела) величина претерпевает с возрастом лишь очень небольшие изменения. Это было впервые показано в классической работе шведского ученого Пэра-Олофа Остранда в 1952г. и впоследствии подтверждено многими исследованиями.



Сэр Арчибальд Хилл, лауреат Нобелевской премии по физиологии



Профессор Пер-Олаф Остранд в момент награждения почетным званием

Со времен нобелевского лауреата, крупнейшего английского физиолога Арчибальда Хилла, важнейшие работы которого приходятся на 1910-1920-е гг., принято считать, что величина МПК является чуть ли не главным, базовым показателем рабочих возможностей человека, а мощность работы, при которой достигается максимум скорости потребления кислорода («критическая мощность»), в работах западных авторов традиционно рассматривается как "максимальная". Здесь необходимо отметить, что в отечественной литературе для характеристики интенсивности нагрузки принята эргометрическая шкала В.С.Фарфеля, о которой речь будет ниже, и которая принципиально отличается способом классификации нагрузок по их интенсивности. Именно А.Хилл ввел в научный оборот термин МПК (он, правда, называл его «кислородный потолок» - очень образное и точное по смыслу название), кислородный долг, и многие другие. Фактически, он был первым исследователем биоэнергетики мышечной деятельности в спорте. С «легкой руки» Хилла, величина МПК является наиболее употребляемой характеристикой мощности аэробного энергообеспечения. В то же время, получается, что разобраться в возрастной динамике развития аэробной энергетики с помощью одних лишь данных о величинах МПК, невозможно - показатель этот в течение всего школьного возраста остается "привязанным" в первую очередь к размерам тела.

Возрастные изменения физических возможностей ребенка

Элементарный жизненный опыт подсказывает, что физическая работоспособность ребенка с возрастом увеличивается, причем многократно. Порядок величин возрастного увеличения объемов выполняемой работы можно оценить на основании решения простой задачи (Таб.1). Так, первоклассник должен уметь подтянуться на перекладине один раз. Для учеников 10-11 классов норма – не менее 10 подтягиваний. Как для первоклассника, так и для юноши такой объем работы близок к пределу их работоспособности. Имея в виду, что масса тела от 7 до 17 лет

увеличивается, в среднем, в 2,8 раза, а длина рук – в 1,6 раза, легко подсчитать, что выполняемая старшеклассником работа в абсолютном выражении возрастает в $(2,8 * 1,6 * 10) = 44,8$ раза по сравнению с работой первоклассника.

Между тем, масса мышц за этот период увеличивается только в 2,7 раза (то есть практически пропорционально массе тела), аналогичный масштаб имеет прирост ведущего показателя аэробной производительности – МПК, еще в меньшей степени возрастает максимальная концентрация лактата в крови, отражающая активность анаэробно-гликолитических процессов. Только величина максимального кислородного долга увеличивается от 7 до 17 лет интенсивней, чем масса тела или масса мышц, демонстрируя значительное нарастание вклада анаэробных процессов в энергообеспечение предельной мышечной работы с возрастом, что является результатом качественных изменений в структуре мышечной энергопродукции. Однако очевидно, что ни каждый из этих широко употребляемых в спортивной физиологии показателей в отдельности, ни все они вместе не дают оснований для прогноза 45-кратного увеличения работоспособности.

Возникающее противоречие может иметь только одно разумное объяснение: мы используем для описания возрастных изменений мышечной энергетики не те показатели, которые способны отражать реальное повышение работоспособности с возрастом. Они не демонстрируют и не позволяют учесть те **качественные** изменения, которые происходят в организме в этом возрасте и обеспечивают многократный рост работоспособности.

Таб. 2

ВОЗРАСТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ: ПОДТЯГИВАНИЕ НА ВЫСОКОЙ ПЕРЕКЛАДИНЕ

Показатель	Мальчик 7 лет	Юноша 17 лет	Отношение юноша/мальчик
Количество подтягиваний (возрастная норма)	1	10	10
Масса тела	25 кг	70 кг	2,8
Амплитуда движения	0,25 м	0,40 м	1,6
Объем выполняемой работы	6,25 кГм	280 кГм	44,8
Масса мышц [Holliday]	9 кг	24 кг	2,7
МПК [Astrand]	1,05 л/мин	2,7 л/мин	2,7
Максимальный лактат [Astrand]	60 мг/л	120 мг/л	2,0
Максимальный O ₂ -долг [Astrand]	1,5 л	8,0 л	5,5

Иными словами, дело не в том, что дети – маленькие, а потому – слабые. Дело в том, что их организм, в том числе при мышечной работе, функционирует **иначе**, чем у взрослых. Поэтому простое снижение объемов

нагрузки, предлагаемой детям, не является правильным методическим подходом: тренировочная нагрузка для детей должна иметь совершенно иную структуру, чем аналогичная нагрузка для взрослых.

Если применять к детям логику спортивной физиологии, то можно предположить, что дети хуже используют кислород, который потребляют в процессе мышечной работы. Этим можно было бы объяснить их меньшую работоспособность при равенстве МПК.

Однако точные физиологические измерения показали, что это далеко не так. Вот, например, опыты, которые мы проводили с участием детей – учеников 1 класса и 10-классников. И те, и другие выполняли одинаковую по относительной мощности нагрузку (мы выше уже говорили, что почти все показатели следует относить к массе тела, когда анализируешь возрастные закономерности. Это относится и к величине мышечной нагрузки) – 1,3 Вт/кг. Это нагрузка не очень тяжелая. Старшеклассники могут выполнять ее долго – 10 минут и больше – без явного утомления. Для детей 7-8 лет она кажется более тяжелой, их выносливости обычно хватает только на 7-8 минут. При этом мы измеряли с помощью маски и газоанализатора скорость потребления кислорода. Оказалось, что прибавка этого показателя по сравнению с уровнем покоя – совершенно одинаковая что у старшеклассников, что у первоклассников, то есть *k_{нд}* аэробной работы у детей такой же, как у взрослых (около 22-23%). Из этого следует, что сравнительно более низкая работоспособность детей не связана с плохим усвоением кислорода. Больше того, у детей младшего возраста после такой работы кислородный долг, отражающий онтически нехватку кислорода в процессе работы и связанную с этим степень участия анаэробных процессов в энергообеспечении, оказался меньше, чем у юношей. Следовательно, ограничение их работоспособности не зависит и от повышенного участия анаэробных процессов в энергообеспечении работы такой мощности. Дальнейшие исследования показали, что активность анаэробных процессов в мышцах детей младшего школьного возраста вообще существенно ниже, чем у юношей и взрослых. Первым на это обратил внимание шведский биохимик Б.Эрикссон, который измерил активность одного из ключевых ферментов анаэробного гликолиза (фосфофруктокиназы) в мышцах детей и подростков. Оказалось, что у подростков активность этого фермента примерно в 2 раза выше, чем у детей более раннего возраста. Многочисленные измерения анаэробных возможностей детей и подростков, проведенные в дальнейшем в разных странах и разнообразными методами, подтвердили вывод Эрикссона: дети в анаэробных условиях имеют намного меньшую работоспособность, чем подростки и взрослые.

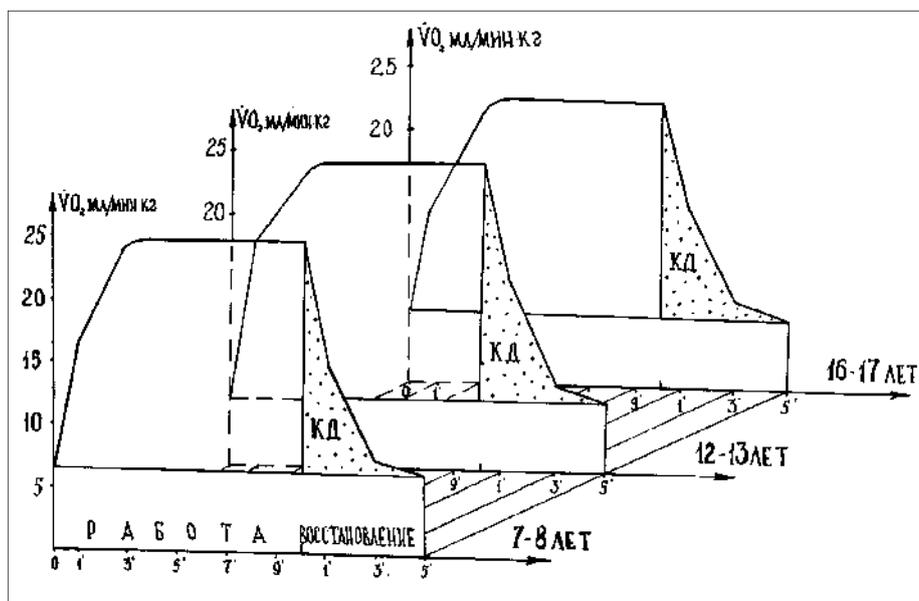


Рис. 6. Динамика потребления кислорода при работе стандартной мощности на велоэргометре (1,3 Вт/кг) и в восстановительном периоде у мальчиков трех возрастных групп. По оси абсцисс: время работы/восстановления По оси ординат: потребление кислорода, мл/мин.кг

Наиболее полное представление о возрастном развитии физических возможностей ребенка можно получить, анализируя результаты стандартных педагогических тестов, которые проводит обычно каждый учитель физкультуры в школе. На графиках, представленных ниже (рис.7), даны результаты ряда таких тестов для мальчиков и девочек от 7 до 17 лет, то есть на протяжении всего школьного возраста. Посмотрим на них внимательно.

На первом графике – средние результаты динамометрии, то есть измерения силы кисти с помощью кистевого динамометра. Причем для надежности измеряли как силу правой кисти, так и левой. Как видно, эти графики идут параллельно, причем правая рука во всех возрастах немного сильнее левой (это естественно. потому что большую часть популяции составляют правши). Левая шкала графика показывает силу в абсолютных единицах (кГ), а правая – в относительных (кГ/кг массы тела). У девочек прирост силы за школьный период составляет примерно 15 кГ, и завершается он практически к 13-14 годам. У мальчиков прирост составляет около 30кГ, причем завершается он только в 16 лет (10 класс). Таким образом, сила у девочек за 11 лет обучения в школе увеличивается примерно в 2,5 раза, тогда как у мальчиков – в 4 раза. Интересно, что относительная сила нарастает быстрее всего у девочек в возрасте 8 и 12-13 лет (первый пик – завершение полуростового скачка; второй пик – пубертатный скачок роста). У мальчиков бурный рост относительной силы начинается в 12 лет и продолжается с почти постоянной скоростью до 16. Как будет показано дальше, на развитие силы огромное влияние оказывают мужские половые гормоны. У девочек небольшая активация продукции мужских гормонов происходит на начальной стадии полового созревания, а потом их доля становится незначительной. У мальчиков, начиная с 12 лет, продукция половых

гормонов все время нарастает (до завершения полового созревания) – а вместе с ней и сила мышц.

На следующей паре графиков – результаты измерения гибкости позвоночника (из положения сидя на полу). У девочек этот показатель больше, чем у мальчиков, но его возрастное увеличение – примерно одинаковое. Легко представить себе, что гибкость позвоночника зависит от длины тела, особенно – длины туловища. Если подсчитать удельную гибкость, то есть поделить результат в тесте на длину туловища, то выявляется несколько иная картина. У девочек этот показатель сначала снижается (к 8 годам), а потом нарастает двумя приступами: от 8 до 12 и от 15 до 17. По-видимому, эти периоды естественного прироста данного качества являются наиболее благоприятными для его тренировки. У мальчиков удельная гибкость практически не меняется (колеблется) вплоть до 10 лет, затем ненадолго снижается, а потом начинается ее быстрое увеличение, которое происходит в три приема: от 11 до 13, от 14 до 15 и от 16 до 17. Так или иначе, во всех возрастных группах у девочек этот показатель выше, чем у мальчиков.

Для характеристики взрывной силы мышц ног часто используют тест «прыжок в длину с места». Его результаты – на следующей паре графиков. Результат этого теста у девочек плавно увеличивается от 7 до 14 лет, после чего практически не меняется. У мальчиков рост показателя продолжается до 16 лет. Уровень показателя, как и его прирост за 11 лет школьной жизни, у мальчиков несколько выше, чем у девочек. Очень примечательна динамика относительного показателя – «удельной прыгучести», которая представляет собой отношение результата теста к длине ног, поскольку именно от длины ног зависит результат в подобном тесте. У девочек этот показатель остается на примерно одном уровне от 7 до 9 лет, а потом резко падает, и больше уже не возрастает. У мальчиков тоже наглядно видно падение от 7 к 9 годам, затем – стабилизация на более или менее постоянном уровне до 14 лет, и резкий подъем к 16 годам. Чтобы понять, от чего зависит именно такая динамика, необходимо представить себе тот физиологический механизм, который обеспечивает взрывную силу. Фактически, речь идет об однократном максимально сильном сокращении мышц ног и туловища. Сила такого сокращения зависит, в первую очередь, от наличия в мышцах мощной АТФ-азы миозина, которая содержится в волокнах II типа. Приведенные результаты заставляют предположить, что мышцы качественно меняются в период от 7 до 17 лет, меняется соотношение между волокнами разных типов, из которых сложены смешанные мышцы человека, причем несколько по-разному у мальчиков и девочек. В дальнейшем мы увидим, что это действительно так. Однако здесь необходимо подчеркнуть, что даже самые простые измерения позволяют обнаружить периоды важных качественных изменений в работе организма, если корректно применять метод морфофункциональных индикаторов, то есть находить такие способы выражения показателя, который нивелирует зависимость от рутинных

ростовых процессов и за счет этого позволяет ярко выявлять именно качественные, то есть наиболее важные возрастные изменения.

