

© Щуров В.А., 2018  
УДК 612.15:616.71-001.5-089.227.84-053

Щуров В.А.

## Принцип адекватности кровоснабжения тканей — один из постулатов учения Г.А. Илизарова

ФГБУ «Российский научный центр «Восстановительная травматология и ортопедия» им. академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, 650005, г. Курган, Россия, ул. Марии Ульяновой, д. 5

**Цель** исследования — расширить существующее представление об адекватности кровоснабжения тканей: оценить соответствие количества притекающей крови энергетическим потребностям тканей, резервы функциональной адаптации сосудистого русла для функциональной устойчивости органов и возможность подстройки интенсивности метаболизма тканей под возможности системы микроциркуляции. **Методика.** Исследован магистральный и капиллярный кровоток (окклюзионная плетизмография, ультразвуковая доплерография, полярография, лазерная флоуметрия) у здоровых людей (157 чел.) и различных групп больных в возрасте от 5 до 70 лет (620) с травмами костей и ортопедическими заболеваниями голени в процессе лечения по Илизарову. **Результаты.** Обнаружено, что с увеличением возраста у здоровых и больных обследуемых снижается скорость кровотока по сосудам бедра и по средней мозговой артерии при сохранении функциональных резервов сосудистого русла, выявляемых с помощью ишемических или нагрузочных проб. **Заключение.** Адекватность кровоснабжения предполагает не только соответствие скорости кровотока потребностям органов, но и сохранение при этом резерва функциональной адаптации сосудистой системы, а также возрастное ограничение функциональных способностей органов движения при снижении возможностей сосудистой системы.

**Ключевые слова:** адекватность кровоснабжения, скорость кровотока, функциональная адаптация, лечение переломов костей, лечение заболеваний по Илизарову.

**Для цитирования:** Щуров В.А. Принцип адекватности кровоснабжения тканей — один из постулатов учения Г.А. Илизарова. *Патологическая физиология и экспериментальная терапия.* 2018; 62(3): 44—48.

DOI: 10.25557/0031-2991.2018.03.44-48

**Для корреспонденции:** Щуров Владимир Алексеевич, доктор мед. наук, проф., гл. науч. сотр. лаб. коррекции деформаций и удлинения конечностей, e-mail: shchurovland@mail.ru

**Финансирование.** Исследование выполнено без финансовой поддержки.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Автор выражает благодарность** сотрудникам клинических подразделений РНЦ «ВТО» № 1 и № 18.

Поступила 11.05.2017

Schurov V.A.

## The principle of adequate blood supply to tissues: one of postulates in the G.A. Ilizarov's teaching

G.A. Ilizarov Russian Scientific Center, Restorative Traumatology and Orthopedics, Marii Ulyanov Str. 6, Kurgan, 640001, Russia

**The aim** of the study was to expand the existing concept on the adequacy of blood supply as an exact correlation of the amount of delivered blood with energy demands of the tissue; to evaluate reserves of functional adaptation of the vasculature for functional stability of organs; and to assess the capability of tissue metabolism for adjusting to potentialities of the microcirculation. **Methods.** Conduit vessel and capillary blood flow (occlusion plethysmography, Doppler ultrasound, polarography, laser flowmetry) was studied in healthy subjects (n=157) and different groups of patients aged 5—70 years (620) with bone injuries and orthopedic diseases of the lower leg during the treatment according to Ilizarov. **Results.** Maximum values of blood flow in main limb arteries were not reached at maximum and average values of capillary blood flow, which were different for different groups of patients. With increasing age, the blood flow velocity in femoral blood vessels and middle cerebral artery decreased while the vasculature functional reserve was maintained as evidenced by ischemic or loading tests. **Conclusion.** The adequacy of blood supply involves not only matching the blood flow velocity to demands of organs but also maintaining the adaptive reserve of vasculature function as well as the age-related limitation of functional capability of the locomotor system when the vascular system function declines.

**Keywords:** adequacy of blood supply, blood flow rate, functional adaptation, treatment of bone fractures, treatment according to Ilizarov.

