

© В. А. Щуров, 1996.

Физиологическая интерпретация концепции Г. А. Илизарова о зависимости состояния тканей от адекватности механической нагрузки и кровообращения

В. А. Щуров

Российский научный центр "Восстановительная травматология и ортопедия" им. академика Г. А. Илизарова, г. Курган
(Генеральный директор — академик РАМТН, д.м.н., профессор В. И. Шевцов).

Учение Г. А. Илизарова о стимулирующем влиянии напряжения растяжения на регенерацию и рост тканей и роль в этих процессах адекватного кровоснабжения имеет практическую направленность и не претендует на исчерпывающее объяснение всех механизмов регуляции, поскольку в клинической практике основным способом воздействия на регенерацию является изменение с помощью аппарата внешней фиксации режимов компрессии или дистракции. В работе дано физиологическое подтверждение основных положений учения Г. А. Илизарова о стимулирующем влиянии напряжения растяжения на кровоснабжение и регенерацию тканей. При оценке воздействия механических факторов на ткани следует принимать во внимание, что одним из способов механической интеграции является гидравлическое взаимодействие, реализующееся посредством циркуляторной системы. В частности, повышение давления в тканях способствует снижению трансмурального давления, расширению сосудов за счет релаксации их стенок, увеличению скорости кровотока в микроциркуляторном русле. При повреждении органов и тканей увеличивается их гидратация. Неадекватно высокий приток крови при нарушении функции мышц наблюдается при преобладании альтеративных явлений и сопровождается увеличением остеопороза.

Ключевые слова: кровоснабжение конечности, биомеханика тканей, метод Илизарова, функциональная нагрузка.

Впервые стимулирующее влияние механической нагрузки на структуру кости описал более 100 лет назад Ю. Вольф [13]. Роль сохранения кровоснабжения тканей для заживления переломов кости подчеркивалась многими авторами. В. И. Стецула [5] считал, что наблюдаемое после перелома кости ускорение кровотока возникает как следствие ткане-сосудистого несоответствия, развивающегося при деструкции тканей. По мнению Г. А. Илизарова [2], ускорение кровотока и усиление васкуляризации являются ответом на повышение метаболических запросов регенерирующих тканей.

Анализ клинических наблюдений и экспериментальных исследований в условиях открывшихся новых возможностей лечения при применении разработанного Г. А. Илизаровым метода позволил его автору в 1968 году обобщить разрозненные, порой противоречивые теоретические представления предшественников и выдвинуть новую научную концепцию. Согласно этой концепции, в продольном и поперечном росте костей и формировании их рельефа существенная роль отводится адекватной зависимости продольной компрессии и кровоснабжения. Одна и та же относительная сила компрессии может давать и положительный, и отрицательный эффект, в зависимости от условий и, главным образом, от состояния кровоснабжения.

Эти положения Г. А. Илизарова в свое время не были переведены на язык точных инженерных описаний и не получили достаточной физиологической интерпретации. В

дальнейшем Г. А. Илизаров с сотрудниками созданного под его руководством института на основании экспериментально - морфологических исследований подробно изучил открытый им же эффект стимулирующего влияния напряжения растяжения на процессы регенерации и роста костей, мышц, нервов, сосудов.

Настоящее исследование является результатом многолетнего изучения процессов естественного роста, воздействия на этот процесс механических факторов и состояния кровоснабжения конечности у здоровых детей и подростков и у больных с повреждениями и заболеваниями опорно-двигательного аппарата в процессе лечения по Илизарову.

Для исследования состояния напряжения растяжения различных тканей и органов, в первую очередь, скелетных мышц были разработаны методики определения продольной и поперечной жесткости пассивных мышц [4, 8, 9]. При обследовании 487 здоровых детей и подростков было установлено, что показатель упругости икроножной мышцы неуклонно увеличивается по мере продольного естественного роста голени. У больных с ахондроплазией (80 человек) этот показатель соответствовал значениям здоровых детей меньшего возраста, но имевших такую же длину голени [3].