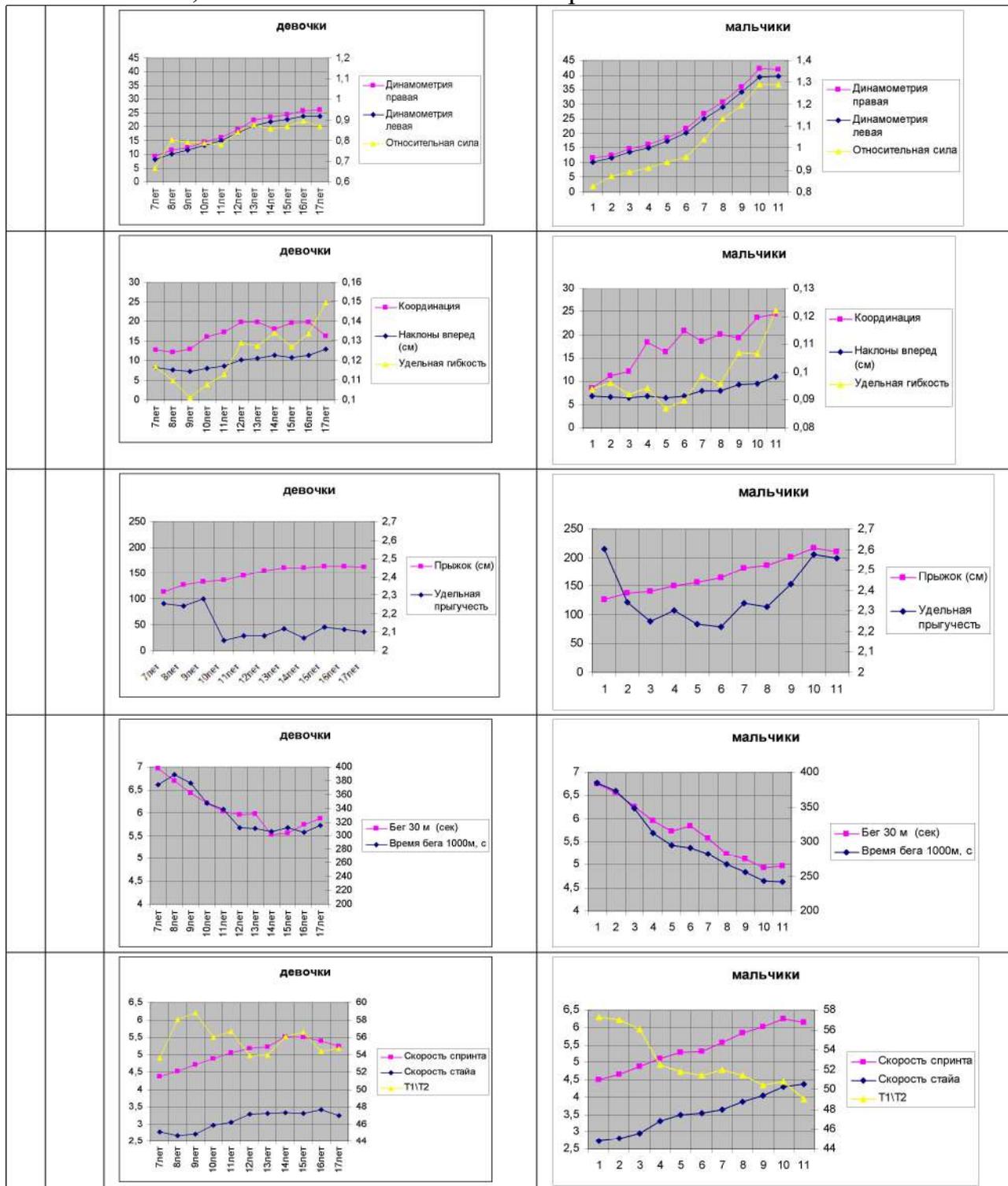


Рис. 7. Возрастные изменения физических возможностей мальчиков и девочек, не занимающихся спортом

Следующая пара графиков демонстрирует результаты в беге на короткую (30м) и длинную (1000м) дистанции. Более удобно анализировать показатели скорости, которые демонстрируют школьники на этих дистанциях. Как скорость спринта, так и скорость сталя увеличиваются на протяжении школьного возраста. Это определяется общим увеличением

размеров тела. в том числе длины ног, а также нарастанием мощности скелетных мышц, особенно у мальчиков начиная с 14 лет. Соотношение времени в спринтерском и стайерском беге с возрастом снижается, особенно у мальчиков, что отражает более быстрый прирост скорости на длинных дистанциях, чем на коротких.

Физиологически это объясняется тем, что в энергообеспечении бега на длинные дистанции с возрастом (после 14 лет) большое значение начинают иметь анаэробно-гликолитические механизмы, значительно более мощные, чем аэробные.

Таким образом, возрастное увеличение физических возможностей ребенка демонстрирует сложнейшие преобразования, происходящие в организме. Частично эти преобразования связаны просто с увеличением размеров тела, однако немало и таких, которые отражают качественные изменения либо в самих мышцах, либо в механизмах их энергетического и вегетативного обеспечения. Именно эти последние и представляют наибольший интерес для возрастной физиологии мышечной деятельности. Однако выявляются они лишь в том случае, если корректно применяется метод морфофункциональных индикаторов, то есть такой способ проведения и выражения результатов тестов, который не затушевывает, а выявляет количественные и качественные возрастные различия.

Методологические проблемы изучения физических возможностей детей и подростков.

Еще со времени первых исследований по мышечной физиологии для решения многих задач широкое применение нашли эргометрические методы исследования. Эти методы основаны на учете времени и (или) объема выполненной работы определенной интенсивности (мощности). При использовании эргометрии в возрастных исследованиях основная трудность состоит в подборе нагрузки, адекватной физическим возможностям испытуемого. Этот вопрос имеет принципиальное методологическое значение, и ошибка при его решении подчас обесценивает сложные и кропотливые исследования.

Вот пример. При оценке возрастных изменений выносливости широкое распространение получил способ определения величины нагрузки, основанный на предварительном определении уровня максимальных возможностей с последующей оценкой предельной длительности (объема) работы при нагрузке, равной 50% (или в другой доле) от максимума. В спорте такой способ вполне корректен и пригоден. На этом же методологическом принципе в 50-80 гг. было выполнено большое количество возрастных исследований. Рассмотрим данные одного из них, в котором изучали возрастное развитие статической выносливости. Согласно этим данным, за время обучения в школе максимальная физическая сила, измеряемая по силе сжатия резиновой груши, соединенной со столбом ртути, возрастает с 39,1 до 101,2 мм ртутного столба, т.е. в 2,59 раза (пропорционально увеличению массы тела), с максимальными приростами в

10 и 17 лет. В то же время, выносливость (при нагрузке равной 50% от максимума), судя по времени предельной работы, возросла с 57,8 до 114,1 с, т.е. в 1,97 раза. При этом наиболее значительные возрастные изменения приходятся на 8 и 15 лет. Таким образом, получается, что сила и выносливость развиваются в разные сроки (что, вероятно, правильно и соответствует концепции гетерохронного развития), и что выносливость увеличивается в гораздо меньшей степени, чем сила (что совершенно не соответствует ни научным данным, ни житейскому опыту). Ошибка здесь состоит в том, что для дозирования нагрузки использовали процентный метод. Дело в том, что процентный метод пригоден только тогда, когда мы имеем дело с равномерным распределением свойства. Между тем, физиологическое обеспечение легкой и тяжелой нагрузки существенно различается, а структура диапазона нагрузок также меняется с возрастом, причем по мере взросления увеличивается ширина зоны тяжелых нагрузок, с которыми все более успешно способны справляться подрастающие подростки. Поэтому 50% от максимума силы для младшего ребенка – сравнительно легкая нагрузка, тогда как для старшеклассника – сравнительно тяжелая. Вот и получается, что младший ученик в таком тесте работает в более благоприятных условиях, а потому прирост времени удержания нагрузки (выносливости) гораздо меньше, чем реальный рост выносливости при сопоставимых по физиологическому эффекту нагрузок.

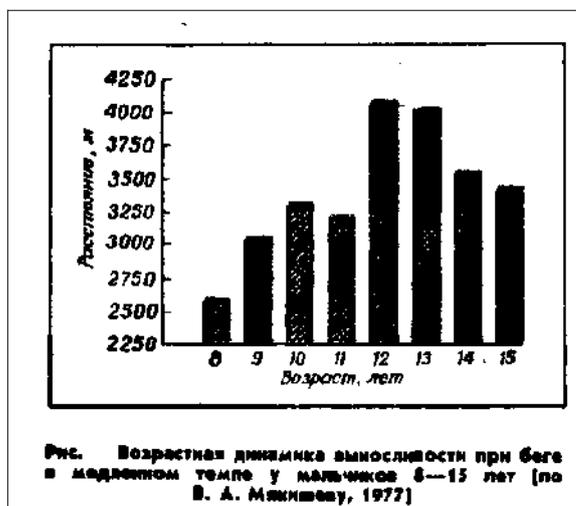


Рис. 8. Изменения выносливости в медленном беге у мальчиков от 8 до 15 лет

Аналогичный пример, но уже с циклическими динамическими нагрузками, представляет исследование, в котором оценивали время предельной работы ($t_{пред.}$) при беге со скоростью 50% от максимальной. На рис. 8 видно, что мальчики 8 лет пробегают, удерживая заданную скорость, в среднем 2550 м. В 13 лет пробегаемая дистанция возрастает до 4050 м (увеличивается на 59%). Но в дальнейшем пробегаемая предельная дистанция укорачивается, и к 15-летнему возрасту снижается на 21%, что формально свидетельствует о снижении выносливости к такой работе после 13 лет. Совершенно очевидно, что здесь сработала та же методологическая ошибка – процентное измерение уровня нагрузки, не учитывающее

качественного своеобразия структуры работоспособности в разные возрастные периоды.

Проще всего использовать для оценки работоспособности прямой метод эргометрического определения выполненного объема работ. При этом для уравнивания изменений размеров тела можно использовать нагрузку в расчете на единицу массы тела, что обычно и делается в современной сравнительной и возрастной физиологии. Используя такой подход, мы провели в конце 70-х годов исследования на мальчиках - учащихся одной из школ г. Москвы. Для того чтобы выявить изменения работоспособности в зависимости от интенсивности выполняемой работы, исследования проводились при двух нагрузках - большой ($W_1=3\text{Вт/кг}$) и субмаксимальной ($W_2=5\text{Вт/кг}$) мощности, которые были подобраны так, чтобы предельное время работы оставалось в разумных, с точки зрения времени проведения эксперимента, пределах. Каждый из испытуемых выполнял на велоэргометре по две нагрузки (в разные дни) «до отказа», то есть до предела своих функциональных возможностей. Результаты этого исследования приведены на рис.

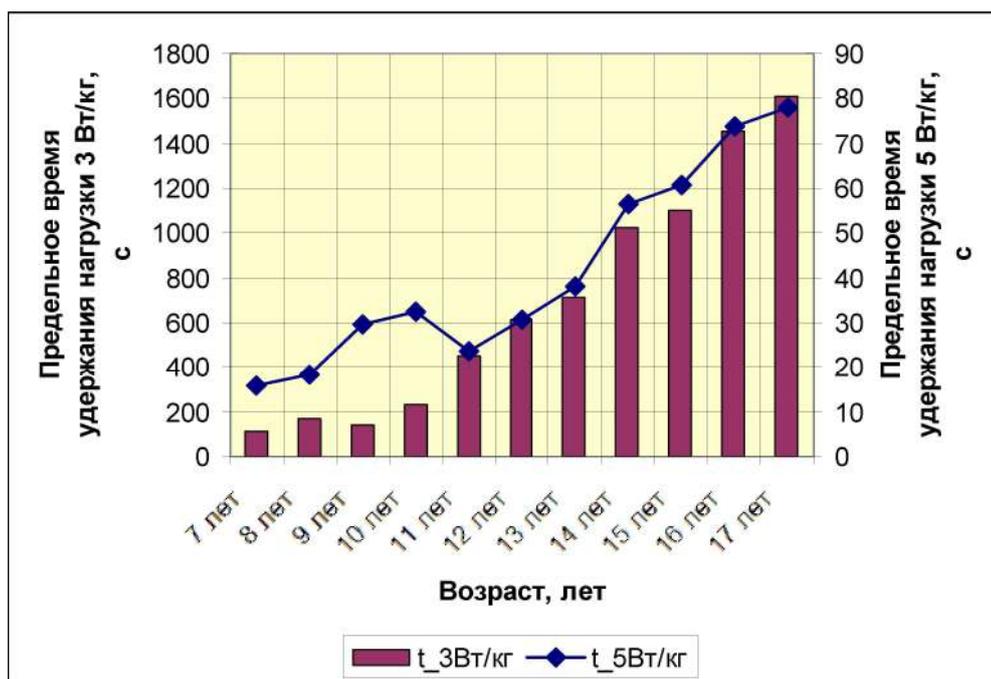


Рис. 9 Возрастные изменения предельного времени удержания велоэргометрической нагрузки большой (3 Вт/кг) и субмаксимальной (5 Вт/кг) мощности у нетренированных мальчиков школьного возраста

Полученные цифры удивительны прежде всего тем, что такая, казалось бы, примитивная методика, основанная всего лишь на учете времени и объема предельной работы, когда испытуемый сам определяет степень своего утомления и время окончания работы, дает достаточно строгие ряды цифр. Сопоставляя объемы выполняемой работы 7 и 17-летними

школьниками, мы в прямом опыте оценили возрастные изменения работоспособности. Например, по результатам выполнения большой ($W=3Вт/кг$) нагрузки, можно видеть, что за 10 лет объем выполняемой работы возрастает в 14,6 раза. Если учесть, что масса тела за это время увеличивается в 2,6 раза, то легко подсчитать, что рабочие возможности всего организма возрастают от 7 до 17 лет в 38 раз!