**For citation:** Schurov V.A., the Principle of the adequacy of the blood supply to the tissues — one of the postulates of the teachings of G.A. Ilizarov. *Patologicheskaya Fiziologiya i Eksperimental'naya terapiya. (Pathological Physiology and Experimental Therapy, Russian Journal)*. 2018; 62(3): 44—48.

**DOI:** 10.25557/0031-2991.2018.03.44-48

**For correspondence:** Vladimir A. Schurov. Doctor of Medical Sciences. Chief Researcher of State Organization «Russian Ilizarov Scientific Center «Restorative Traumatology and Orthopaedics» Ministry of Health of the Russia, 6, ul. Mariya Ulyanova, 640001, Kurgan, Russia, e-mail: schurovland@mail.ru

**Conflict of interest.** The author declare no conflict of interest.

**Acknowledgments.** The author expresses gratitude to the staff of the clinical units of the RSC «RTO» № 1 and No. 18.

**Received** 11.05.2017

## Введение

При тяжелых повреждениях и заболеваниях конечности важнейшей задачей является восстановление кровоснабжения. Чем выше скорость кровотока, тем больше надежд на благоприятный исход заболевания. Однако в дальнейшем сформировалось представление о том, что оптимальные условия для репаративной регенерации поврежденных органов создаются не при максимальной интенсивности кровотока, а при показателях кровоснабжения адекватных их потребностям. То есть под принципом адекватности подразумевается соответствие кровоснабжения оптимальным метаболическим потребностям тканей. Г.А. Илизаров [1] предложил принцип адекватности кровоснабжения тканей в качестве одного из постулатов, обеспечивающих необходимые условия для обеспечения скорейшего восстановления жизнедеятельности поврежденных конечностей. Если адекватность кровоснабжения так важна для жизнедеятельности органов, следовательно, должен существовать физиологический механизм, поддерживающий реализацию этого принципа. Действительно, существует механизм, имеющий отличия в разных органах. Исследование микроциркуляции в тканях конечности показывает, что, например, увеличение скорости регионарного кровотока и повышение локальной температуры после повреждения на фоне снижения функциональной активности мышц может осуществляться не за счет усиления нутритивного кровотока, а за счет сброса избытка крови через открывающиеся артерио-венозные анастомозы [2, 3]. Интенсивность кровоснабжения центров головного мозга осуществляется за счет механизма ауторегуляции, обеспечивающего избирательное перераспределение скорости кровотока по артериям мозга в условиях изменяющийся активности этих центров при различных величинах системного артериального давления [4].

**Цель исследования** — расширить существующее представление об адекватности кровоснабжения как о точном соответствии количества притекающей крови энергетическим потребностям тканей, показать, что для функциональной устойчивости органов имеет зна-

чение сохранения резерва функциональной адаптации сосудистого русла и возможность подстройки интенсивности метаболизма тканей под возможности системы микроциркуляции.

## Методика

Обследована контрольная группа здоровых людей (157 чел.) в возрасте от 5 до 70 лет, а также группы больных разного возраста с нарушениями кровоснабжения конечностей: с закрытыми диафизарными переломами костей голени в условиях лечения по Илизарову (130 чел. в возрасте от 16 до 60 лет), с облитерирующим эндартериитом 3-й — 4-й стадии (165 чел. в возрасте от 18 до 78 лет), с врожденным отставанием в росте одной из конечностей от 3 до 15 см (325 чел. в возрасте от 4 до 45 лет). Работа одобрена этическим комитетом научного центра. При проведении обследования соблюдались принципы информированного согласия Хельсинской Декларации.

Использованы методы термометрии кожных покровов голени («Nichon Kohden», Япония), окклюзионной плетизмографии голени в состоянии покоя и после 3-минутной окклюзии артерий («Periquant-3500», Швеция), транскутанной полярографии с определением напряжения кислорода и углекислого газа в тканях голени («Novametrix», США), лазерной флоуметрии голени и стопы («Transonic systems», США) и ультразвуковой доплерографии магистральных артерий нижних конечностей и средней мозговой артерии с датчиками на 4 и 2 МГц («Ангиодин-2КМ», Россия).

