

А. В. Б у т о р и н а, А. М. А р х а р о в,  
В. А. М а т в е е в, Д. И. Ц ы г а н о в,  
В. Н. М и т р о х и н, Ю. А. П о л я е в,  
А. И. С м о р о д и н

## **РЕАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КРИО-СВЧ ТЕХНОЛОГИЙ В ХИРУРГИИ**

*Разработанные криогенные и сверхвысокочастотные электромагнитные технологии лечения врожденных заболеваний позволяют с успехом лечить детей с гемангиомами, ранее подвергавшихся тяжелым и многоэтапным операциям, сокращают сроки лечения, предупреждают рецидивы заболевания и обеспечивают не только полное излечение заболевания с хорошим результатом (99,8%), но и сохраняют ребенку жизнь и внешность.*

**E-mail: avbutorina@gmail.com**

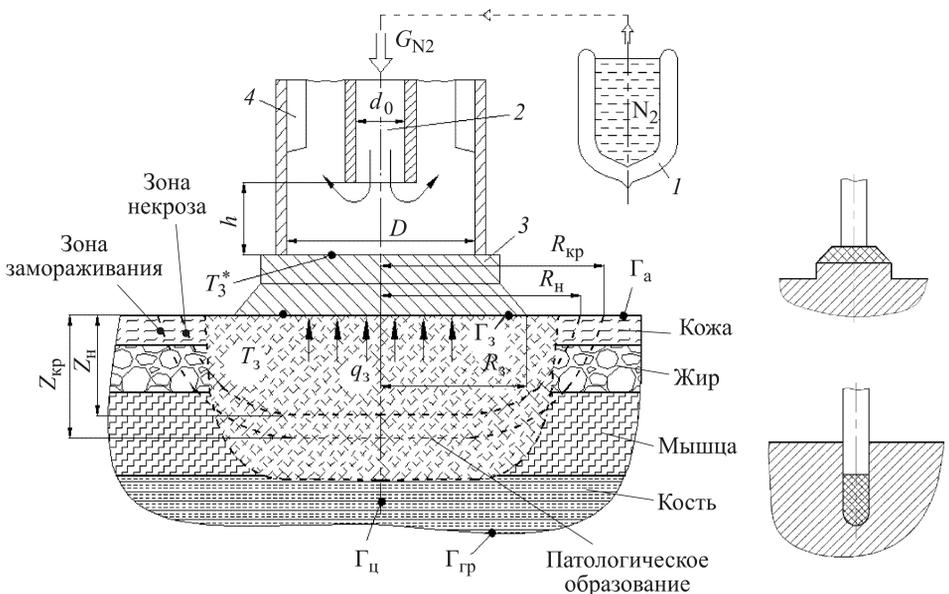
**Ключевые слова:** криохирургия, гемангиома, криодеструкция, сверхвысокочастотное электромагнитное поле.

Современные достижения медицинской техники позволяют широко использовать в лечебной практике различные физические воздействия, реализуемые с помощью лазерного луча, ультразвуковых волн, электромагнитного поля, высоких и низких температур. Хирургия с применением криогенных аппаратов и систем — это самостоятельное многоплановое направление, охватывающее основные дисциплины медицины.

Опыт развития проблемы подтвердил, что задачи, которые выдвигает лечебная практика, необходимо решать на стыке ряда направлений науки: биофизики, криогеники, физики излучений, теплофизики, биологии и медицины. Только синтез научных знаний в этих областях позволяет изучить теплофизические свойства (ТФС) биоткани как объекта лечения, провести корреляцию теплофизических свойств с параметрами режимов воздействия и на этой основе создать адекватные практические технологии для медицинской практики.

Биоткань как теплофизический объект воздействия представляет собой многокомпонентное, капиллярно-пористое, влагосодержащее, анизотропное тело, состоящее из нескольких слоев с существенно различными ТФС, например, кожи, подкожной жировой клетчатки, мышцы, кости, в которых могут образовываться патологические включения. В биоткани *in vivo* присутствуют тепловыделения за счет кровотока и метаболизма. Биоткань является энергетически насыщенной структурой. Криоинструмент, даже охлаждаемый с помощью мощной криогенной системы с большой холодопроизводительностью, является лишь точечным источником холода. Поэтому при рассмотрении процесса криовоздействия учитывалась эффективная теплопроводность биоткани *in vivo*, отражающая всю энергетику живой биоткани [1].