Как видно, экспериментально полученная цифра оказалась достаточно близка к той, что была приведена выше при условном расчете возрастного изменения работоспособности 10-классников по сравнению с первоклассниками при подтягивании на перекладине. Итак, простейший, но корректно выстроенный эргометрический тест, показал: работоспособность с возрастом развивается довольно интенсивно, увеличиваясь (в абсолютном выражении) каждый год за время обучения в школе в среднем в 3-4 раза!

Однако почему-то ничего подобного ни одним из сложных физиологических методов зарегистрировать не удастся. Ни определение максимального потребления кислорода, ни расчет критической мощности или параметров анаэробного порога, ни результаты в тесте PWC_{170} , - то есть ни один из наиболее популярных физиологических приемов диагностики работоспособности - не позволяют увидеть реального возрастного увеличения рабочих возможностей ребенка. **Что же они, в таком случае, отражают?** В этом нам предстоит разобраться в одной из следующих лекций.

Еще одно важное замечание, вытекающее из рассмотренных нами данных. Долгие годы считалось, что скелетные мышцы завершают свое функциональное созревание к возрасту 2-4 года, когда ребенок научается устойчиво ходить и даже бегать (к 4 годам у ребенка появляется фаза полета в беге, то есть отталкивание и приземление в каждом цикле беговых шагов), а последующие возрастные изменения рабочих возможностей скелетных мышц (в том числе - в школьном возрасте) объясняются просто количественным увеличением массы мышц и тела. Из того, что мы рассмотрели в данной лекции, ясно, что эти взгляды неверны. Темпы роста реальной работоспособности, оцениваемой по объему выполненной работы, значительно выше, чем темпы количественного увеличения мышечной массы. Все это может свидетельствовать лишь о том, что и в школьном возрасте продолжают процессы развития, то есть качественных преобразований мышечной ткани, результатом чего и является многократный рост работоспособности на этом этапе индивидуального развития. Конкретные механизмы морфофункциональных изменений скелетных мышц на этапе полуростового скачка роста, препубертатного и пубертатного периода будут освещены в следующей лекции.

РАЗДЕЛ 2. РАЗВИТИЕ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА.

Рост и развитие костного скелета

Костный скелет и прикрепленные к нему мышцы составляют опорно-двигательный аппарат человека. Как и у всех позвоночных, скелет человека представляет собой структурную основу его тела, определяет его форму, размер и пропорции. Скелет защищает от механических воздействий головной и спинной мозг, а также формирует полости, в которых под надежной защитой находятся внутренние органы. Перемещения звеньев тела осуществляются благодаря тому, что отдельные кости соединены друг с другом при помощи подвижных сочленений, а мышцы, прикрепленные к разным костям, способны перемещать их относительно друг друга. Все движения человека – это перемещение в пространстве звеньев его тела, то есть костей, благодаря сократительной активности скелетных мышц.

Особенности опорно-двигательного аппарата человека во многом связаны с размерами его тела, а также с прямохождением. Тем не менее, как и у всех млекопитающих, тело человека состоит из головы, туловища и конечностей, причем такое строение приобретает эмбрион уже на 3 месяце внутриутробной жизни.

Кость. Скелет состоит из костей, которых у взрослого человека более 200. Кость – это самый сложный орган, имеющий, как и все другие органы, клеточное строение. Внутри кости проходят многочисленные полости и каналы, кость обильно снабжается кровью и лимфой, к ней подходят многочисленные нервные окончания, которые воспринимают информацию о состоянии костной ткани и передают управляющие импульсы из нервных центров. Внутри многих костей имеется полость, где расположен костный мозг – важнейший орган кроветворения, в котором образуются все типы клеток крови. Снаружи кость покрыта надкостницей – специальной защитной, очень чувствительной к механическому воздействию оболочкой. Клетки надкостницы растут и размножаются, обеспечивая утолщение кости по мере роста.

Этапы окостенения

Кость – очень прочное и твердое вещество: в 30 раз тверже кирпича, в 2,5 раза тверже гранита; прочность кости в 9 раз выше, чем у свинца, и почти столь же велика, как у чугуна. Бедренная кость человека в вертикальном положении выдерживает давление до 1,5 тонн, а большеберцовая – до 1,8 т.

Механическая прочность кости зависит от содержания в ней минеральных веществ, особенно солей кальция. В составе кости около 10% воды, 30% белка и других органических веществ, а остальное (60%) – минеральные соли. Важнейшим органическим составляющим костной ткани является белок коллаген, образующий эластичные и вязкие волокна. Именно этот белок придает костям упругость. Хрящевая ткань, выстилающая суставы

и находящаяся на периферии костей молодого организма, представляет собой гораздо менее минерализованную структуру, содержащую много коллагена, и мало солей кальция.

У детей в костной ткани содержание минеральных веществ намного ниже, поэтому их скелет более гибкий и эластичный, способен легко деформироваться под воздействием внешних причин – тяжелой физической работы, неправильного положения тела и т.п.

Процесс насыщения кости минеральными веществами называется *минерализация*. По мере роста и развития человека минерализация его костей увеличивается, достигая оптимальных значений к концу полового созревания. Минерализация кости приводит к тому, что хрящевые участки постепенно превращаются в костные, поэтому этот процесс называется также *окостенением*. С возрастом кости становятся менее эластичными, но более хрупкими. К старости, когда минеральный обмен нарушается, из кости вымывается значительное количество кальция, в результате кости утрачивают прочность, сохраняя при этом свою хрупкость. Вот почему у стариков так часты переломы костей.

В течение первого года жизни окостенение скелета происходит очень активно во множестве точек. Этому способствует специфическое строение костной ткани ребенка, в частности - относительно большее (в 5 -10 раз в расчете на единицу площади поперечного сечения) количество каналов, по которым внутри кости проходят мелкие сосуды. Благодаря этому снабжение костей кровью у детей гораздо более интенсивное, чем у взрослых.

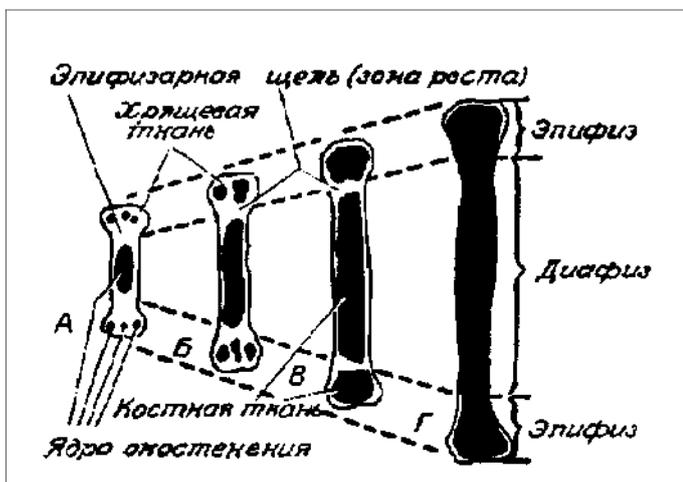


Рис. 10 Последовательные стадии окостенения

На развитии костного скелета может отрицательно сказываться нарушение баланса витамина D, который участвует в метаболизме кальция в костной ткани. Недостаток витамина ведет к появлению рахита, который проявляется в замедлении процессов окостенения и, как следствие, - в нарушении пропорций в развитии сочленяемых костей. Признаки рахита особенно часто видны по измененной форме черепа и грудной клетки. Для профилактики рахита принято давать детям первого года жизни рыбий жир или синтетический витамин D. В то же время, избыток этого витамина также

нежелателен, так как он может приводить к ускорению процессов окостенения и торможению ростовых процессов в костной ткани.

Рост и развитие костей заканчиваются к 20-24 годам у мужчин и на 2-3 года раньше – у женщин. К этому времени завершается окостенение всех зон роста, то есть замена в них хрящевой ткани на костную. Рост кости в толщину может в определенных условиях продолжаться и позднее. На этом, в частности, основано сращивание костей после перелома.

Череп. Вместительное головное мозга, а также каркас для мышц, обеспечивающих мимику и первичную обработку пищи в ротовой полости, составляют кости черепа.

Череп новорожденного состоит из нескольких отдельных костей, соединенных мягкой соединительной тканью. В тех местах, где сходятся 3-4 кости, эта перепонка особенно велика, такие зоны называют *родничок*. Благодаря родничкам, кости черепа сохраняют подвижность, что имеет важнейшее значение при родах, так как голова плода в процессе родов должна пройти через очень узкие родовые пути женщины. После рождения роднички зарастают – в основном к 2-3 месяцам, но самый большой из них, лобный, только к возрасту 1,5 лет.



Рис. Возрастные изменения формы и размеров черепа. Цифры 5, 7, 9 означают месяцы внутриутробного развития

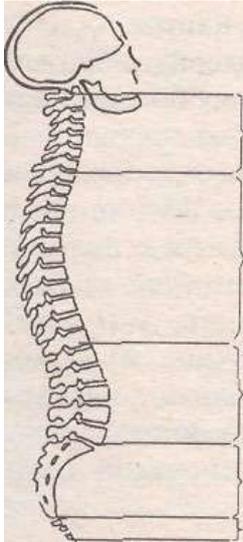
Мозговая часть черепа детей значительно более развита, чем лицевая. Интенсивное развитие лицевой части происходит в период полуростового скачка, и особенно – в подростковом периоде под воздействием гормона роста. У новорожденного объем мозгового отдела черепа в 6 раз больше лицевого, а у взрослого в 2-2,5 раза.

Голова ребенка относительно очень велика. С возрастом существенно изменяется соотношение между высотой головы и ростом. Это соотношение используется как один из морфологических критериев биологического возраста ребенка.

Рис. 11 Развитие черепа

Позвоночник. Позвоночник новорожденного, как и взрослого, состоит из 32-33 позвонков (7 шейных, 12 грудных, 5 поясничных, 5 тазовых и 3-4-хвостовых), причем их рост и окостенение заканчиваются только с половым созреванием. Главной отличительной особенностью позвоночника ребенка первого года жизни является практическое отсутствие изгибов. Они формируются постепенно, по мере роста туловища и реализации антигравитационных реакций (сидение, стояние, прямохождение), и призваны обеспечить биомеханически наиболее эффективные режимы как при статической, так и при динамической нагрузке.

Рис. 12. Отделы позвоночника и его физиологические изгибы:



- 1 — шейный отдел, лордоз;*
- 2 — грудной отдел, кифоз;*
- 3 — поясничный отдел, лордоз;*
- 4 — крестцовый отдел, кифоз;*
- 5 — копчиковый отдел.*

Первой образуется шейная кривизна (выпуклостью вперед), когда у ребенка появляется возможность удерживать в вертикальном положении голову. К концу первого года жизни формируется поясничная кривизна (также выпуклостью вперед), необходимая для реализации позы стояния и прямохождения. Грудная кривизна (выпуклостью назад) формируется позже. Позвоночник ребенка этого возраста еще очень эластичен, и в лежачем положении его изгибы сглаживаются. Недостаток двигательной активности в этом возрасте отрицательно сказывается на развитии нормальной кривизны позвоночного столба.