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с помощью пакета анализа данных («Microsoft Excel-2010»). Нормальность распределения эмпирических выборок подтверждена с помощью модифицированного критерия Колмогорова. В таблицах приведены средние значения показателей и среднеквадратическая ошибка. На графиках планка погрешностей соответствует величине среднеквадратического отклонения. При анализе динамики измене-

ния показателей использовали методы корреляционного и линейного регрессионного анализа. С целью учета эффекта множественных сравнений применяли дисперсионный анализ с использованием критерия Шеффе для независимых выборок. Для оценки статистической значимости различий результатов в случае анализа 2 выборок использовали t-критерий Стьюдента для независимых выборок.

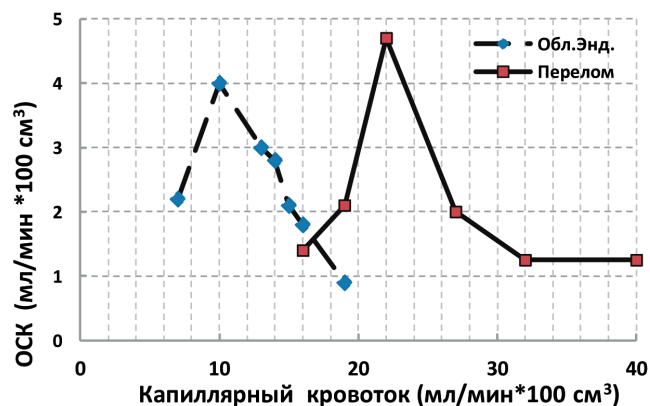


Рис. 1. Взаимосвязь между величинами капиллярного кровотока и объёмной скорости магистрального кровотока (ОСК) голени у больных с травмами костей и облитерирующими поражениями артерий.

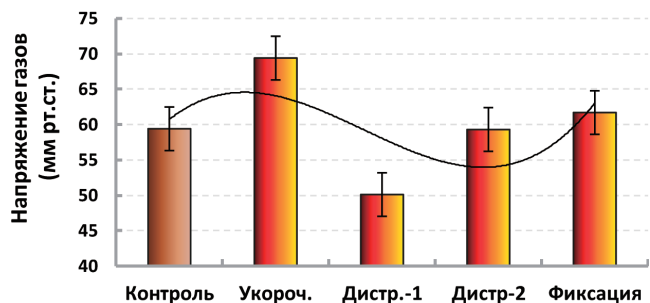


Рис. 2. Напряжение кислорода в тканях при оперативном удлинении голени по Илизарову.

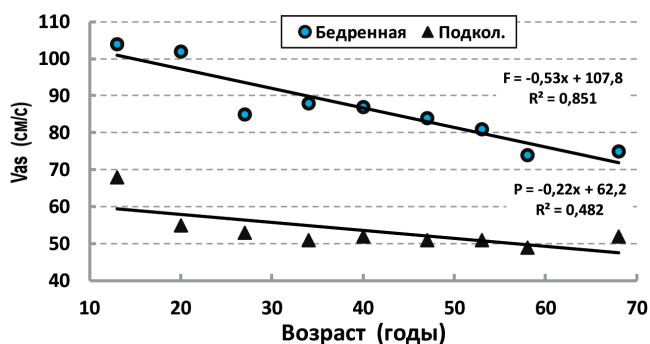


Рис. 3. Возрастная динамика линейной скорости кровотока по бедренной и подколенной артериям у здоровых людей.

## Результаты и обсуждение

Обнаружено, что между скоростью кровотока в магистральных артериях и показателями микроциркуляции может существовать как прямая, так и обратная корреляция (с увеличением скорости регионарного кровотока скорость капиллярного кровотока может не только увеличиваться, но и снижаться). Состояние метаболизма тканей, сниженное у пациентов с облитерирующими заболеваниями артерий конечностей, способствует тому, что пиковые значения магистрального кровотока в состоянии покоя наблюдаются у них при более низких значениях показателей микроциркуляции, чем, например, у травматологических больных (рис. 1).

При этом, если увеличение скорости регионарного кровотока осуществлялось не за счет усиления микроциркуляции в тканях, а за счет ускорения шунтового компонента, что наблюдалось в острый период после травмы и после оперативного вмешательства, напряжение кислорода в тканях не повышалось, а снижалось (рис. 2).

