

Radioactive Waste: The Resolution of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069 (with account of the Resolution of the Government of the Russian Federation of February 4, 2015 No. 95). Russian (О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов: постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. №1069 в ред. постановления Правительства РФ от 4 февраля 2015 г. №95).

3. Basic Sanitary Rules of Radiation Safety (OSPORB-99/2010) (with account of the Amendment No. 1 to OSPORB-99/2010 introduced by the resolution of the Chief Public Health Official of the Russian Federation of September 16, 2013 No. 43). М., 2010. Russian (СанПиН 2.6.1.2612–10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) (в ред. изменений №1, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16 сентября 2013 г. №43). М.: Роспотребнадзор, 2010).

4. Ivanov EA, Sharov DA, Kuryndin AV. Actual Problems of Classification of Radioactive Waste Generated During Nuclear Energy Application. Nuclear and Radiation Safety Journal 2018; (2): 11–24. Russian (Иванов Е.А., Шаров Д.А., Курьиндин А.В. Актуальные проблемы классификации удаляемых твердых радиоактивных отходов, образующихся при использовании атомной энергии. Ядерная и радиационная безопасность 2018; (2): 11–24).

5. Asmolov VG, Ivanov EA, Barchukov VG, et al. Very Low Level Radioactive Wastes in the System of Safe Radioactive Waste Management. Rosenergoatom Journal 2014; (10): 30–3. Russian (Асмолов В.Г., Иванов Е.А., Барчуков В.Г. и др. Очень низкоактивные радиоактивные отходы в системе безопасного обращения с радиоактивными отходами. Журнал Росэнергоатом 2014; (10): 30–3).

6. IAEA Safety Glossary. Terminology used in Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety: Version 2.0. Vienna, 2006.

7. IAEA, Safety Series No. 89. Principles for the Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control. Vienna, 1988.

8. IAEA, Safety Series No. 111-G-I. I. Classification of Radioactive Waste: A Safety Guide. Vienna, 1994.

9. IAEA TECDOC No. 1067. Organization and Implementation of a National Regulatory Infrastructure Governing Protection against Ionizing Radiation and the Safety of Radiation Sources: Interim Report for Comment. Vienna, 1999.

10. IAEA, Safety Standards Series No. GSG-1. Classification of radioactive waste: safety guide. Vienna, 2009.

11. IAEA TECDOC No. 401. Exemption of radiation sources and practices from regulatory control; Application of the principles to low-level radioactive waste disposal in the terrestrial environment. Vienna, 1987.

12. Sumerling TJ, Sweeney BJ. A review of the Justification for Exemption Orders, and for Other Low-Level Radioactive Waste Disposal Practices. ANS Report 1987; (683-1).

13. UKDOE Report RW-87.069, Department of Environment. London, 1987.

14. Neuder SM, Kennedy WE. Onsite Disposal of Radioactive Waste. NUREG-1101. Vol. 2. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington DC, 1987.

15. Radioactive Substances Act, 1993 (Statutory Instrument 2010 No. 675 Environmental Permitting (England and Wales) Regulations).

16. OECDJ 996 The international INTRAVAL Project. Final results, Swedish Nuclear Power Inspectorate and OECD/NEA. Paris, 1996.

17. Ordinance respecting protection against injury from ionizing radiations (Radiation Protection Ordinance) of 13 October 1976 (with account of the Ordinance to amend the Radiation Protection Ordinance (of 13 Oct. 1976) of 18 August, 1997), Bundesgesetzblatt.

18. Basic Safety Regulation. Regulation No. 1.2. SINN 3210, 1984.

19. Second National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, DOE/EM-0654, 2005.

20. U.S. Nuclear Regulatory Commission Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste: Code of Federal Regulations, Title 10, Part 61. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1987.

УДК 612.563+57.089+57.084

Оригинальная статья

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ИЗМЕНЕНИЙ ДАННЫХ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА КОЖИ ЛАБОРАТОРНЫХ КРЫС

А. В. Даценко — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, заведующий лабораторией экспериментальной патологии и статистического прогнозирования, доктор медицинских наук.

DETERMINING THE RELATIONSHIP OF CHANGES IN INFRARED THERMOGRAPHY DATA AND MORPHOMETRIC PARAMETERS OF THE MICROVASCULATURE OF LABORATORY RATS' SKIN

A. V. Datsenko — State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Head of Laboratory of Experimental Pathology and Statistical Prediction, DSc.

Дата поступления — 25.07.19 г.

Дата принятия в печать — 05.12.2019 г.

Даценко А. В. Определение взаимосвязей изменений данных инфракрасной термографии и морфометрических параметров микроциркуляторного русла кожи лабораторных крыс. Саратовский научно-медицинский журнал 2019; 15 (4): 976–982.