Следует подчеркнуть, что формирование нормальной кривизны позвоночника - важнейший этап в развитии не только костного скелета, но и всех внутренних органов, так как от формы и изгибов позвоночника зависит взаимное расположение органов в грудной клетке и брюшной полости. Кроме того, позвоночник -местилище спинного мозга, из которого проводящие нервные пути отходят ко всем полостным органам и тканям, а также к каждой скелетной мышце. Нарушения в развитии позвоночника могут иметь самые тяжелые последствия для здоровья. Именно поэтому так важна профилактика, которую следует начинать уже на первом году жизни ребенка, производя с ним осторожные и умеренные физические упражнения и массаж, а также соблюдая гигиенические нормы и правила обращения с ребенком. Наиболее часто возникают боковые искривления позвоночника в шейном и грудном отделах (сколиоз), причем нередко они имеют причину в неправильном уходе за ребенком. Так, очень важно следить, чтобы ребенок спал на достаточно твердой поверхности с невысокой подушкой, в удобной и естественной позе, а также периодически ее менял: это - одно из средств профилактики сколиозов шейного отдела. Сколиозы грудного отдела, а также кифоз (передне-заднее искривление грудного отдела) и лордоз (чрезмерный изгиб в поясничной области вперед) в раннем возрасте развиваются редко.

Рост позвоночника наиболее интенсивно происходит в первые 2 года жизни. При этом сначала все отделы позвоночника растут относительно

равномерно, а начиная с 1,5 лет рост верхних отделов – шейного и верхнегрудного – замедляется, и увеличение длины происходит в большей мере за счет поясничного отдела. Таким образом, в динамике роста позвоночного столба также отмечается выраженный градиент темпов развития – «от головы к хвосту». Следующий этап ускорения роста позвоночника – период «полуростового» скачка. Последнее вытягивание позвоночника происходит на начальных этапах полового созревания, после чего рост позвонков замедляется.

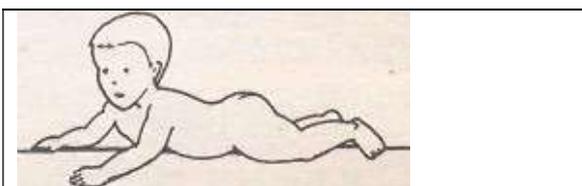


Рис. 13. Первоначальное формирование изгибов позвоночника у ребенка в первые месяцы после рождения

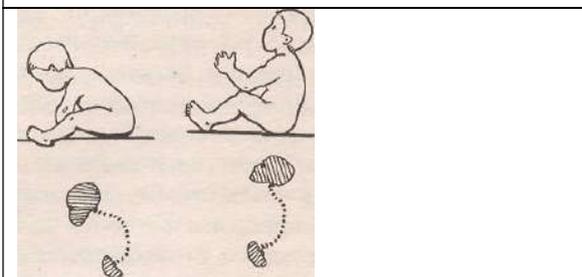


Рис. 14. Формирование изгибов позвоночника у ребенка, осваивающего положения сидя

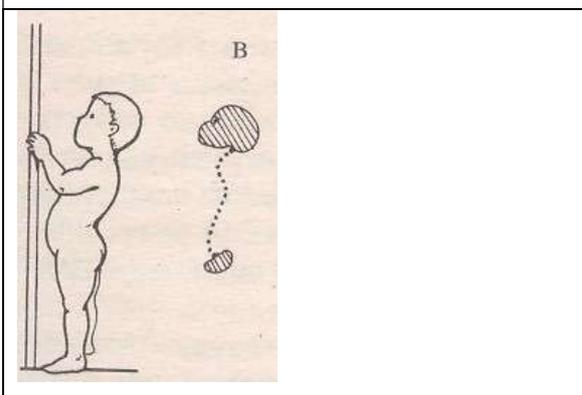


Рис. 15. Таким становится позвоночник ребенка, когда он учится стоять и ходить

Окостенение позвонков продолжается в течение всего детского возраста, причем до 14 лет окостеневают только их средние части. Завершается окостенение позвонков только к 21-23 годам. Изгибы позвоночника, начавшие формироваться на 1 году жизни, полностью формируются в возрасте 12-14 лет, то есть на начальных стадиях полового созревания.

Грудная клетка. Грудной отдел позвоночника, 12 пар ребер и грудина составляют грудную клетку, в которой под этой надежной защитой размещены сердце, легкие и другие жизненно важные органы. Движения ребер под воздействием межреберных мышц обеспечивают акт дыхания. Вот почему форма и размер грудной клетки имеют важнейшее значение для осуществления физиологических процессов.

У новорожденного грудная клетка имеет коническую форму, причем ее размер от грудины до позвоночника больше, чем поперечный. У взрослого человека – наоборот.

По мере роста ребенка форма грудной клетки меняется. Уменьшается угол, под которым ребра соединены с позвоночником. Уже к концу 1 года жизни это обеспечивает значительное увеличение амплитуды дыхательных движений грудной клетки, что делает дыхание более глубоким и эффективным и позволяет снизить его темп. Коническая форма грудной клетки после 3-4 лет сменяется на цилиндрическую, а к 6 годам пропорции грудной клетки становятся похожими на взрослые. Это в еще большей степени позволяет увеличить эффективность дыхательных движений, особенно при физической нагрузке. К 12-13 годам грудная клетка приобретает ту же форму, что у взрослого.

Форма грудной клетки после 12-13 лет тесно связана с телосложением. Представители долихоморфных (вытянутых в длину) типов имеют удлиненную, цилиндрическую грудную клетку с острым эпигастральным углом (угол между двумя нижними ребрами в точке их сращения с грудиной). У представителей брахиморфных (с преобладанием ширины) типов грудная клетка становится бочкообразной, короткой, с тупым эпигастральным углом. У промежуточного мезоморфного типа эпигастральный угол бывает прямым.

Скелет верхних конечностей. Пояс верхних конечностей состоит из двух лопаток и двух ключиц. Они образуют жесткий каркас, формирующий верхнюю границу туловища. К лопаткам подвижно прикреплены кости свободных конечностей (правой и левой), которые включают плечевую кость, предплечье (лучевая и локтевая кости) и кисть (мелкие кости запястья, 5 длинных пястных костей и кости пальцев).

Окостенение свободных конечностей продолжается до 18-20 лет, причем ранее всего окостеневают ключицы (практически, еще внутриутробно), затем – лопатки, и последними – кости кисти. Именно эти мелкие кости служат объектом рентгенографического исследования при определении «костного возраста». На рентгенограмме эти мелкие косточки у новорожденного только намечаются, и становятся ясно видимыми только к 7 годам. К 10-12 годам выявляются половые различия, которые заключаются в более быстром окостенении у девочек по сравнению с мальчиками (разница составляет примерно 1 год). Окостенение фаланг пальцев завершается в основном к 11 годам, а запястья – в 12 лет, хотя отдельные зоны продолжают оставаться неокостеневшими до 20-24 лет.

Скелет нижних конечностей. Пояс нижних конечностей включает таз и свободные нижние конечности. Таз включает крестец (нижний отдел позвоночника) и неподвижно соединенные с ним две тазовые кости. У детей каждая тазовая кость состоит из трех самостоятельных костей: подвздошной, лобковой и седалищной. Их сращение и окостенение начинается с 5-6 лет, а завершается к 17-18 годам. Крестец у детей также еще состоит из

несросшихся позвонков, которые соединяются в единую кость в подростковом возрасте. В этом возрасте важно следить за походкой, качеством и удобством обуви, а также остерегаться резких ударов, способных причинить вред позвоночнику. Неправильное сращение или деформация костей таза может оказать неблагоприятное влияние на здоровье в дальнейшем. В частности, для девочек очень важна форма и размер выхода из малого таза, которая влияет на прохождение плода при родах. Половые различия в строении таза начинают проявляться в возрасте 9 лет.

К тазовым костям прикреплены бедренные кости свободных нижних конечностей. Ниже расположены пары костей голени – большеберцовые и малоберцовые, а затем кости стопы: предплюсна, плюсна, фаланги пальцев. Стопа образует свод, опирающийся на пяточную кость. Свод стопы – исключительная привилегия человека, связанная с прямохождением. Свод действует как рессора, смягчая удары и толчки при ходьбе и беге, а также распределяя тяжесть при переноске грузов. Сводчатость стопы формируется только после 1 года, когда ребенок начинает ходить. Уплотнение свода стопы (*плоскостопие*) – одно из частых нарушений осанки, с которым необходимо бороться, поскольку оно ведет к повышенной утомляемости при ходьбе и беге, а также может спровоцировать искривление позвоночника в поясничном отделе.

Порядок и сроки окостенения свободных нижних конечностей, в целом, повторяют закономерности, характерные для верхних.

Рост и развитие скелетных мышц

Примерно 600 мышц, прикрепленных к костям, обеспечивают все перемещения и движения человека – от рефлекторных миганий и глотательных движений до виртуозных движений пальцев пианиста, рук теннисиста или кисти художника. Все эти мышцы имеют много общего в своем строении, хотя могут и весьма существенно различаться в зависимости от той конкретной функции, которую они выполняют. Так или иначе, все скелетные мышцы состоят из однотипных клеток, которые ввиду своей удлиненной веретенообразной формы называют *мышечным волокном*. Скелетные мышцы наряду с нервными структурами относятся к возбудимым тканям, составляющие их клетки – наиболее сложно устроенные в организме человека. С этим связано то обстоятельство, что мышечная ткань проходит очень долгий и многоступенчатый путь возрастного развития, претерпевая на этом пути несколько кардинальных перестроек. Двигательные возможности ребенка определяются уровнем развития функциональных возможностей скелетных мышц.

Мышечное волокно

Основной структурно-функциональной единицей скелетных мышц является мышечное волокно. Это очень большое вытянутое многоядерное образование длиной в несколько сантиметров, при поперечнике порядка 100 мкм (1/10 мм). Размер мышечного волокна в десятки тысяч раз больше

средней по величине клетки. На продольном срезе мышечного волокна под микроскопом видна поперечная исчерченность, которая определяется тем, что его внутренние структуры периодически (через каждые 2–2,5 мкм) многократно повторяются. Помимо скелетной мускулатуры, подобные гигантские *поперечно-полосатые* волокна составляют мышечную ткань сердца и некоторых внутренних органов.

Под микроскопом можно также обнаружить мелкие клетки–сателлиты, прилегающие к многоядерным мышечным волокнам. Эти клетки в определенных условиях быстро многократно делятся, принимая участие в процессах развития мышечной ткани и регенерации мышечного волокна после травм.

Несмотря на огромные размеры, мышечное волокно обладает очень многими, характерными для обычной клетки физиологическими и биохимическими механизмами. Так, мышечное волокно способно генерировать, как и нервные клетки, распространяющиеся потенциалы действия. В месте контакта волокна с окончаниями двигательных нервов образуются синапсы. Митохондриальный аппарат и цитоплазматические ферментные комплексы поддерживают энергообеспечение мышечного волокна, обеспечивая в случае необходимости интенсивность энергопотоков, в десятки раз превышающих уровень покоя.

Типология мышечных волокон. Мышечные волокна, входящие в состав скелетных мышц, бывают очень разные и отличаются друг от друга по многим характеристикам. Чаще всего их подразделяют на два типа в зависимости от свойств главного сократительного белка миозина.

Волокна I типа содержат "медленный" миозин. Это сравнительно тонкие волокна с большим содержанием митохондрий и миоглобина (аналог гемоглобина, содержащийся в самих мышечных волокнах), поэтому они имеют красный цвет и их называют еще "красные". В этих волокнах преобладает аэробная энергетика, наиболее экономичная, но зависящая от доставки кислорода. Эти волокна малоутомляемы и обеспечивают мышечную выносливость.

Волокна II типа содержат "быстрый" миозин. Они могут быть в 2 раза толще волокон I типа. Этот тип подразделяется на подтипы IIА и IIВ.

Волокна типа IIВ содержат много АТФ и креатинфосфата в цитоплазме, но мало митохондрий и миоглобина, поэтому их называют "белые". Их энергетика базируется главным образом на анаэробных гликолитических процессах. Они в гораздо меньшей степени зависят от доставки кислорода, но быстро утомляются при нагрузке. Именно эти волокна определяют важнейшее качество – силу.

Волокна типа IIА характеризуются промежуточными свойствами между типом I и подтипом IIВ. Эти промежуточные волокна характеризуются смешанной энергетикой, в которой примерно поровну представлены механизмы митохондриального окисления и анаэробного гликолиза. Размер таких волокон также промежуточный – средний между типами I и IIВ (площадь поперечного сечения – 2500–3500 ммк²). Эти

волокна являются наиболее универсальными, адаптивными, а в процессе движений человека обеспечивают быстроту.

Двигательная единица. Группу (обычно несколько десятков) однотипных мышечных волокон снабжает управляющей информацией один нейрон, расположенный в спинном мозге. Такая нервная клетка, управляющая двигательными функциями, называется *мотонейрон*, а вместе с теми мышечными волокнами, которые ей подчинены, она составляет *двигательную единицу*. Это – элементарная единица морфофункционального устройства скелетных мышц. Волокна I типа, которые относятся к “медленным”, иннервируются “медленными” мотонейронами, волокна II типа – “быстрыми”. В составе каждой двигательной единицы все волокна – одного типа.