Существенный прирост показателя упругости мышц наблюдался после окончания предпубертатного скачка роста конечностей у подростков. Стабилизация размеров площади поперечного сечения метаэпифизарных

пластинок кости в условиях увеличения массы мышц приводила к ингибированию функциональной активности этих пластинок и торможению продольного роста сегментов конечностей. Сохранение естественного продольного роста конечностей после их удлинения у детей определяется степенью прироста величины удельного давления на метаэпифизарные пластинки роста. В свою очередь, величина удельного давления зависит от двух факторов: роста напряжения растяжения мышц и наверстывающего роста площади поперечного сечения самих пластинок. Как правило, ускорение и возобновление продольного роста конечностей наблюдаются после окончания удлинения голени в условиях нормализации показателя упругости мышц до величин, характерных для здоровых сверстников с такой же длиной этого сегмента конечности.

Объемная скорость кровотока (F_r), оцениваемая с помощью метода окклюзионной плетизмографии (прибор "PERIQUANT-3500", Швеция), является максимальной в периоды бурного роста у детей раннего возраста и предпубертатного скачка роста конечностей. В последнем случае кривая увеличения упругости мышц совпадает по срокам с увеличением коэффициента капиллярной фильтрации (CFC), отражающего при прочих равных условиях суммарную площадь функционирующих капилляров. В норме, у здоровых людей, между показателями CFC и F_r существует обратная взаимосвязь, так как с увеличением шунтового кровотока в состоянии физического покоя капиллярный кровоток снижается:

$$CFC = 0,0056 - 0,0010 \cdot F_r; r = -0,728, p \leq 0,05$$

Такие же взаимоотношения выявлены между величинами F_r и определяемым редоксиметрически (полярографический анализатор РА-2, Чехословакия) тканевым кровотоком в коже тыльной поверхности стопы:

$$TK = 45,6 - 10,23 \cdot F_r; r = -0,750, p \leq 0,05$$

С увеличением возраста у здоровых детей и у больных с ахондроплазией, по мере роста показателя упругости мышц (D , усл. ед.), величина кровотока покоя голени имела тенденцию к снижению:

$$F_r = 3,76 - 0,0144 \cdot D; r = -0,684, p \leq 0,05$$

У здоровых обследуемых старше 50 лет также может наблюдаться тенденция к увеличению F_r как следствие снижения упругости мышц и CFC.

В условиях лечения по Илизарову больных с переломами костей голени увеличение пока-

зателя напряжения растяжения мышц сопровождается ростом кровотока покоя:

$$F_r = 1,82 + 0,0076 \cdot D; r = 0,845, p \leq 0,001$$

В этот период устанавливалась положительная корреляционная взаимосвязь между показателями общего и нутритивного кровотока:

$$CFC = 0,00276 + 0,0005 \cdot F_r; r = 0,655, p \leq 0,05$$

При удлинении голени по Илизарову скорость кровотока и показатель упругости мышц также становились значительно выше уровня нормы. У больных с ахондроплазией при удлинении голени на 5, 10 и 15 см показатель упругости икроножной мышцы достигал соответственно 155 ± 5 , 180 ± 4 и 227 ± 10 усл. ед. Величина F_r достигала 3,09 мл в мин на 100 cm^3 ткани при увеличении показателя D до 200 усл. ед., однако при дальнейшем росте напряжения, растяжения тканей кровоток покоя начинал снижаться, составляя при 212 и 231 усл. ед. соответственно 1,80 и 1,48 мл/мин $\cdot 100 cm^3$.

Причина снижения объемной скорости кровотока голени, по-видимому, заключается в повышении напряжения растяжения тканей за пределы физиологической нормы, определяемой величиной давления перекрытия артериолярного русла (40-50 мм рт. ст.). Нами установлено, что показатель упругости мышц в условиях повышения напряжения растяжения тканей может отражать изменение внутримышечного давления (P , мм рт. ст.). У здоровых людей в покое это давление при повышении упругости мышц не увеличивается. Однако у больных с переломами костей голени взаимосвязь этих показателей статистически значима:

$$P = 10,6 + 0,60 \cdot D; r = 0,828, p \leq 0,001$$

При удлинении голени у больных с врожденным укорочением одной из нижних конечностей величина внутримышечного давления тем выше, чем на большую величину производится это удлинение (L , см):

$$P = 0,5 \cdot L^2 - 0,037 \cdot L + 8,27$$

Следовательно, в условиях сохранения заданного режима distraction при удлинении конечности на величины свыше 9 см превышает критический уровень перекрытия артериолярного русла. При этом снижается скорость кровотока и компенсаторно увеличивается уровень системного артериального давления. При оценке последствий механических воздействий на живые ткани нужно принимать во внимание способность биологиче-

ских объектов рассеивать прилагаемую извне энергию [10].