Схематично процессы локального криовоздействия на биоткань криохирургическим инструментом с плоским наконечником показаны на рис. 1. Наконечник криохирургического инструмента приводится в соприкосновение с объектом криовоздействия — патологическим образованием. Внутри наконечника подается жидкий азот при температуре  $\sim 77$  К. Возникающий температурный градиент приводит к тому, что теплота от биоткани начинает передаваться стенкам наконечника и от них к жидкому азоту, который частично или полностью вскипает и удаляется из наконечника. Температура биоткани около наконечника начинает понижаться. При понижении температуры биоткани ниже криоскопической (примерно  $-1$  °С) вода, содержащаяся в биоткани, начинает переходить в твердое состояние, в результате чего выделяется большое количество скрытой теплоты льдообразования ( $\sim 333$  Дж/г). Этот фазовый переход растянут в некотором диапазоне температур, причем бóльшая часть свободной воды кристаллизуется при температурах выше  $-25$  °С. В зоне, где вода, содержащаяся в биоткани, замерзла, тепловыделения отсутствуют. На границе между биотканью и окружающей средой происходит теплообмен в результате естественной конвекции. В области, удаленной от места криовоздействия, температура биоткани равна начальной  $T_0 \cong 310$  К. В случае криовоздействия на небольшой объект температура на удаленных от



**Рис. 1. Схема локального криовоздействия на биоткань (а); поверхностное криовоздействие (б); пенетрационное криовоздействие (в):**

$\Gamma_a$  — граница с атмосферой;  $\Gamma_{ц}$  — ось симметрии;  $\Gamma_{гр}$  — граница расчетной области;  $\Gamma_3$  — граница крионаконечника; 1 — сосуд Дьюара с жидким азотом; 2 — центральная трубка для подвода жидкого азота к крионаконечнику; 3 — крионаконечник; 4 — теплоизоляция

наконечника границах также может понижаться. Зона некроза в биоткани при криовоздействии меньше замерзающей зоны. Методом моделирования выявляют основные закономерности формирования замерзающей зоны на базе реальных ТФС биоткани, используя известные данные о соотношении размеров замерзающей зоны и зоны некроза, можно провести оптимизацию параметров режима криовоздействия для различных патологических образований, что является основой для обоснования технических требований к медицинской технике.

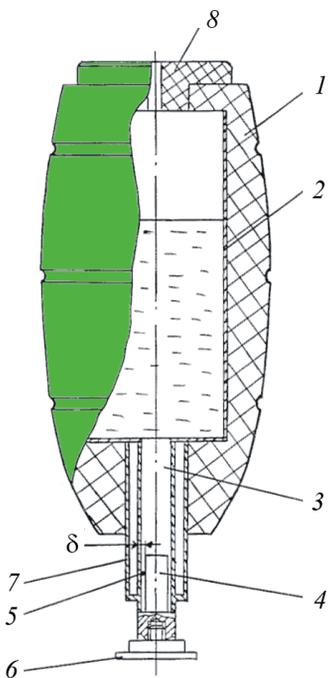
Основные научные и инженерные результаты работы прошли клиническую апробацию. Широкое применение локального низкотемпературного воздействия связано с использованием специальных аппаратов и криогенных систем, что позволило расширить возможности данного метода.

Еще великий Гиппократ писал: “Холод и помогает и убивает. . .”. Благодаря таким важным свойствам, как практически полная безболезненность, косметическая лояльность, отсутствие кровотечения и заметной общей реакции организма, низкотемпературное воздействие получило название “хирургия без скальпеля”.

Гемангиомы — часто встречающиеся доброкачественные сосудистые образования, которые составляют 50 % среди прочих опухолей мягких тканей у детей. Нередко даже небольшие сосудистые опухоли у новорожденных могут проявлять бурный рост, достигая больших размеров, занимая половину лица или обширную поверхность тела ребенка. Наибольшей активностью роста обладают гемангиомы у детей первого полугодия жизни, с преимущественной локализацией в области головы и шеи. Многие врачи просто теряются при виде быстрорастущих гемангиом и начинают применять то один, то другой метод лечения, что затягивается на неоправданно длительный период и может привести к тяжелым косметическим и функциональным нарушениям, которые очень трудно ликвидировать, а иногда они остаются на всю жизнь [2–5].

В последнее время частота оперативных вмешательств при гемангиомах снизилась в 50 раз. При лечении гемангиом ставятся следующие задачи: прекращение роста гемангиом, ликвидация опухолевого процесса, достижение наилучшего функционального и косметического результата.