Только в редких случаях скелетные мышцы взрослых млекопитающих и человека состоят из однородных двигательных единиц и, соответственно, однотипных мышечных волокон. Наиболее известный пример – камбаловидная мышца (*m. soleus*), состоящая в основном из медленных волокон. Подавляющее большинство мышц являются смешанными, состоящими из волокон I и II типов в различных пропорциях. Соотношения типов волокон достаточно устойчивы и определяются генетическими факторами. От этого состава зависит, например, успешность человека в том или ином виде спорта и другой деятельности, где успех определяется возможностями мышц.

Между тем, генетическое предопределение состава смешанных скелетных мышц человека формируется только к 16-17 годам. До этого периода мышцы находятся в стадии развития, по ходу которого их волоконный состав неоднократно меняется на основе общебиологических закономерностей онтогенеза, порой временно противоречащих генетическому коду. Это является следствием последовательной, постепенной реализации наследственной информации, записанной в виде генетического кода в молекулах ДНК. Когда все стадии развития остались позади (обычно – после завершения полового созревания), ткань приобретает окончательный, дефинитивный вид и функциональные возможности,

Онтогенез мышечных волокон

Дифференцировка скелетных мышц – сложный многоэтапный процесс, в котором уровень дефинитивной (зрелой) организации мышечных структур достигается только после завершения полового созревания. В процессе онтогенеза развиваются не отдельные мышечные волокна, а суперструктуры – двигательные единицы, в которых изменения состояния мышечных волокон определяется, в первую очередь, развитием соответствующих мотонейронов.

Эмбриональный период. Формирование мышечной ткани начинается на 4–6 неделе внутриутробного развития. В это время формируются так называемые миотрубки – первичные мышечные волокна. Несколько позже в мышцы прорастают длинные отростки (аксоны) мотонейронов спинного

мозга. С этой стадии начинается синхронное формирование нервно-мышечного аппарата, причем основные индуктивные влияния осуществляются нервными элементами. Процессы дифференциации (то есть появление разных типов) мышечных волокон связаны в первую очередь с развитием мотонейронов спинного мозга. Это происходит на 6–7 месяце внутриутробной жизни, и ребенок рождается с мышцами, уже частично прошедшими этап первичной дифференцировки.

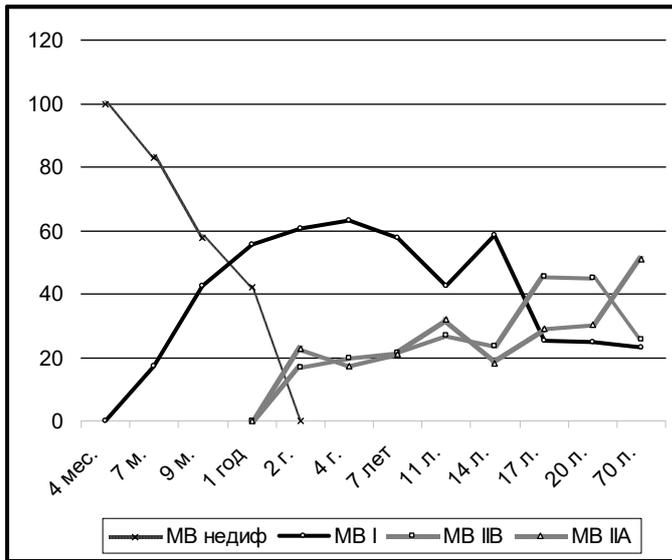
Постнатальное развитие. К моменту рождения количество волокон, включившихся в первый этап дифференциации, составляет в среднем 43%. Дифференцировочные процессы резко усиливаются в возрасте от 1 до 2 лет. К концу этого срока уже можно выделить волокна с "быстрым" миозином (например, в четырехглавой мышце бедра их 15%), – с "медленным" (61%) и с "промежуточным" (24 %).

В возрасте от 5 до 10 лет в соотношениях между волокнами различного типа устанавливается относительная стабильность, но затем в возрасте 11–12 лет наступает волна препубертатных перестроек. Это проявляется в увеличении числа волокон с "быстрым" миозином (тип IIВ).

В пубертатный период развитие мышечных волокон проходит в 2 фазы. Первая приходится на возраст 14 лет, когда наблюдается временное увеличение относительного количества волокон I типа. На этом этапе все мышечные структуры резко увеличивают темпы роста.

Вторая фаза пубертатных перестроек существенно меняет направление процессов. Окислительные возможности мышечной ткани и относительное количество волокон I типа снижаются. В 17–18 лет устанавливается дефинитивное, характерное для взрослых, соотношение мышечных волокон разного типа. К этому возрасту достигают уровня взрослых и поперечные размеры мышечных волокон.

Старение (70 лет и старше) приводит к значительным изменениям мышечных структур. К этому возрасту снижается число "сильных" волокон типа IIВ и более половины объема мышцы представляют наиболее универсальные промежуточные волокна типа IIА.



*Рис. 16. Возрастные изменения соотношения различных типов мышечных волокон четырехглавой мышцы бедра человека.
 По оси абсцисс - возраст от 4 месяцев внутриутробного развития до 70 лет.
 По оси ординат - доля волокон (%): MB недифференцированные, MB I, MB IIA, MB IIB.*

Дифференцировка мышц в период полового созревания

Дифференциация скелетных мышц до недавнего времени рассматривалась как одномоментный процесс, когда на определенный период внутриутробного развития приходится начало развития волокон всех типов.

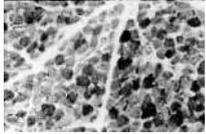
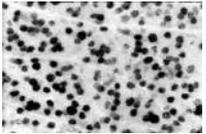
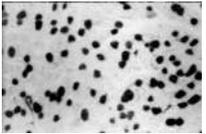
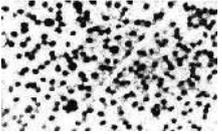
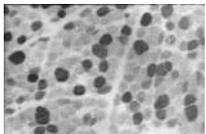
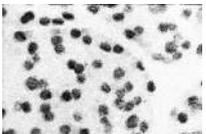
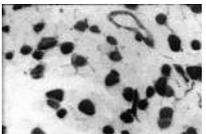
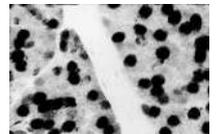
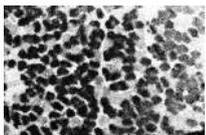
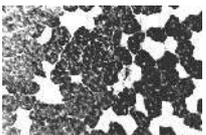
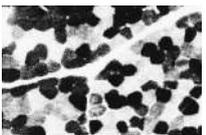
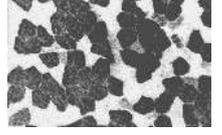
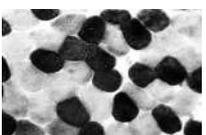
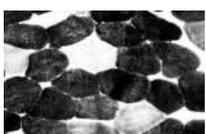
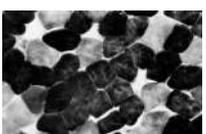
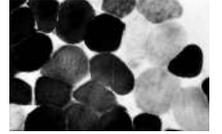
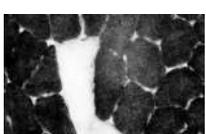
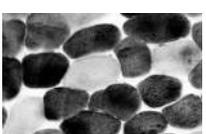
Возраст	m. soleus	m. biceps	m. triceps	m. quadriceps femori
Новорожденный				
1 год				
4 года				
7 лет				
14 лет				
17 лет				

Рис. 17. Гистохимическая картина (активность актомиозиновой АТФ-азы при кислой преинкубации) на поперечных срезах скелетных мышц мальчиков разного возраста (Р.В.Тамбовцева)

Сильно окрашенные волокна – I тип; умеренно окрашенные – IIА тип; не окрашенные – IIВ тип

Результаты новейших исследований показывают, что на самом деле - это сложный, растянутый во времени процесс. Вначале образуются недифференцированные структуры, на основе которых в дальнейшем развиваются медленные волокна I типа, и лишь спустя некоторое время начинается формирование волокон с "быстрым" миозином, с последующим образованием из них специализированных структур типа IIВ.

Развитие всех специализированных мышечных структур начинается с образования волокон с "промежуточным" миозином. В ходе дифференцировки смешанных мышц прослеживаются три волны перестроек состава волокон.

Первая волна начинается, когда в небольшой части мышечных волокон "эмбриональный" миозин преобразуется сначала в "промежуточный", а затем в "медленный". В дальнейшем в этих структурах все больше активизируется

окислительная энергетика и они превращаются в волокна I типа. Популяция этих волокон представляется достаточно устойчивой и в другие типы, по-видимому, не переходит.

Вторая волна перестроек захватывает все остальные мышечные волокна, и также начинается с перехода "эмбрионального" миозина в "промежуточный". В дальнейшем часть этих волокон получает "быстрый" миозин, остальные остаются в виде промежуточных волокон, сохраняя возможности перехода в быструю форму. Сформировавшаяся таким образом популяция волокон II типа, уже в период первого детства, отчетливо разделяется на IIА и IIВ типы, однако на дальнейшую устойчивость существования этих структур влияют процессы полового созревания.

Третья волна перестроек связана с пубертатными процессами. У человека пубертатные перестройки затрагивают не только волокна II, но и I типов. При этом в первую фазу пубертатных преобразований значительно увеличивается окислительный потенциал всех мышечных структур вплоть до увеличения относительного количества волокон I типа. Наступление второй фазы характеризуется общим снижением активности окислительных ферментов и увеличением количества волокон с преобладанием анаэробной энергетика до уровня, свойственного взрослым. Таким образом, только на второй фазе пубертатного процесса стирается детский тип организации мышечных волокон, при котором еще остается незавершенной специализация энергетических механизмов, и формируется дефинитивная энергетика и композиция волоконного состава смешанных мышц.

Роль половых гормонов

Во второй фазе пубертатных перестроек у мальчиков большую роль играют мужские половые гормоны. В эксперименте на животных показано, что при их дефиците сохраняется большое количество промежуточных волокон типа IIА, в то время как дополнительное введение тестостерона активирует переход промежуточных структур в волокна типа IIВ и значительно увеличивает активность ферментов анаэробного гликолиза, а также интенсивность ростовых процессов в мышцах.

Раньше в научной литературе преобладала такая схема онтогенетического развития скелетно-мышечной ткани, согласно которой установившаяся в самом начале процесса развития организация волоконного состава мышц отражает базовые конституциональные особенности организма и устойчиво поддерживается в ходе дальнейшего онтогенеза, включая и зрелый возраст, до появления старческих изменений. На этом, в частности, настаивал известный спортивный морфолог В.В.Язвиков.

Однако данные, полученные Р.В.Тамбовцевой (1990, 2002), показывают, что в ходе индивидуального развития молодые мышечные волокна, потеряв эмбриональную организацию, проходят целый ряд последовательных изменений. Окончательный спектр мышечных волокон устанавливается только после завершения пубертатного процесса. Такие последовательные дискретные перестройки клеточных структур,

проявляющиеся в ходе их развития и специализации, можно обозначить как передифференцировки.

Необходимо отметить, что каждая волна таких передифференцировок, а их в ходе постнатального развития мышц по крайней мере три, начинается с появления или нарастания относительного количества промежуточных волокон. Эти структуры в ходе развития изменяются, все больше приближаясь к типу ПА. Все это позволяет рассматривать промежуточное волокно как адаптивную структуру с незавершившимися потенциями развития. При этом конечными представляются волокна типов I, IS ("Гигантские" тонические, их очень мало и они встречаются только в крупных мышцах, обеспечивающих поддержание позы) и ПВ. Вероятно, если переход между конечными типами в ходе онтогенеза или при адаптивных перестройках мышечной ткани, и возможен, то только через промежуточные структуры типа ПА.

Что касается смешанных мышц взрослых, то, по мнению большинства исследователей, соотношение числа мышечных волокон различного типа представляется достаточно постоянной величиной, характеризующей индивидуальные особенности организации периферического двигательного звена. В свое время положение об устойчивости волоконного состава смешанных мышц было сформулировано известным спортивным физиологом и биохимиком П.Гольником [Gollnick et al., 1973], и с тех пор считается прочно устоявшимся в физиологии спорта. В то же время, различия волоконного состава мышц, установленные с использованием метода биопсии у спортсменов разной специализации (особенно при сопоставлениях бегунов на короткие и длинные дистанции), еще не дают возможности утверждать, что эти различия были исходными - не исключена возможность того, что они возникли в ходе адаптации к соответствующим специализированным тренировочным нагрузкам.

Этапы развития скелетных мышц.

Онтогенез смешанных мышц можно разделить на несколько возрастных этапов, практически равномерно распределенных по шкале времени, если она представлена в логарифмическом масштабе:

1. Формирование миотрубки (начального волокна). В период эмбрионального развития из миотрубки структурируются однородные недифференцированные мышечные волокна с "эмбриональным" миозином и полинейрональной иннервацией.

2. Становление нервно-мышечных единиц. В части мышечных волокон "эмбриональный" миозин заменяется "промежуточным", в последующем из них формируются волокна I типа с "медленным" миозином. У человека этот период начинается на 5-6 месяце внутриутробной жизни и завершается, по видимому, в возрасте 13-15 месяцев.