При лечении больных по Илизарову происходит нарушение баланса между шунтовым и тканевым кровотоками, сохранение которого предохраняет микроциркуляторное русло от трансмиссии избыточного артериального давления, ускорения фильтрации жидкой части крови в ткани и повышения интерстициального давления и повышения напряжения растяжения тканей. Существенное влияние на величину внутримышечного давления оказывает регионарное венозное давление. Уровень внутримышечного давления можно использовать для оценки давления в близлежащих венах [7]. Практический интерес представляет обнаружение эффекта стимулирующего влияния увеличения регионарного венозного давления на процессы роста [6, 12].

Нами показано, что оптическая плотность рентгеновского изображения дистракционного регенерата (Н, %) у больных с ахондроплазией наибольшая при оптимальных значениях тканевого кровотока ($24 \text{ мл/мин} \cdot 100 \text{ см}^3$) и максимальных значениям регионарного кровотока покоя:

$$H = 26,2 + 28,6 \cdot F_r; r = 0,858, p \leq 0,01$$

Допплерографические исследования позволили выявить различия в реакции сосудистой системы конечностей при дистракции у детей и взрослых больных. У отстающей в естественном росте конечности относительно меньше масса тканей и соответственно, просвет сосудов и скорость кровотока. При лечении больных по Илизарову диаметр бедренной артерии увеличивается и у детей достигает 91%, у взрослых — 85% от уровня интактной (более нагружаемой) конечности. У взрослых больных в период дистракции дефицит регионарного кровотока чаще компенсируется за счет избирательного перераспределения минутного объема периферического кровотока, направленного на ускорение тока крови по оперированной конечности. Выявлена прямая зависимость соотношения объемной скорости кровотока оперированной (F_o) и интактной конечностей (F_i) от возраста:

$$F_o / F_i = 0,2 + 0,065 \cdot T; r = 0,933, p \leq 0,001$$

Считается общепризнанным, что у здоровых людей величина кровяного давления в микрососудистом русле не зависит от уровня системного артериального давления. У больных с переломами костей голени уровень внутримышечного давления наибольший при оптимальных значениях регионарного систолического давления (138 мм рт. ст.). У здоровых детей артериальная гипертензия наблю-

дается в случаях отставания в продольном росте тела. При ускорениях роста, напротив, наблюдается относительная гипертензия. У подростков другие соотношения: чем выше артериальное давление, тем больше рост и масса тела. Очевидно, у детей регуляция возрастных темпов увеличения артериального давления направлена на выравнивание кривой роста, ее стандартизацию, у подростков — на адаптацию размеров тела к изменяющимся условиям среды.

У больных с последствиями перенесенного полиомиелита (53 чел.) в 5-10 лет наблюдалась стойкая артериальная гипертензия (АД выше уровня возрастной нормы на 30%). При этом выявлена нелинейная зависимость величина F_r пораженной конечности от уровня системного артериального давления (АД, мм рт. ст.):

$$F_r = 0,62 - 0,0006 \cdot (АД - 118,1)^2; \\ r = 0,760, p \leq 0,05$$

Из этого уравнения следует, что существует оптимальный уровень артериального давления, отклонения от которого как в сторону повышения, так и снижения приводят к ухудшению кровоснабжения тканей. Системная артериальная гипертензия у больных детей является фактором, способствующим сохранению темпов продольного роста конечности, даже в условиях гипотрофии тканей. Обследование больных с артериальной недостаточностью конечностей позволило найти оптимальные значения артериального давления, отличающиеся от уровня возрастной нормы, при которых наибольшие значения амплитуды пульса и скорости кровотока покоя [11]. Трансмиссия артериального давления по ходу сосудистого русла способствует повышению защитных свойств тканей от внешних механических воздействий [10], увеличению их напряжения растяжения и скорости роста.

Артериальная гипертензия при врожденных (55 чел.) и приобретенных (43 чел.) укорочениях одной из конечностей в подростковом возрасте является фактором, способствующим предохранению естественного продольного роста интактной конечности и туловища от отрицательного корректирующего влияния, оказываемого со стороны отстающей в размерах конечности [1].