Для лечебного воздействия применяется аппаратный криогенный метод (рис. 2), где в качестве хладагента используется жидкий азот с температурой кипения — 196 °С. Преобладает амбулаторный способ лечения, без существенных материальных затрат. Оптимальная продолжительность криовоздействия составляет 10. . . 25 с. Площадь криовоздействия не должна превышать 10 см<sup>2</sup>. При обширных гемангиомах



**Рис. 2. Малогабаритный автономный криогенный аппарат:**

1 — корпус; 2 — сосуд; 3 — канюля; 4 — стержень; 5 — кольцевой зазор; 6 — наконечник; 7 — облочка; 8 — крышка

- клиническое течение после криодеструкции с применением жидкого азота характеризуется образованием сухого струпа и четко ограниченным очагом криовоздействия;

- малое количество осложнений после криодеструкции (ни в одном случае наблюдений не обнаружено образование келоидных рубцов).

Успех лечения достигнут в 100% случаев. Очень важной стороной лечения является получение хороших косметических результатов (99,7%) благодаря особенностям регенерации кожи после криогенных вмешательств (органотипическая регенерация) (рис. 3). Не менее значимо и то, что благодаря этой методике сохраняются неповрежденными нервы и мышцы.

К сожалению, после первых успехов криохирургии метод был воспринят как панацея, что привело к частым случаям его необоснованного и неадекватного применения. Отсутствие достоверных методов расчета и прогнозирования основных параметров процесса привело к тому, что большая часть криохирургических операций стала применяться для лечения небольших образований доступной локализации [5]. Даже использование мощной криохирургической аппаратуры,

лечение проводится в несколько этапов. Эпителизация идет под струпом в течение двух-трех-четырех недель. Через два-три месяца цвет поверхности криовоздействия бледнеет, размягчается и приобретает окраску окружающей кожи. Осложнения после криогенного лечения наблюдаются крайне редко — в 0,2% случаев.

Отмечены, следующие преимущества предложенного аппаратного криогенного метода лечения гемангиом с использованием жидкого азота по сравнению со “снегом” диоксида углерода:

- аппаратный метод криодеструкции делает процедуру более простой и позволяет экономить время, необходимое для формирования поверхности снежного комка по форме и размеру образования (достаточно лишь сменить криоапликатор);

- пенопластовая изоляция резервуара с жидким азотом надежно защищает руки хирурга от действия холода;



**Рис. 3. Ребенок с гемангиомой до и после криогенного лечения**

впервые созданной в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 70-х гг. XX в. для лечения гемангиом у детей, не всегда приводило к успеху: оставалась группа больных, у которых после криодеструкции погибала лишь поверхностная часть патологического образования, а глубокая продолжала расти. Поэтому актуальным явился поиск новых методов усиления криодеструкции в сочетании с другими физическими воздействиями, позволяющими значительно расширить границы применения криохирургических методов. Способы усиления криодеструкции, использующие повторные циклы замораживания–оттаивания и ультразвук, не обеспечивали заметного увеличения объема замораживаемых тканей. Для усиления криодеструкции необходим был поиск физических воздействий, повышающих чувствительность тканей к низкой температуре. Одним из них оказалось сверхвысокочастотное электромагнитное поле.

Необходимо помнить, что вода, являясь основным компонентом биологических тканей, определяет их теплофизические свойства. Температура кристаллизации воды в биологических тканях зависит от ее состояния. Можно выделить три состояния воды в биологических тканях: свободная, слабосвязанная (иммобилизованная) и прочносвязанная (гидратационная). Вода отвечает за физические процессы при замораживании биоткани и замерзает не при 273,15 К, а в диапазоне температур от криоскопической (270,5... 272,5 К) до эвтектической (223... 248 К), причем зона замораживания, как правило, больше зоны некроза, и для большинства тканей соотношение диаметров этих зон достигает в среднем значения 1,28. При температуре ниже нулевой, замерзает свободная вода. Гидратационная вода в живом организме прочно связана с белками. На основе результатов исследования

зависимости теплопроводности и структуры биоткани от режима замораживания выявлена физическая картина формирования зоны замораживания при криовоздействии [1].