3. Дифференцировка первичных волокон. В остальных мышечных волокнах начинают формироваться волокна II типа, сначала с "промежуточным", а затем и с "быстрым" миозином. Формирование

нейромоторных единиц с волокнами типа ПА и ПВ завершается к возрасту 4-5 лет.

4. Дифференцировка волокон II типа. На следующем этапе развития начинает перестраиваться креатинкиназная система мышечных волокон, что приводит к стабилизации мышечной энергетики. У человека соответствующие изменения происходят в возрасте 4-6 лет на фоне полуростового скачка, завершение этого этапа является одним из показателей школьной зрелости.

5. Предпубертатная передифференцировка. Возраст 6-11 лет является относительно устойчивым периодом с постепенным увеличением рабочих (особенно аэробных) возможностей двигательной системы. Этот период завершается передифференцировкой, которая ведет к активизации анаэробной энергопродукции.

6. 1-я пубертатная (гипофизарная) передифференцировка. У подростков-мальчиков это возраст 12-15 (чаще всего – 14) лет (в зависимости от индивидуальных темпов развития). На этом этапе происходит изменение волоконной композиции смешанных мышц с кратковременным увеличением доли волокон с "медленным" или "промежуточным" миозином, а также ускорение скорости роста волокон II типа.

7. 2-я пубертатная (тестикулярная) передифференцировка. У юношей после 15 лет начинается формирование мышечных волокон дефинитивной организации и их усиленный рост. Для этого этапа характерно значительное увеличение доли и размера волокон типа ПВ в смешанных мышцах конечностей.

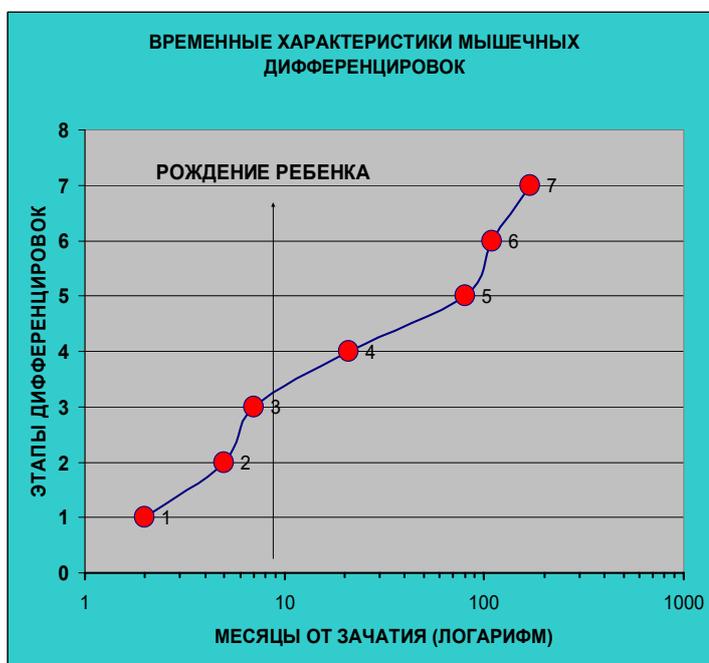


Рис. 18. Схема последовательности этапов дифференцировочных процессов в скелетных мышцах человека (шкала времени – логарифмическая). Пояснения в тексте.

Таким образом, у человека по крайней мере 4 цикла передифференцировок (то есть более половины) происходят в постнатальный период развития.

Ряд последовательных передифференцировок, очень схожих по своим проявлениям у животных и человека, свидетельствуют о наличии общих закономерностей развития скелетных мышц в постнатальном онтогенезе. Внутренний механизм, обуславливающий их периодические проявления, остается неясным. Очевидно, что немалую роль в этом играют возрастные изменения мотонейронов спинного мозга, осуществляющих трофические влияния на соответствующие ДЕ.

В период от 7 до 17 лет объем «окислительных» волокон I типа увеличивается в 1,4 раза; объем «промежуточных» волокон типа IIА – в 3,14 раза; объем наиболее сильных, «гликолитических» волокон типа IIВ – в 10 раз. Таким образом, к 17-18 годам складывается дефинитивная картина, которая характеризуется преобладанием анаэробно-гликолитических волокон в общей структуре мышечной ткани мужчин (у женщин преобладают промежуточные волокна типа IIА). По-видимому, такая структура мышц сохраняется до начала инволютивных процессов старения. К старческому возрасту уменьшается как доля окислительных волокон, так и количество волокон типа IIВ, на смену им приходят, главным образом, полифункциональные волокна типа IIА.

Динамика роста скелетных мышц

Динамика роста скелетных мышц в онтогенезе значительно отличается от других тканей. Если большинство из них по мере развития снижает темпы роста, то у мышц максимальная скорость роста приходится на заключительный пубертатный скачок роста. В то время как, например, относительная масса мозга у человека от рождения до взрослого состояния снижается с 10 % до 2 %, относительная масса мышц возрастает с 22 % до 40 %.

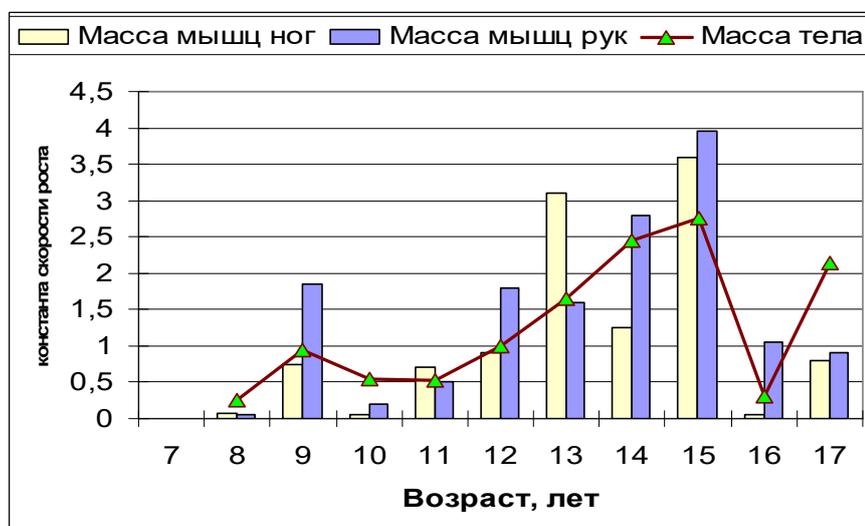


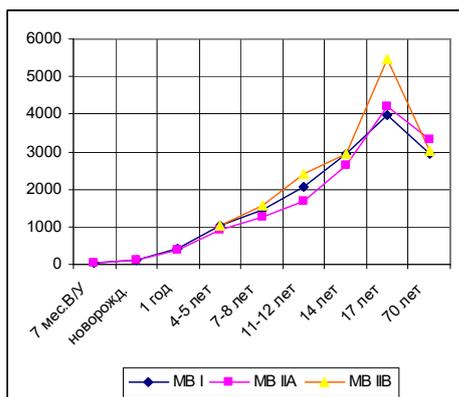
Рис. 19. Скорость роста массы тела и мышц верхних и нижних конечностей

На рис. 19 показаны константы скорости роста мышц верхних и нижних конечностей у мальчиков 6–17 лет. В возрасте 6–7 лет мышцы верхних и нижних конечностей растут относительно медленно. В возрастном интервале 8–9 лет скорости роста увеличиваются. Это относится в особенности к мускулатуре рук. Затем, в возрасте 10–11 лет интенсивность ростовых процессов резко понижается. На 12-летний возраст приходится увеличение скорости роста мышц рук (пубертатный рост начинается с верхних конечностей). В 12–13 лет интенсивно растет мускулатура ног. В интервале 13–14 лет опять торможение роста, явно связанное с первой фазой пубертатных дифференцировок мышечных волокон. Вторая фаза этого процесса приходится на 16 лет, когда вновь тормозится скорость роста. На рис. приведена и динамика константы скорости роста массы тела обследованных. Видно, что она в значительной степени отражает изменения мышечной массы.

Не менее примечательно и увеличение поперечного сечения мышечных волокон, представленное на рис. 20. Плавно увеличиваясь в детском возрасте, этот показатель у мальчиков резко возрастает от 14 до 17 лет, то есть с окончанием полового созревания – очевидно, под анаболическим действием мужских половых гормонов.

В процессе старения скелетные мышцы уменьшаются в объеме главным образом за счет снижения толщины отдельных мышечных волокон, а также в результате значительного снижения доли самых толстых и мощных волокон типа IIВ. Именно поэтому с возрастом снижаются мышечная сила и быстрота, тогда как выносливость страдает в меньшей степени. У мужчин снижение массы мышц в старости проявляется сильнее, чем у женщин, что связано с особенностями гормонального фона женского и мужского стареющего организма.

а



б

б

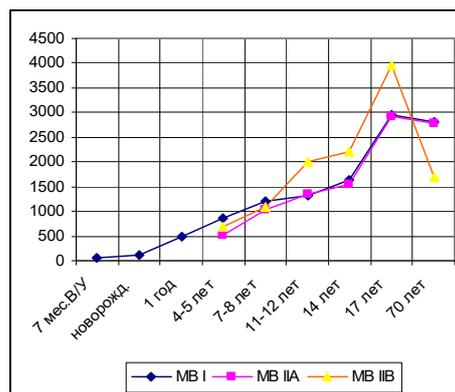
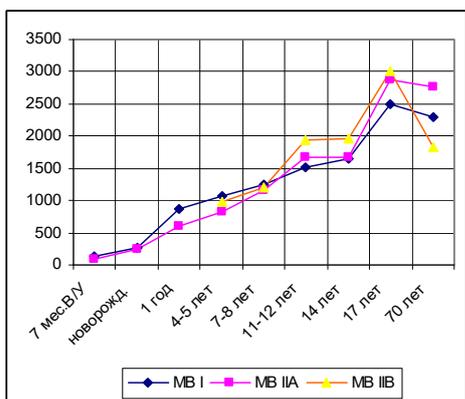


Рис. 20

Динамика роста площади поперечного сечения МВІ, МВІІА, МВІІВ четырехглавой мышцы бедра (а), двуглавой (б) и трехглавой (в) мышц плеча у представителей мужского пола от 7 месяцев внутриутробного развития до 70 лет.

По оси абсцисс – возраст от 7 месяцев



внутриутробного развития до 70 лет.
По оси ординат – площадь поперечного сечения МВ I, МВ IIA, МВ IIB (мкм²).

РАЗДЕЛ 3. ОНТОГЕНЕЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ В СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦАХ

Биохимические исследования энергетики скелетных мышц

Наряду с возрастными изменениями волоконного состава скелетных мышц, и отчасти в результате этого процесса, происходит изменение активности узловых ферментов энергетического метаболизма, от которых, в конечном счете, зависит сила мышц, их выносливость и способность выполнять большой объем работы. Большая часть биохимических исследований ткани скелетных мышц в онтогенезе проведено на лабораторных животных, поскольку чтобы провести анализ химического состава мышцы ее надо извлечь из организма – например, методом игольчатой биопсии. Однако, это очень болезненная процедура, и ее применение допустимо лишь к больным людям с диагностическими целями или профессиональным спортсменам с их согласия. На детях такие исследования крайне редки. Выше уже упоминались полученные таким методом данные шведского исследователя Б.Эрикссона, который показал примерно 2-кратное увеличение активности фосфофруктокиназы – одного из ключевых ферментов анаэробного гликолиза в возрасте 12 лет. Примечательные данные по содержанию митохондрий в бедренной мышце были получены в лаборатории И.А.Корниенко (Рис.21). Однако наиболее подробно биохимические изменения были изучены В.И.Дёминым в лаборатории И.А.Корниенко на лабораторных крысах. Поскольку между человеком и крысой много сходства в динамике развития, можно выделить аналогичные возрастные этапы (например, гнездовой = младенческий, игровой = второе детству у человека, подростковый период, период полового созревания), то и данные биохимических исследований скелетных мышц могут быть вполне распространены на онтогенез человека.



Рис. 21. Электронные микрофотографии продольных срезов мышечных волокон ребенка (слева) и взрослого мужчины (справа)

Многочисленные данные возрастной физиологии и биохимии свидетельствуют о неравномерном развитии аэробного и обоих анаэробных (анаэробного гликолитического и фосфагенного) источников, причем такая гетерохрония определяет качественное своеобразие энергетики скелетных мышц на отдельных этапах онтогенеза.

Аэробный (окислительный) источник

Возможности аэробного (окислительного) источника энергии в скелетных мышцах существенно меняются в ходе индивидуального развития. Это обусловлено как изменением содержания важнейших окислительных ферментов в ткани скелетных мышц, так и изменением структуры дыхательной цепи митохондрий.