Тем не менее, стимуляцию регионарного кровотока в клинической практике можно использовать при наличии у больных «первого взрослого возраста» резервов функциональной адаптации, но только как временное компенсаторное ускорение, например, при лечении ишемии тканей у пациентов с облитерирующими заболеваниями конечностей [5], у больных с последствиями травматического инсульта [6].

Замечено, что с увеличением возраста нарушается нейрогенез [7]. И хотя физические нагрузки тормозят развитие многих проявлений возрастной деградации мозга [8], происходит неуклонное возрастное снижение линейной скорости кровотока как по артериям мозга, так и по магистральным артериям нижних конечностей [9—11] (рис. 3).

После проведения функциональной пробы с 3-минутной ишемией тканей конечности можно наблюдать существенное увеличение скорости регионарного кровотока (пиковый кровоток). Особенностью детского возраста является то, что у них регистрируются высокие показатели как кровотока покоя, так и пикового кровотока. Тем не менее, соотношение показателей пикового кровотока и кровотока покоя (индекс пикового кровотока) с увеличением возраста практически не менялось (рис. 4). Величина индекса пикового кровотока позволяет судить о функциональном резерве сосудистой системы органов. Следовательно, важнейшими критериями адекватности кровотока являются не только величина скорости кровотока, но и способность сохранять функциональный резерв адаптации сосудистого русла. Поэтому возрастное снижение скорости кровотока покоя должно осуществляться в условиях сохранения резервов адаптации к меняющимся потребностям тканей.

С этих позиций адекватность подразумевает не точное удовлетворение метаболических потребностей тканей и регуляцию параметров по принципу «отклонения» (рассогласования) параметров от исходного значения, но и сохранение определенного резерва адаптации, а также регуляцию по принципу «возмущения», обеспечивающую бесперебойное функционирование тканей на оптимальном уровне.

Подтвержден факт возрастного снижения скорости мозгового кровотока, который исследователи объясняли снижением васкуляризации тканей в старости, а также снижением чувствительности рецепторов к углекислоте [10]. Особенно быстро с возрастом снижается мозговой кровоток у больных людей, что подтверждает положение об отсутствии в условиях повреждения нейрогенеза [7]. Если принять за критерий жизнеспособности мозга снижение исходной скорости кровотока (СК) по средней мозговой артерии (СМА) на 40%, то можно оценить условную продолжительность жизни здоровых обследуемых в 67 лет, а больных с врожденными аномалиями развития конечностей в 52 года (рис. 5).

С другой стороны, возрастное снижение скорости локомоций у больных после перенесенного инсульта расценивается как следствие снижения СК по СМА [12]. Нами проведено исследование степени сохранения ауторегуляции мозгового кровотока при выполнении функциональной мышечной пробы в условиях снижения абсолютных значений СК по СМА. Показано, что снижение СК по СМА при проведении пробы тем больше, чем выше исходные показатели СК (рис. 6).

Отсюда возникла гипотеза, согласно которой, возрастное замедление скорости мозгового кровотока обусловлено не уменьшением притока крови, васкуляризации или повышением порога чувствительности хеморецепторов, а необходимостью сохранения резервов функциональной адаптации сосудистого русла центров головного мозга. Количественная потеря скорости кровотока обеспечивает сохранение качества ауторегуляции кровотока.

При проведении функциональной мышечной пробы с работой мышц кистевого схвата одной и другой конечностей максимальный размах изменений скорости кровотока по средней мозговой артерии у здоровых и у больных до лечения стабильный и составляет 17—25%. У больных в процессе оперативного удлинения конечности временно нарушается ауторегуляция мозгового кровотока, возрастают абсолютные значения скорости кровотока, а размах её изменений при функциональной мышечной пробе выходит за границы коридора нормы, составляющего от 17 до 25% (рис. 7).

При этом работоспособность пациентов, определяемая как один из модулей теста SF-36, падает ниже 50 баллов. Следовательно, сохранение ауторегуляции кровотока головного мозга является необходимым условием сохранения функциональной активности его центров.