Поле СВЧ способно взаимодействовать с водной решеткой тканей, “расшатывая” ее. В результате СВЧ воздействия в биоткани увеличивается содержание свободной воды и, следовательно, увеличивается доля замороженной воды при криовоздействии, что должно, в свою очередь, приводить к увеличению теплопроводности биоткани. Релаксационные процессы возникают в дипольных молекулах воды и жидких сред, резонансные явления — в белковых молекулах высокой дисперсности. Возможны изменения зоны гидратации молекул, разрыв внутримолекулярных связей. Ткани с высоким содержанием воды поглощают поля в 10–60 раз сильнее, чем жировая ткань. Усилением эффекта криодеструкции после СВЧ облучения определяется увеличение теплопроводности биоткани.

В клинике апробирован разработанный совместно с инженерами способ усиления криогенной деструкции путем предварительного воздействия на область локального замораживания микроволнами СВЧ электромагнитного поля. Методика предварительного облучения области замораживания СВЧ полем с последующей криодеструкцией по сравнению с криогенной деструкцией позволяет усилить разрушающие воздействия низкой температуры в 4–6 раз по глубине и в 50 раз по объему и сохраняет все полезные свойства локального низкотемпературного разрушения.

Результаты исследований (рис. 4) по определению влияния параметров предварительного СВЧ воздействия на размеры зон замораживания и некроза кожно-мышечной ткани животных показывают, что оптимальными параметрами предварительного СВЧ воздействия являются — мощность 10 Вт, частота 915 МГц, время облучения 3...5 мин с интервалами 2 мин. Диаметр зоны замораживания в этом случае

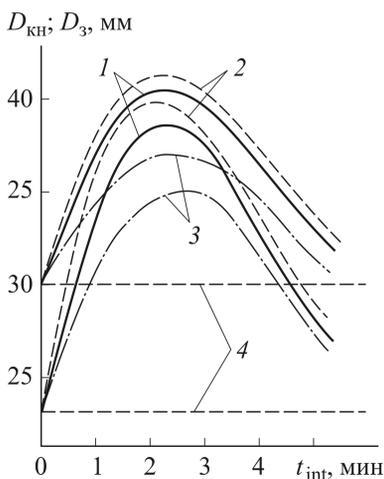


Рис. 4. Зависимость диаметров зон замораживания ( $D_3$ ) и некроза ( $D_{кн}$ ) кожно-мышечной ткани от интервального времени  $t_{int}$  при разных мощностях предварительного СВЧ облучения; время СВЧ воздействия 3 мин, частота 915 МГц, время криовоздействия 15 мин; — — зона замораживания; - - - зона некроза

увеличивается более чем в 2 раза, а объем некроза — в 5–6 раз, по сравнению с простым замораживанием. Такая комбинация физических факторов позволяет при использовании максимальных возможностей криогенной техники, работающей на жидком азоте, добиться разрушения патологических образований объемом до  $120 \text{ см}^3$ . Проведенный анализ режимов комбинированного криовоздействия определил оптимальные параметры СВЧ воздействия в криохирургии для увеличения зон замораживания и некроза.

По данной методике пролечено более 1500 детей с гемангиомами. Все гемангиомы, излеченные с помощью СВЧ криодеструкции, были с выраженным подкожным компонентом и отличались довольно интенсивным ростом.

Область образования облучалась СВЧ полем с помощью контактного излучателя с последующей криодеструкцией. Выбор режима облучения и аппарата для облучения зависит от объема гемангиомы и высоты ее над уровнем кожи. Так, при опухоли  $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$ , целесообразно применять аппараты с диаметром излучателя 35 мм. Это обусловлено тем, что длина волны в воздухе равна 12,6 см, а в тканях она уменьшается в 9 раз и, следовательно, проникающей способности электромагнитного поля вполне достаточно для дестабилизации водной решетки биологических тканей на глубину  $\sim 20 \text{ мм}$ . Мощность излучения оптимальна в пределах  $1,2 \dots 1,5 \text{ Вт/см}^2$ , а продолжительность воздействия составляет 4...5 мин. Если размеры гемангиомы более  $30 \times 30 \times 30 \text{ мм}$ , то лучше использовать аппарат с длиной волны 33 см и глубиной уверенного нагрева — до 4 см, продолжительность СВЧ облучения в данном случае должна составлять 5...6 мин. После СВЧ воздействия выполнялось локальное замораживание опухоли. При объеме опухоли  $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$  продолжительность криовоздействия составляет 2...3 мин; при размерах опухоли  $30 \times 30 \times 30 \text{ мм}$  — 3...4 мин; при гемангиоме  $50 \times 30 \times 50 \text{ мм}$  — 5...6 мин; при размерах  $50 \times 40 \times 50 \text{ мм}$  — 6...8 мин.