Дыхательная цепь митохондрий представляет собой цепочку последовательно соединенных ферментов, расположенных на внутренней мембране митохондрии. По этой цепочке шаг за шагом передается электрон, который на последнем (терминальном) участке цепи передается атому кислорода – это и есть процесс окисления, в результате которого выделяется большое количество энергии, запасаемой в виде АТФ. Терминальный участок дыхательной цепи митохондрии представляет собой комплекс ферментов, который называется «цитохром **a**». Возрастная динамика содержания цитохрома **a** в скелетных мышцах человека представлена в табл. 3. Здесь же приведены данные о расчетной величине удельного (на 1 кг массы скелетных мышц) МПК. Как видно из представленных данных, наивысшая концентрация цитохрома **a** зарегистрирована в мышцах мальчиков 9-11 лет. Аэробная мощность скелетных мышц существенно увеличивается вплоть до начала полового созревания. В дальнейшем она не только не увеличивается, но даже несколько снижается. Это подтверждается и данными электронно - микроскопических исследований: количество митохондрий по отношению к площади миофибрилл достигает максимума в препубертатный и раннепубертатный период, а затем снижается.

Примечательно, что капиллярная сеть в мышцах конечностей оказывается наиболее развитой у детей 9-11 лет, т.е. в том же возрасте, когда в мышечной ткани наблюдается наивысшее содержание окислительных ферментов. Известный физиолог А.А.Гуминский, который много занимался исследованиями физиологии юных футболистов, считал именно этот возраст «золотым периодом детства», поскольку в этом возрасте прекрасный уровень развития всех двигательных качеств сочетается с особенно мощной аэробной способностью организма.

Таблица 3

Возрастные изменения содержания цитохрома **a** в бедренной мышце и аэробных возможностей человека [по: Корниенко. 1979]

Возраст, лет	Концентрация цитохрома a , нМ/г мышц	Масса мышц, кг	МПК, л/мин	МПК, мл/кг массы мышц
Новорожденный	0,9	0,6	-	-
5 – 7	4,6	6,7	1,01	151
9	5,2	10,5	1,8	171
11	6,6	11,6	2,1	181
14	4,8	21,2	3,5	165
20	4,5	25,0	4,1	164
36-40	3,7	28,3	3,9	138

Таким образом, возрастное развитие аэробного источника энергопродукции в скелетных мышцах протекает не монотонно, а проходит через выраженный максимум в препубертатном возрасте. Это обстоятельство самым существенным образом влияет на функционирование всей системы энергетического обеспечения мышечной деятельности.

Данные о возрастных изменениях субстратного обеспечения энергетического обмена в литературе единичны. По-видимому, в раннем детском возрасте важнейшим субстратом окисления как в покое, так и при физической работе, являются жирные кислоты – благодаря мобильности и практической неисчерпаемости жировых депо. После полового созревания в субстратном обеспечении митохондриального окисления при осуществлении двигательной активности используется преимущественно глюкоза, получаемая мышцами главным образом за счет утилизации собственных ресурсов гликогена.

Косвенным, но достаточно убедительным подтверждением этому, является выявленная в лаборатории И.А.Корниенко возрастная перестройка структуры дыхательной цепи митохондрий в мышцах крысы. До начала

полового созревания отношение концентраций цитохромов $\frac{b}{a}$ в бедренной мышце самцов крыс линии Вистар составляет около 1,5, тогда как с началом полового созревания (40-й день) резко снижается и в дальнейшем не превышает 1,0. Высокое соотношение $\frac{b}{a}$ может означать наличие своеобразного Q-цикла окисления жирных кислот. Снижение этого отношения с возрастом совпадает по времени с активизацией гликолитических процессов. Иными словами, с началом полового созревания происходит не только изменение энергетики скелетных мышц, но и их питание становится совершенно иным – соответствующим новому энергетическому порядку.

Большое число работ, охватывающих широкий возрастной диапазон – от 3-4 лет до 70 и старше, – посвящено исследованию возрастных изменений важнейшего показателя аэробной производительности – максимального потребления кислорода (МПК). При этом все исследователи отмечают увеличение абсолютных величин МПК к моменту полового созревания, после чего при отсутствии высокой двигательной активности (тренировка, особенно направленная на развитие выносливости, способствует продолжению роста МПК) начинается медленное, но закономерное снижение показателя. Однако является ли такое возрастное изменение абсолютной величины МПК отражением повышения аэробных возможностей от детского к юношескому возрасту? Разумеется, нет, поскольку рост абсолютной величины МПК просто пропорционален увеличению массы тела и, соответственно, скелетных мышц.

Характер возрастной динамики относительного (на 1 кг веса тела) МПК описывается разными авторами не одинаково, хотя большинство сходится на том, что уже у подростков величины относительного МПК не уступают таковым у взрослых нетренированных людей. Таким образом, максимальная аэробная мощность организма, если ее рассчитывать на единицу веса тела, остается практически постоянной на протяжении длительного времени – от 6-8 до 40 лет.

Высокая способность мышц детей младшего школьного возраста к потреблению кислорода проявляется в ряде функциональных особенностей, обнаруживаемых при мышечной работе. Так, по данным Р.-О. Astrand, у детей никогда не бывает столь больших величин кислородного долга, какие отмечаются у взрослых при тяжелой мышечной работе (ступенчато возрастающая нагрузка до достижения МПК). К аналогичным выводам приходит и Я.А. Эголинский, который показал, что у юношей по сравнению с подростками увеличивается доля кислородного долга в общем кислородном запросе при работе в зонах большой и умеренной мощности.

Меньший кислородный долг у детей может говорить, с одной стороны, о меньших анаэробных возможностях детей, но с другой – о том, что окислительные системы мышц справляются с предложенной нагрузкой, и поэтому активизация анаэробных источников просто не нужна. Последнее утверждение может быть подкреплено прямыми доказательствами: содержание молочной кислоты в крови у детей младшего школьного возраста

при достижении МПК поднимается до 80 мг%, а у 10-11-летних - до 84 мг%, тогда как у взрослых - до 112-126 мг%. Точно так же, по данным А.З.Колчинской [57], максимальная концентрация молочной кислоты в крови достигает у детей 7-9 лет 9 ммоль/л, а уже у подростков 14-15 лет увеличивается до 12 ммоль/л. Следовательно, на уровне максимальной аэробной производительности структура энергообеспечения в детском организме сдвинута в сторону аэробного процесса. С учетом того, что относительные величины МПК у детей и взрослых не различаются, это свидетельствует о том, что окислительные системы в детском организме работают весьма эффективно. Так что всякие утверждения, будто дети «слабые, потому что маленькие» - беспочвенны: в части аэробных возможностей скелетных мышц они ничуть не уступают взрослым и даже превышают по некоторым показателям. Другое дело, что для реализации высокой работоспособности одних аэробных способностей мышц недостаточно, однако эти аспекты мы будем обсуждать позже.

Поскольку у детей меньше кислородный долг, то и восстанавливаются они быстрее. и это неоднократно. иногда с удивлением, отмечали разные исследователи. Современные методы также позволяют подтвердить, что скорость восстановительных процессов после повторных супрамаксимальных (то есть выше МПК) нагрузок у детей выше, и благодаря этому у них отмечаются меньшие сдвиги кислотно-основного равновесия в восстановительный период, чем у взрослых. То есть на самом деле, детский организм, так сказать «от природы», значительно лучше приспособлен к высокой двигательной активности, чем взрослый.

Если мощность нагрузки оказывается большей, чем возможности аэробного источника энергии, для обеспечения мышечной деятельности привлекаются дополнительные источники: активация анаэробного гликолиза или использование резервов креатинфосфата. Мощность работы, при которой включается анаэробно-гликолитическое энергообеспечение, обозначают как «анаэробный порог» (АП), или «порог анаэробного обмена». У взрослых нетренированных людей АП достигается при нагрузке, соответствующей примерно 50% МПК и вызывающей увеличение частоты сокращений сердца свыше 130 уд/мин. А вот у детей с их более развитой аэробной энергетикой, АП наступает при нагрузках 75-80% МПК и пульсе 170 уд/мин или даже выше. С началом полового созревания, когда мышцы становятся более «анаэробными», уровень АП снижается, и уже у 16-17-летних юношей он такой же, как у взрослых.

Для обеспечения наиболее полного снабжения работающих мышц кислородом в организме детей также имеется ряд приспособлений. Вот один из примеров такого рода. В крови человека имеется фермент карбоангидраза, которая разлагает содержащуюся в крови угольную кислоту (соединение CO_2 с H_2O). В результате этой реакции происходит образование иона H^+ , а повышение концентрации водородных ионов – это закисление. Такое закисление требуется в организме для того, чтобы увеличить скорость распада оксигемоглобина, который приносит кислород из легких к тканям.

Так вот, по данным В.Е.Кальницкой, активность карбоангидразы крови у детей младшего школьного возраста выше, чем у подростков, а у последних, в свою очередь, выше чем у юношей. Почему с возрастом активность этого фермента снижается? Да потому, что требуемое закисление у подростков и, особенно, юношей достигается другим путем – за счет активности анаэробного гликолиза и выхода в кровь большого количества лактата. А у детей младшего возраста лактат практически не образуется. и без карбоангидразы их мышцы не получали бы достаточного количества кислорода.

Даже капиллярная сеть в мышцах у детей более разветвлена, чем у юношей и взрослых, что создает благоприятные условия для диффузии кислорода из крови в мышечную ткань. В литературе имеются указания на то, что прекращение развития капиллярной сети может быть обусловлено влиянием тестостерона.

Адекватным показателем активности окислительных систем, как известно, является интенсивность кровотока. Интересны данные Г.А.Марковской, которая с помощью ацетиленового метода при работе субмаксимальной мощности получила для детей величину минутного объема кровообращения 540 мл/кг*мин, для подростков 13-14 лет - 468-506 мл/кг*мин, а для взрослых - 420 мл/кг*мин. Сходные результаты приводит А.З. Колчинская: очень интенсивный кровоток при выполнении циклической нагрузки большой мощности наблюдается у детей 8-9 лет (550 мл/кг*мин), к подростковому возрасту его интенсивность немного снижается (500 мл/кг*мин) и резко падает у взрослых (380 мл/кг*мин). В дальнейшем эти результаты были подтверждены другими исследователями. Очевидно, что такая высокая интенсивность кровотока возможна только благодаря относительно большему размеру сердца у детей и относительно большему у них просвету кровеносных сосудов. Таким образом, не только мышцы, но и система кровообращения у детей прекрасно приспособлена к выполнению физических нагрузок.

Дыхательная функция крови также не накладывает ограничений на способность детей активно использовать аэробные механизмы для энергообеспечения мышечной работы. Кислородная емкость крови уже в 5-6 лет практически не отличается от величин, характерных для взрослых.

И наконец, у детей младшего школьного возраста отмечается более значительная артерио-венозная разница по напряжению кислорода при мышечной работе. Это – важнейший показатель активности тканевого дыхания. Чем больше разница в содержании кислорода между артериальной кровью и венозной, тем более активны процессы тканевого окисления. Раз этот показатель у детей выше, значит и окисление в их мышцах протекает более интенсивно. Совершенно ясно, что это прекрасно согласуется со всеми остальными данными, которые мы здесь рассматривали до сих пор: лучшие условия диффузии, повышенная интенсивность кровотока, большая активность карбоангидразы и большая мощность тканевых окислительных систем, то есть мышечных митохондрий.

Таким образом, в возрастном интервале от 7 до 17 лет, когда происходят очевидные и существенные изменения физических возможностей растущего организма, возрастная динамика параметров, характеризующих **мощность** аэробного механизма энергообеспечения (МПК, АП), выражена слабо и не способна объяснить многократное увеличение с возрастом реальной работоспособности. При этом стабильность относительных величин МПК после 6-7 лет хорошо согласуется с данными о содержании и активности окислительных ферментов в скелетных мышцах, а также с физиологическими данными о высокой способности кардиореспираторной системы детей младшего школьного возраста адекватно снабжать работающие мышцы кислородом и субстратами.

Анаэробно-гликолитический (лактацидный) источник

Широко распространено заблуждение, что анаэробный гликолиз включается в энергетическое обеспечение мышечной работы тогда, когда мышцам не хватает кислорода. Действительно, если создать местную ишемию мышечной ткани (например, крепко перевязав руку или ногу, чтобы уменьшить кровоток), либо поместить человека в атмосферу, содержащую малое количество кислорода (как в высокогорье), то у организма не будет выбора, и он станет использовать анаэробный гликолиз для получения энергии, поскольку снабжение тканей кислородом в этих случаях затруднено. Однако в обычных условиях, когда человек бежит по дистанции или вращает педали велоэргометра, никаких искусственных ограничений подачи кислорода нет, тем не менее при определенной мощности нагрузки анаэробный гликолиз резко активизируется (такая мощность называется анаэробный порог). Эта мощность еще далека от критической, при которой скорость потребления кислорода становится максимальной и больше увеличиваться не может. У нетренированного человека или тренирующегося на силу и быстроту мощность АП составляет около 50-60% от уровня МПК. Значит, потребление кислорода еще можно существенно наращивать, а анаэробные процессы уже включились. Зачем? А затем, чтобы создать некоторый, небольшой уровень закисления в работающих мышцах. Это будет способствовать, как мы уже говорили выше, ускорению диссоциации оксигемоглобина, то есть улучшит кислородное снабжение работающих мышц. Таким образом, анаэробный гликолиз способствует активизации аэробного процесса. В этом – глубокая мудрость Природы, и это один из наглядных примеров системного решения проблемы.