Цель: определение количественных морфофункциональных взаимосвязей изменений морфометрических параметров микроциркуляторного русла и показателей дистанционной инфракрасной термографии кожи хвоста лабораторных крыс. **Материал и методы.** С помощью инфракрасной термографии измеряли температуру поверхности кожи у основания хвоста 32 крыс и забирали материал для подготовки гистологических препаратов тех же участков кожи. При морфометрическом исследовании определяли диаметр микрососудов поверхностных и более глубоких слоев дермы. **Результаты.** Изменения морфофункциональных показателей характеризовались корреляционными связями средней силы. Уменьшение просвета функционирующих микрососудов

на 10% сопровождалось снижением температуры поверхности кожи на 0,3 °С. Понижение температурных показателей до –2 °С обусловлено сокращением кровотока при дилатации микрососудов до 60% с признаками застойного полнокровия и стаза. Повышение температуры поверхности кожи на 0,6 °С сопровождалось усилением периферического кровотока в виде расширения просвета микрососудов на 5–10%. При возрастании температуры поверхности кожи на 2,4 °С происходило практически двукратное увеличение диаметра микрососудов. **Заключение.** Данные инфракрасной термографии можно использовать в качестве критерия для диагностической и прогностической оценки состояния и степени выраженности изменений кожного периферического кровотока у лабораторных крыс.

Ключевые слова: инфракрасная термография, тепловидение, микроциркуляторное русло кожи крысы.

Datsenko AV. Determining the relationship of changes in infrared thermography data and morphometric parameters of the microvasculature of laboratory rats' skin. Saratov Journal of Medical Scientific Research 2019; 15 (4): 976–982.

Purpose: determination of quantitative morphological and functional relationships between changes in the morphometric parameters of the microvasculature and indicators of remote infrared thermography of the tail skin of laboratory rats. **Material and Methods.** Using infrared thermography, the skin surface temperature was measured at the base of the tail of 32 rats and material was taken to prepare histological preparations of the same skin areas. A morphometric study determined the diameter of the microvessels of the superficial and deeper layers of the dermis. **Results.** Changes in morphological and functional indicators were characterized by correlation bonds of medium strength. A 10% decrease in the lumen of functioning microvessels was accompanied by a 0.3 °C decrease in skin surface temperature. The decrease in temperature indicators to –2 °C was due to a decrease in blood flow during microvascular dilatation to 60% with signs of congestive congestion and stasis. An increase in skin surface temperature by 0.6 °C was accompanied by an increase in peripheral blood flow in the form of an expansion of the microvessel lumen by 5–10%. With an increase in skin surface temperature by 2.4 °C, there was an almost twofold increase in the diameter of microvessels. **Conclusion.** Infrared thermography data can be used as a criterion for diagnostic and prognostic assessment of the status and severity of changes in cutaneous peripheral blood flow in laboratory rats.

Key words: infrared thermography, thermal imaging, rat skin microvasculature.

Введение. Острые эффекты во время и в ранние сроки после воздействия экстремальных факторов разной природы в основном проявляются качественно однотипными, в зависимости от степени выраженности, функциональными кратковременными, обратимыми или стойкими неспецифическими изменениями и нарушениями системы кровообращения, преимущественно периферической ее части, включающей систему микроциркуляции крови. Функциональные и патологические перестройки рабочих клеточных и тканевых структур центральной нервной системы (ЦНС) и жизненно важных внутренних органов при этом обусловлены возникающей гипоксией из-за изменений периферического кровотока, приводящих к ограничениям поступления кислорода, удаления углекислого газа и метаболитов. В конечном итоге в ранние сроки после воздействия преимущественно сосудистые нарушения определяют отклонения в состоянии работоспособности и физической выносливости организма.

При проведении комплексных экспериментальных медико-биологических исследований по оценке эффектов неблагоприятного действия на биообъекты малоизученных, в том числе экстремальных факторов различной природы одними из основных показателей состояния организма являются данные об изменениях температуры тела во время, в ранние сроки и в динамике после воздействия.

Температура поверхности тела является интегральным показателем здоровья, функционального состояния человека и широко используется в качестве критерия при решении задач медицинской диагностики [1]. Любое патологическое состояние локально или генерализованно затрагивает процессы теплопродукции и теплообмена в организме [2]. Основным фактором, определяющим температуру органов и частей тела живого организма, является уровень тканевого кровотока по сосудам микроциркуляторного русла (МЦР).