Несмотря на то, что дети легко переносят СВЧ криогенную деструкцию, отмечается более выраженная реакция со стороны мягких тканей. Обширный перифокальный отек после СВЧ криодеструкции, не наблюдаемый после локальной криодеструкции, держится от двух до пяти суток. Осложнения после СВЧ криогенного лечения наблюдались в 2% случаев.

Применение СВЧ криогенного способа лечения дает возможность полностью отказаться от сложных оперативных вмешательств, особенно при локализации гемангиом на лице и шее и добиться хорошего результата (98%) (рис. 5).



**Рис. 5. Ребенок с гемангиомой до и после СВЧ-КРИО лечения**

Занимаясь проблемой лечения гемангиом у детей, авторы столкнулись с группой больных с обширными и глубокими гемангиомами сложной анатомической (критической) локализации (лицо, околоушная область, шея). Эти гемангиомы отличаются определенным своеобразием: бурным ростом сосудистой опухоли, “клинической злокачественностью” течения, характеризующейся разным уровнем деструкции окружающих тканей, изъязвлениями, артериальными кровотечениями [7].

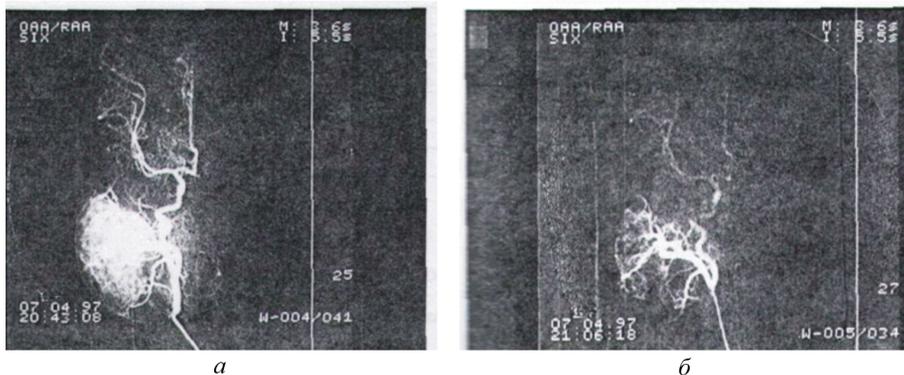
Традиционные хирургические методы при таких гемангиомах почти неизбежно приводят к тяжелой инвалидности, связанной с удалением вместе с опухолью лицевого нерва и полным параличом мимической мускулатуры; а сами операции сопровождаются массивной кровопотерей и опасностью гибели ребенка. И даже попытки перевязки во время операции питающего опухоль сосуда дают очень кратковременный эффект. Лечение указанных гемангиом большими дозами преднизолонa не всегда позволяет надеяться на достижение положительного результата. Склерозирующая терапия оказывается неэффективной. Серьезные надежды были возложены на локальную криодеструкцию с помощью мощных автоматических криогенных систем, однако лечение давало временный положительный эффект, через один-два месяца возникал рецидив сосудистой опухоли. Лечение этой, относительно небольшой группы больных представляет значительные трудности, так как ни один из известных методов лечения не дает желаемого результата.

Поэтому были проведены тщательные исследования в целях установления жизнеспособности больших глубоких и сложных гемангиом у детей. Большой объем опухоли, бурный и длительный ее рост, изъязвления, кровотечения, тяжелые функциональные и косметические дефекты, безрезультатность и опасность традиционных методов лечения — все это потребовало поиска эффективных методов лечения этой группы больных. Такую группу больных со сложными гемангиомами составили 2 000 детей.