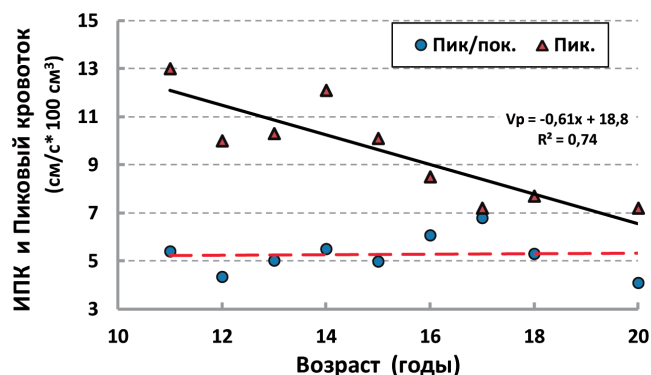


Рис. 4. Возрастная динамика пиковой объёмной скорости кровотока голени и индекса пикового кровотока (ИПК) у обследуемых контрольной группы.

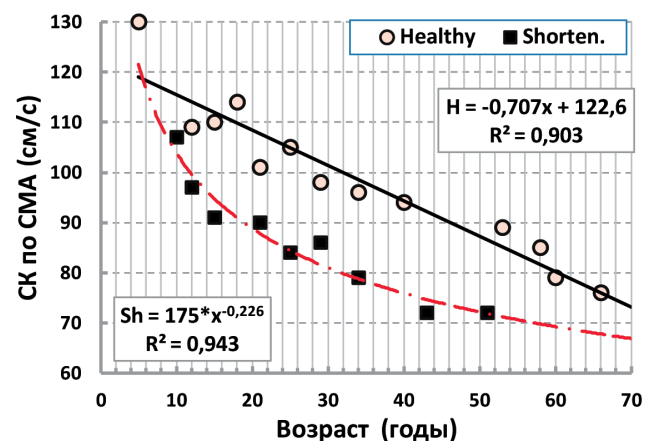


Рис. 5. Возрастная динамика СК по СМА у здоровых людей и у больных с врожденными аномалиями роста конечности (предполагаемая продолжительность жизни 67 и 52 года).

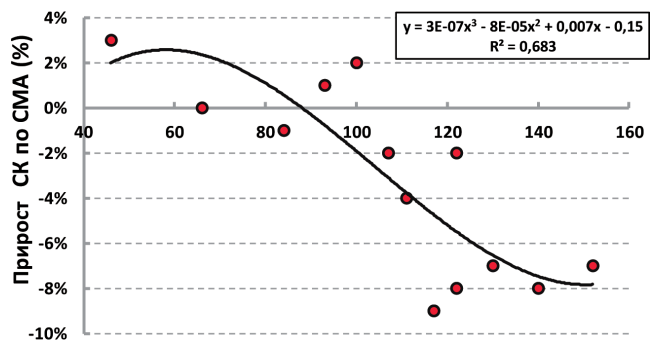


Рис. 6. Зависимость величины прироста (снижения) скорости мозгового кровотока от его исходных значений.



### Заключение

Возможность оперативно изменять интенсивность метаболизма и кровоснабжения органов является не менее значимой, чем сама интенсивность кровотока. Более того, при сосудистых и врожденных ортопедических заболеваниях конечностей снижение интенсивности кровотока, сопровождающееся снижением темпа ходьбы и продолжительности жизни, является вынужденной мерой, позволяющей сохранить необходимый объём регуляции регионарного кровообращения. При этом текущие потребности тканей подстраиваются под возможности сердечно-сосудистой системы.

С лечебной целью возможна стимуляция регионарного кровотока (например, путем оперативного воздействия на костях голени с по методу Г.А. Илизарова), приводящая к стимуляции его шунтовой составляющей, например, при облитерирующих заболеваниях артерий конечностей [5]. При этом у больных развивалась «положительная фаза» динамики регионарного кровотока, которая при операциях на костях могла длиться несколько месяцев и сопровождалась повышением локальной температуры оперированного сегмента конечности, уменьшением ишемических болей. Последствием такой стимуляции является последующее развитие «отрицательной фазы» скорости регионарного кровотока [13]. Нормализация функции конечности происходила у большинства больных в сроки от 0,6 до 2 лет, после выхода показателей скорости кровотока на стационарный уровень. Такие методы лечения возможны после оценки сохранившихся резервов адаптации сосудистого русла с согласия пациентов и в сочетании с комплексным фармакологическим, физиотерапевтическим и психологическим воздействием.