Одним из способов измерения температуры является метод дистанционной инфракрасной термографии (ИКТ), позволяющий в динамике количественно бесконтактно (неинвазивно) оценить состояние периферической гемодинамики у биообъектов, находящихся в свободном поведении без применения наркоза и инструментальных процедур [3]. Наиболее подходящим объектом для термографического исследования является хвост лабораторных крыс, кожа которого выполняет основную функцию терморегуляции у грызунов и на котором отсутствует густой волосяной покров, что не требует проведения предварительной депиляции.

В экспериментальных медицинских исследованиях по оценке эффективности и безопасности воздействия различных факторов объективными количественными показателями состояния микроциркуляции крови являются морфометрические параметры МЦР на гистологических препаратах органов и тканей биообъектов, которые характеризуют тонус (констрикция, дилатация) и степень кровенаполнения микрососудов ткани [4].

Цель: определение количественных морфофункциональных взаимосвязей изменений морфометрических параметров микроциркуляторного русла и показателей дистанционной инфракрасной термографии поверхности кожи хвоста лабораторных крыс.

Материал и методы. В качестве объектов термографических и гистологических исследований использовали 32 белых беспородных крыс-самцов весом 160–180 г, полученных из питомника ООО «БИТИС» (Московская обл., Сергиево-Посадский р-н, д. Шапилово). Животных содержали в стандартных конвенциональных условиях вивария при свободном доступе к воде и пище (комбикорм).

Неинвазивную динамическую ИКТ поверхности кожи хвоста крыс проводили с помощью тепловизора Flir SC660 (Flir, Швеция) в лабораторных условиях при температуре воздуха 18–24 °С и относительной влажности 60–75%. Расстояние от объектива тепловизора до объекта исследования составляло 50 см. Температурные показатели поверхности кожи ре-

Ответственный автор — Даценко Алексей Валентинович
Тел.: +7 (905) 5543783
E-mail: av.datsenko@fmbcfmba.ru, lab92@mail.ru

гистрировали на участке хвоста на удалении 1 см от его основания (рис. 1).

Материал для гистологического исследования брали после термографического обследования у наркотизированных крыс после внутрибрюшинного введения препарата Золетил-100 из расчета 50 мг/кг. Участок проксимальной части хвоста на удалении 1 см от его основания толщиной 0,3–0,5 см фиксировали в 10%-м нейтральном формалине. Проводку и заливку материала в парафиновые блоки проводили с помощью тканевого процессора Shandon Excelsior ES и заливочной станции Microm TS-350 (Thermo Scientific, США). Парафиновые поперечные срезы кожи готовили с помощью ротационного микротомы Microm HM-355S, которые окрашивали гематоксилином и эозином в автомате карусельного Shandon Varistain 24–4.

Основным морфометрическим показателем состояний вазоконстрикции и вазодилатации является поперечный диаметр сосудов. Морфометрическое исследование гистологических препаратов кожи биообъектов включало определение поперечного диаметра микрососудов (капилляров, прекапилляров, посткапилляров, артериол и венул), содержащих эритроциты, поверхностного слоя дермы (на глубине до 30 мкм от сосочкового слоя эпидермиса) и более глубокого слоя на удалении от 30 до 120 мкм от нижнего края эпидермиса при увеличении объектива микроскопа 40 не менее чем в 10 полях зрения (рис. 2). Для каждого биообъекта определяли среднее значение диаметра функционирующих микрососудов капиллярного типа, расположенных на разной глубине от поверхности кожи.

Современные функциональные тесты для оценки состояния микроциркуляции крови основаны на физических принципах регистрации движения и определения количества эритроцитов внутри микрососудов [5]. Это подтверждает целесообразность проведения избирательного морфометрического исследования микрососудов, содержащих красные кровяные клетки (эритроциты) в МЦР органов и тканей на гистологических препаратах. Результаты термографических и морфометрических исследований микроциркуляции крови также были сопоставлены с ранее полученными данными лазерной доплеровской флоуметрической (ЛДФ) оценки периферического кожного кровотока [6].

Для сравнительного анализа и сопоставления экспериментальных данных использовали показатели разности и отношения индивидуальных термографических и морфометрических параметров к соответствующим средним значениям группы биообъектов. Морфофункциональные зависимости определяли с помощью статистических методов корреляционно-регрессионного анализа (встроенные статистические функции офисного пакета Microsoft Excel и прикладное программное обеспечение StatBase).

Процедуры экспериментов на животных соответствовали требованиям Хельсинкской декларации 1975 г. (пересмотр 1983 г.).