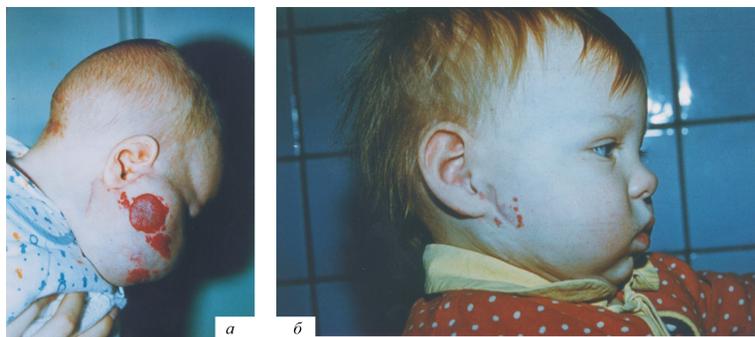
Использование в диагностике обширных и глубоких гемангиом рентгенангиографии позволило обнаружить, что во всех без исключения случаях к основному массиву опухоли подходит крупный артериальный ствол аномального строения, питающий сосудистую опухоль и, вероятно, поддерживающий ее бурный рост. С учетом обнаруженных данных разработана методика рентгеноэндоваскулярной окклюзии, заключающаяся в катетеризации питающего артериального ствола гемангиомы с помощью ангиографической и последующей закупорке дистальных артерий эмболизирующим материалом (сферический и цилиндрический гель от 0,4 до 0,6 мм). Это позволило резко почти полностью перекрыть приток крови к опухоли, а значит, предотвратить унос теплоты из гемангиомы, что создает благоприятные предпосылки для дальнейшего лечения (рис. 6).

На основе полученных данных была разработана концепция лечения обширных и глубоких гемангиом сложной анатомической локализации, заключающаяся в обязательной ангиографии, эмболизации опухоли и последующего лечения (криогенного или СВЧ криогенного).

Принимая во внимание преимущественную локализацию опухолей в проекции лицевого нерва, наиболее целесообразно использовать СВЧ криогенное вмешательство, так как оно гарантирует сохранность лицевого нерва, мимической мускулатуры и контуров лица ребенка. Применяется интраоперационная или чрезкожная криодеструкция с предварительным СВЧ воздействием. Предлагаемый способ интраоперационной, или чрезкожной, криодеструкции с предварительным СВЧ воздействием позволяет в большинстве наблюдений отказаться от тяжелых хирургических вмешательств, сопровождающихся кровопотерей и повреждением ветвей лицевого нерва, а также дефектами тканей на месте удаленной опухоли. В течение пяти-шести месяцев гемангиома исчезала, оставляя после себя участки белесоватой кожи



**Рис. 6.** Рентгенангиографическая картина гемангиомы до (а) и после (б) рентгеноэндоваскулярной окклюзии



**Рис. 7. Ребенок с гемангиомой околоушной области до (а) и после (б) интраоперационной криодеструкции с предварительным СВЧ воздействием**

и атрофические рубцы. Косметические операции были невелики по объему и, естественно, не столь сложны.

К недостаткам этой методики мы отнесли развитие массивных отеков лица продолжительностью до пяти-шести дней, которые исчезали самостоятельно, а также хоть и относительную, но все же хирургическую интервенцию. Положительный результат лечения достигнут в 96 % случаев (рис. 7).

Всего за годы проведения данной работы было выполнено более полумиллиона криогенных и СВЧ криогенных оперативных вмешательств.

Только синтез научных знаний в области техники и медицины помог решить эту проблему. Применение новых КРИО-СВЧ технологий позволило разработать альтернативные методы лечения тяжелых и сложных заболеваний у новорожденных и детей раннего возраста, которые позволяют с успехом лечить детей, ранее подвергавшихся тяжелым и многоэтапным операциям, сохранить ребенку жизнь и внешность, а также предупредить рецидивы заболевания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыганов Д. И. Теоретические и экспериментальные основы, создание криохирургической аппаратуры и медицинских технологий ее применения: Дисс. д-ра техн. наук. – М., 1994. – 315 с.
2. Кандель Э. И. Криохирurgia. – М., 1974. – 303 с.
3. Краковский Н. И., Таранович В. А. Гемангиомы. – М., 1974. – 168 с.
4. Ситковский Н. Б., Гераськин В. И., Шафранов В. В., Новак М. М. Лечение гемангиом у детей жидким азотом. – Киев, 1968. – 120 с.
5. Федореев Г. А. Гемангиомы. – Л., 1974. – 192 с.
6. Комбинированное лечение кавернозных гемангиом у детей / В.В. Шафранов, Ю.В. Тен, Н.В. Куров // Хирургия. – 1987. – № 8. – С. 8–11.
7. Лечение большеобъемных ангиом сложной анатомической локализации / В.В. Шафранов, Ю.А. Поляев, С.В. Дьякова и др. // Проблемы нейростоматологии и стоматологии. – 1997. – № 1. – С. 23–27.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012