Таким образом, воздействие механических факторов на ткани следует рассматривать с учетом того, что через пронизывающие ткани сосуды непрерывным потоком под разным давлением проходит кровь соединяющая их с другими тканями, не подверженными механическим воздействиям. Повышение давления в тканях способствует снижению трансмембранного давления, расширению сосудов за

счет релаксации их стенок, ускорению скорости кровотока по шунтам или по капиллярам (в зависимости от степени функционального участия мышц). При повреждении органов и тканей ускоряются как шунтовый, так и нутритивный кровотоки, увеличивается гидратация тканей. Чрезмерная нагрузка, будь то компрессия, дистракция или отек в замкнутом фасциальном пространстве, может привести к перекрытию артериолярного русла, снижению или полной остановке кровотока. "Избыточный кровоток при отсутствии функционального участия мышц" [2] — это ускорение шунтового кровотока в условиях нарушения капиллярного кровоснабжения, приводящее к возникновению остеопороза.

Выявленные Г.А. Илизаровым закономер-

ности влияния на костеобразование различных вариантов изменения нагрузки и кровотока физиологически вполне обоснованы. Они предполагают осуществляющееся с участием системы кровообращения взаимодействие костного и гидравлического скелетов в процессах регенерации и роста. Безусловно, в изложенной схеме местной механической регуляции процесса роста этот сложный процесс представлен упрощенно, односторонне. Однако для практической деятельности ортопеда, когда основным способом управления регенераторным процессом является механическое воздействие на ткани с помощью компрессии либо дистракции, эта схема, раскрывающая роль в этом взаимодействии гемодинамики и гидравлического фактора, может оказаться весьма полезной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артериальная гипертензия и продольный рост у детей и подростков с заболеваниями опорно-двигательного аппарата / В. А. Щуров, В. И. Шевцов, Т. И. Иванова, В. Д. Шатохин // Педиатрия. — 1985. — № 3. — С. 40-42.
2. Илизаров Г. А. Чрескостный компрессионный остеосинтез аппаратом автора: Автореф. дис... канд. (докт) мед. наук. — Пермь, 1968. — 56 с.
3. Илизаров Г. А., Щуров В. А. Влияние напряжения растяжения на биомеханические свойства мышц, их кровоснабжение и рост голени // Физиол. человека. — 1988. — Т. 14, № 1. — С. 26-32.
4. Способы исследования состояния мышц и прогнозирование функциональных исходов удлинения отстающей в росте голени по Г.А.Илизарову: Метод. рекомендации / ВКНЦ "ВТО"; Сост.: Г. А. Илизаров, В. А. Щуров, Л. А. Гребенюк. — Курган, 1989. — 21 с.
5. Стецула В. И. Репаративная регенерация длинных трубчатых костей при компрессионном остеосинтезе: Автореф. дис... докт. мед. наук. — Свердловск, 1965. — 26 с.
6. Тихонов Ю. А. Неравномерный рост конечностей у детей // Клин. хир. — 1981. — № 6. — С. 39-42.
7. Шор Н. А. Динамическое измерение давления в икроножной мышце для оценки состояния венозной гемодинамики нижней конечности // Вестн. хир. — 1990. — № 6. — С. 37-39.
8. Щуров В. А., Гребенюк Л. А., Дьячкова Г. В. Динамика биомеханических свойств мышц в условиях естественного роста и после удлинения голени по Илизарову при ахондроплазии // Вопросы биомеханики в травматологии и ортопедии: Научные труды. — Казань, 1989. — С. 55-58.
9. Щуров В. А., Кудрин Б. И., Шеин А. П. Взаимосвязь биомеханических и функциональных характеристик мягких тканей голени при ее удлинении по Илизарову // Ортопед. травматол. — 1981. — № 10. — С. 30-34.
10. Щуров В. А. Метод исследования биомеханических свойств мягких тканей опорной поверхности стопы // Ортопед. травматол. — 1986. — № 12. — С. 32-34.
11. Щуров В. А., Пепеляева Т. А. Оценка диагностической информативности амплитудных характеристик пульса артерий стопы // Физиол. человека. — 1992. — Т. 18, № 2. — С. 139-143.
12. Kelly P. L., Bronk J. T. Venous pressure and Bone formation // Microvascular Researches. — 1990. — Vol. 39, N 3. — P. 364-375.
13. Wolf J. Das Gesetz der Transformation der Knochen. — Berlin: Herschwald, 1892. — 152 s.

Рукопись поступила 12.12.95 г.