Если же нагрузка становится выше критической мощности, то мышцам приходится все в большей степени использовать ресурсы анаэробного гликолиза, поскольку аэробное окисление уже достигло своего предела и не способно покрывать возрастающий энергетический запрос сократительных структур. На уровне МПК примерно 40% энергии образуется анаэробным путем; при нагрузке, в 3 раза выше критической мощности, практически 100% энергии образуется в мышцах в результате анаэробного гликолиза.

Почти весь потребляемый при этом кислород тратится на нужды головного мозга и внутренних органов. Правда, выдерживать такую нагрузку человек способен лишь около 40 секунд.

В 1971 г. шведские ученые, используя метод игольчатой биопсии, показали, что у нетренированных мальчиков в 12-летнем возрасте резко (в 2 раза) увеличивается активность фосфофруктокиназы. Это была первая работа, в которой были обнаружены возрастные изменения возможностей анаэробно-гликолитического источника у человека на тканевом уровне. В дальнейшем биохимическими, гистохимическими и физиологическими методами были получены многочисленные подтверждения резкой активации анаэробно-гликолитической энергопродукции в процессе пубертатных перестроек, особенно у мальчиков. В последние годы широкое распространение получил метод магниторезонансной спектроскопии, который также позволил подтвердить ранее полученные результаты.

Однако большая часть исследований выполнена на лабораторных животных. В онтогенезе крысы была детально прослежена активность одного из ключевых ферментов гликолиза – лактатдегидрогеназы (ЛДГ). Было показано, что суммарная активность разных фракций ЛДГ резко возрастает в пубертатный период и даже после его завершения. Следовательно, в процессе полового созревания происходит качественная перестройка организации энергетического обмена в скелетно-мышечных клетках: резкое расширение возможностей анаэробно-гликолитической энергопродукции на фоне стабилизации или даже некоторого снижения мощности аэробной энергопродукции.

Приведенные факты заставили предположить важную роль половых гормонов в регуляции мышечной энергетики. Прямые доказательства этой гипотезы были получены З.Т.Мусаевой в опытах на крысятах-самцах. Одну группу крысят кастрировали в возрасте 3 недель, другой группе вводили препарат тестостерона. Оказалось, что андрогенизация ускоряет, а кастрация замедляет созревание ферментных систем, ответственных за анаэробные механизмы производства энергии в скелетных мышцах, и при этом практически не влияет на состояние митохондриальной (аэробной) энергопродукции. Под воздействием экзогенного тестостерона в составе скелетных мышц конечностей существенно увеличивается доля мышечных волокон типа ПВ с высокой активностью АТФ-аз, т.е. тех, для которых характерно преимущественно анаэробно-гликолитическое энергообеспечение. Кастрация приводит к противоположным результатам.

Не меньшую роль мужские половые гормоны играют и в становлении морфо-функционального статуса скелетных мышц человека. Примечательно, что у девочек не выявлено такое же воздействие процессов полового созревания на структуру и функцию их скелетных мышц, что может объясняться различными структурно-метаболическими последствиями воздействия андрогенов и эстрогенов. При этом у мальчиков содержание тестостерона увеличивается 4-кратно на начальных стадиях полового созревания, а затем еще 20-кратно – на завершающих его этапах. У девочек

тестостерон возрастает только в 4 раза от начальных к конечным стадиям пубертата.

Как и в случае с аэробным энергообеспечением, развитие анаэробно-гликолитического механизма происходит системно, затрагивая порой самые неожиданные свойства и функции. Так, для гликолиза нужен субстрат – это гликоген, накопленный в мышцах. Объем депо гликогена в скелетных мышцах существенно возрастает в период между II детством (8-10 лет) и юношеским возрастом (17-19 лет). Одновременно увеличивается буферная емкость крови. Эти возрастные изменения обеспечивают повышение емкости анаэробно-гликолитического источника энергии, так как позволяют успешно компенсировать возникающее в результате его активации накопление лактата в крови и местное закисление.

Еще Р.-О. Astrand показал удвоение предельной концентрации лактата в крови у взрослых по сравнению с детьми 4-6 лет. По его данным, наиболее резкие приросты максимальной концентрации лактата в крови отмечаются в 7-9, 14-15 и 16-18 лет, что в дальнейшем было подтверждено многими исследователями. Очевидно, что эти данные отражают значительное, причем неравномерное, увеличение с возрастом активности анаэробного гликолиза.

В целом, современные представления о возрастном развитии мышечной энергетики сводятся к пониманию того факта, что дети и подростки имеют более низкий, чем взрослые, уровень гликолитической мощности, но зато обладают большей аэробной мощностью, что, в частности, позволяет им быстрее ресинтезировать АТФ и КрФ в восстановительном периоде.

К сожалению, не разработаны физиологические тесты, позволяющие оценить емкость анаэробно-гликолитического источника энергии. Наиболее корректным представлением этого параметра может служить медленная фракция максимального кислородного долга, которая существенно (в 4-5 раз) увеличивается от 7 до 17 лет.

Фосфагенный(алактатный) источник

Данные о возрастных изменениях активности креатинфосфокиназы (КрК) в мышцах человека в литературе пока отсутствуют. В последние годы, с развитием техники магниторезонансных исследований, появились данные о содержании КрФ в мышцах в условиях покоя, а также при выполнении физической нагрузки и в восстановительном периоде. Однако результаты таких измерений носят противоречивый характер.

В то же время, динамика этих показателей для различных тканей в онтогенезе крысы подробно изучена В.И. Деминим. Согласно его результатам, активность КрК в мышцах задних конечностей в гнездовой период жизни животных составляет 2,5 – 2,7 мкмоль/мин/г и практически не меняется в первые 2 недели жизни. С началом активной самостоятельной двигательной активности крысят активность КрК в мышцах ног начинает интенсивно увеличиваться, достигая к периоду полового созревания (60

дней) уровня 39 мкмоль/мин/г. Это – в 4,5 раза выше, чем в мышцах шеи и в сердце, в 12 раз выше, чем в ткани мозга, и в 50 раз выше, чем в печени.

За этот период содержание КрФ в мышцах увеличивается примерно в 3 раза, с 5,4 до 15,9 мкмоль/г (в сердце 60-дневной крысы содержание КрФ – 7,1 мкмоль/г; в мозге – 5,7 мкмоль/г; в печени – 2,43 мкмоль/г).

Содержание КрФ и активность КрК увеличиваются в скелетных мышцах с возрастом не синхронно, и это обуславливает возрастные различия в потенциальной длительности расходования запасов КрФ при максимальной активности актомиозиновых АТФ-аз. Наиболее существенное увеличение активности КрК наблюдается на завершающих этапах полового созревания, что обеспечивает значительное увеличение скорости образования АТФ в креатинкиназной реакции, то есть – мощности алактатной энергетической системы. В результате, согласно расчетам В.И.Демина, скорость образования АТФ в процессе креатинкиназной реакции в мышцах конечностей крысы увеличивается с 20 мкмоль/г/мин в возрасте 12 дней (крысенок в этом возрасте только ползает) до 80 мкмоль/г/мин в возрасте 40-45 дней (активная фаза полового созревания), а к моменту завершения пубертатных перестроек возрастает до 160 мкмоль/г/мин.

Приведенные факты показывают, что период полового созревания является своего рода "водоразделом" между двумя качественными состояниями энергетики скелетных мышц. До начала пубертатных перестроек в мышцах, как и в других тканях млекопитающих, превалирующую роль в энергообеспечении играет митохондриальное окисление. После завершения пубертатных процессов мышцы приобретают тот колоссальный функциональный диапазон и те специфические черты организации энергетического обмена, которые отличают их от других тканей взрослого организма, причем роль анаэробных источников энергии резко возрастает. Следует, однако, подчеркнуть, что половые различия в динамике энергетических возможностей скелетных мышц остаются недостаточно изученными как у лабораторных животных, так и у человека. Согласно данным ряда исследований, проведенных с применением современных методов, у девочек пре- и постпубертатного возраста столь значительные различия в структуре энергетического метаболизма при мышечной работе, как у мальчиков, не выявляются.

Возрастные этапы становления энергетики мышечной деятельности

Первый год жизни ребенка представляет собой период бурного становления мышечной функции и, разумеется, ее энергетического и вегетативного обеспечения. Этот этап продолжается до возраста 3 лет, после чего преобразования в мышцах тормозятся, и следующий этап начинается вместе с полуростовым скачком, примерно в 5 лет. Важнейшим событием здесь является появление уже близких ко взрослому варианту типов мышечных волокон, хотя их соотношение еще является "детским", да и функциональные возможности вегетативных систем еще недостаточно

велики. На протяжении школьного возраста ребенок проходит еще целый ряд этапов, только на последнем из них достигая “взрослого” уровня регуляции, функциональных возможностей и энергетики скелетных мышц:

1 этап – возраст от 7 до 9 лет – период поступательного развития всех механизмов энергетического обеспечения с преимуществом аэробных систем.

2 этап – возраст 9–10 лет – период "расцвета" аэробных возможностей; роль анаэробных механизмов мала.

3 этап – период от 10 до 12–13 лет – отсутствие приростов аэробных возможностей; умеренный прирост анаэробных возможностей; развитие фосфагенного и анаэробно-гликолитического механизмов протекает синхронно.

4 этап – возраст от 13 до 14 лет – существенный прирост аэробных возможностей; торможение прироста анаэробно-гликолитического механизма энергообеспечения; фосфагенный механизм развивается пропорционально увеличению массы тела.

5 этап – возраст 14–15 лет – прекращение роста аэробных возможностей, резкое увеличение емкости анаэробно-гликолитического процесса; развитие фосфагенного механизма по-прежнему пропорционально увеличению массы тела.

6 этап – период от 15 до 17 лет - аэробные возможности растут пропорционально массе тела; продолжают быстро нарастать анаэробно-гликолитические возможности; значительно ускоряется развитие механизмов фосфагенной энергопродукции; завершается формирование дефинитивной структуры энергообеспечения мышечной деятельности.

На процессы созревания энергетических и вегетативных систем огромное влияние оказывает половое созревание, так как половые гормоны непосредственно влияют на метаболические возможности скелетных мышц. Аэробное энергообеспечение, достигающее расцвета еще до начала пубертата, на первых его стадиях даже несколько ухудшается, однако к возрасту 14 лет отмечается новый подъем возможностей аэробных систем энергообеспечения. Это связано, в частности, с внутренними потребностями мышц, которым для последнего этапа дифференцировок требуются мощные окислительные системы. Анаэробное энергообеспечение резко активизируется уже на начальных стадиях полового созревания, затем (III стадия) темп его совершенствования замедляется, а после достижения IV стадии полового созревания (15–16 лет у мальков, 13–14 лет у девочек) наблюдается бурный рост анаэробных возможностей, особенно у юношей. Девушки в этот период уже сильно отличаются от юношей по характеру и уровню развития мышечной энергетики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие механизмов энергетического обеспечения мышечной деятельности в процессе онтогенеза или спортивной тренировки представляет собой сложный, нелинейный и гетерохронный процесс. Он включает кардинальные изменения в структуре и функциональных характеристиках мышечных волокон, значительную перестройку ферментных систем, существенные изменения в деятельности вегетативных систем, обеспечивающих мышцы кислородом и субстратами, а также в работе регуляторных центров. Все это ведет к повышению эффективности и надежности работы организма. Однако любое воздействие, которое мы предполагаем оказывать на организм, в том числе – тренировочное, должно быть тщательно сбалансировано с его реальными функциональными возможностями, с уровнем развития тех функций организма, на которые будет в первую очередь направлено воздействие. Это – одна из причин, почему столь необходимы точные, корректные и адекватные средства контроля за динамикой работоспособности. И это же – главная причина, почему педагогу и тренеру необходимо знать основные закономерности возрастного развития скелетных мышц и их функциональных возможностей.

Рекомендованная литература

1. Бар-Ор О., Роуланд Т. Здоровье детей и двигательная активность: от физиологических основ до практического применения / пер. с англ. И. Андреев. – Киев: Олимп. л-ра, 2009. – 528 с. ISBN 966-7133-98-2
2. Безруких М.М. и др. Возрастная физиология: (Физиология развития ребенка): Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / М. М. Безруких, В.Д.Сонькин, Д.А. Фарбер. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 416 с. ISBN 5-7695-0581-8
3. Букреева Д.П., Косилов С.А., Тамбиева А.П. Возрастные особенности циклических движений детей и подростков. М.: "Педагогика", 1975. - 160 С.
4. Зайцева В.В., Сонькин В.Д. Такие разные дети. Шаги физического развития. – Екатеринбург: У-фактория, 2006. – 288с.
5. Любомирский Л.Е. Управление движениями у детей и подростков// 1974. М.: Педагогика, 232 С.
6. Сонькин В.Д., Тамбовцева Р.В. Развитие мышечной энергетики и работоспособности в онтогенезе. – М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2011. – 368 с.
7. Фарбер Д.А., И.А.Корниенко, В.Д.Сонькин. Физиология школьника. – М.: Педагогика, 1990. – 90 с.