### References

1. Ilizarov G.A. *Transosseous osteosynthesis. Theoretical and clinical aspects of tissue regeneration and growth.* Springer Verlag. Berlin, 1992: 802.
2. Nilsson G., Tenland T., Oberg P.A. Evaluation of a Laser Doppler Flowmeter for measurement of Tissue Blood Flow. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering.* 1988; 22 (10): 597-604.
3. Shevtsov V.I., Dolganova T.I., Schurov V.A., Gorbacheva L.Yu., Dolganov D. V. Assessment of microcirculation in diseases and injuries of the limbs in the treatment process by Ilizarov. *Methodologiya floumetrii.* 1999: 99-108. (in Russian)

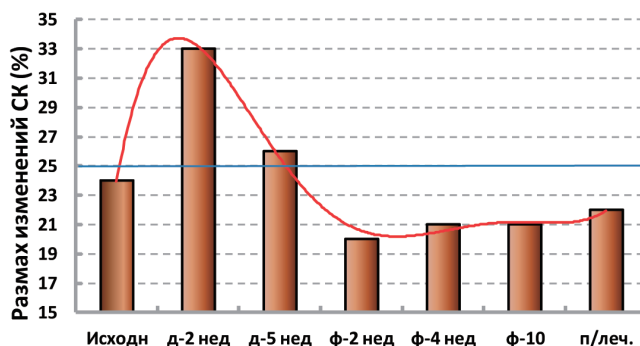


Рис. 7. Динамика размаха изменений СК по СМА при проведении функциональной мышечной пробы до лечения, в процессе distraction и фиксации у больных с врожденным укорочением конечности.

4. Aaslid R., Lindegaard K.F., Sorteberg W., Nornes H. Cerebral autoregulation dynamics in human. *Stroke.* 1989. 20 (1): 45-52.
5. Shevtsov V.I., Popkov A.V., Schurov V.A., Bunov V.S., Schurova E.N. *Orthopedic methods in the treatment of peripheral circulation failure [Ortopedicheskie metody v lechenii nedostatochnosti perifericheskogo krovoobrashheniya].* Moscow; Medtscine. 2007. (in Russian)
6. Skripnikov A., Shein A.P., Krivoruchko G.A. *Neurophysiological aspects of distraction craniotomies [Nejrofiziologicheskie aspekty distraktsionnogo kraniosteosinteza].* Moscow; Izdatelstvo Sputnik Moscow. Publishing house «Sputnik». 2014. (in Russian).
7. Gomazkov O. A. Neurogenesis in the Mature human brain. Justification of therapeutic approach. *Patologicheskaya Fiziologiya i Eksperimental'naya Terapiya.* 2017; 61 (4): 126-135. (in Russian).
8. Paltsyn A. A. Physical activity and age-related cognitive changes. *Patologicheskaya Fiziologiya i Eksperimental'naya Terapiya.* 2016; 2: 87-93. (in Russian)
9. Lipsitz L.A., Mukai S., Hamner J. et al. Dynamic regulation of middle cerebral artery blood flow velocity in aging and hypertension. *Stroke.* 2000; 31: 1897-1903.
10. Kulikov V. P. *Ultrasound diagnosis of vascular diseases.* Moscow, OOO firm «STROM»; 2007. (in Russian)
11. Schurov V.A. *Regional hemodynamics in the treatment of diseases and injuries of the limbs.* Deutschland, Saarbruken, 2016.
12. Sorond F.A., Galica A., Serrador J.M., Kiely, Ilopuitaife I., Cupples L.A., Lipsitz L.A. Cerebrovascular hemodynamics, gait, and falls in an elderly population mobilize Boston Study. *Neurology.* 2010; 74: 1627-33.
13. Shevtsov V.I., Dolganova T.I., Schurov V.A., Dolganov D.V. «Negative phase» of the blood flow velocity in the dynamics of the treatment and rehabilitation process of orthopedic and traumatological patients. *Bulletin of the East Siberian scientific center of the Russian Academy of medical Sciences.* 2002; 2 (6): 226-31. (in Russian)