Результаты. Температура поверхности кожи у основания хвоста экспериментальных биообъектов находилась в пределах 28,6–32,4 °С. Диапазон температурных изменений относительно среднего значения 30,3 °С составлял $\pm 2,0$ °С. Диаметр просвета микрососудов кожи крыс в среднем был равен 6,0 мкм при диапазоне варьирования 1,1–18,9 мкм. При этом диаметр микрососудов у биообъектов в целом однотипно изменялся в зависимости от глубины

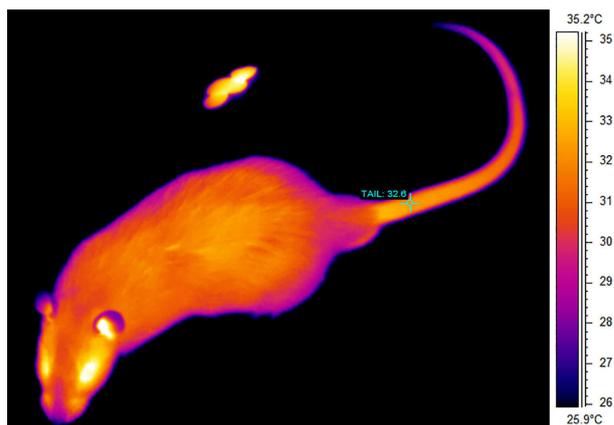


Рис. 1. Дистанционная инфракрасная термография поверхности кожи хвоста крыс

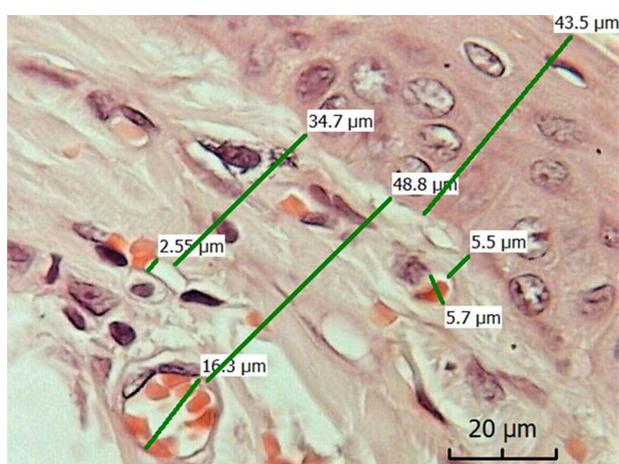


Рис. 2 Морфометрические параметры микроциркуляторного русла кожи хвоста крыс. Окраска гематоксилином и эозином. Ув. об. 40

их расположения в дерме кожи, что соответствует анатомической структуре сосудистой сети основных жизненно важных органов. В толще органа находятся более крупные магистральные, артериоларные и венулярные сосуды, а капиллярные микрососуды в основном преобладают в поверхностных слоях дермы кожи. Эволюционно данная структура сосудистой сети обеспечивает защиту крупных сосудов и минимизацию кровопотери при травматических повреждениях и ранениях с нарушением целостности кожных покровов.

Для оценки взаимосвязей изменений температуры и диаметра сосудов МЦР были определены морфофункциональные корреляции и статистические зависимости изменений термографических показателей поверхности кожи и морфометрических параметров состояния кожной периферической гемодинамики у экспериментальных биообъектов. Установлены однотипные парные параболические регрессионные кривые изменений показателей температуры поверхности кожи хвоста крыс в зависимости от диаметра микрососудов, расположенных на разной глубине от поверхности кожи, при использовании в качестве исходных данных отношения индивидуальных показателей к среднегрупповым статистическим параметрам (рис. 3).

Зависимости характеризовались корреляционной связью средней силы (коэффициент корреля-

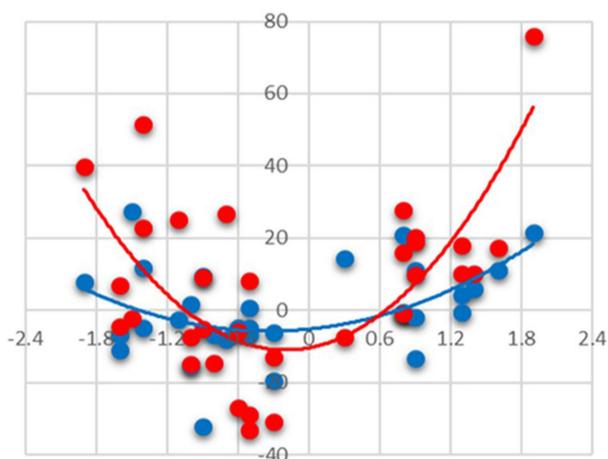


Рис. 3. Зависимости изменений диаметра микрососудов дермы и температурных показателей поверхности кожи хвоста

Примечание: по оси абсцисс — отрицательный и положительный прирост температуры (°C); по оси ординат — изменения диаметра микрососудов относительно среднегрупповых показателей (%); красные линии и точки — полиномиальный тренд и индивидуальные средние значения для микрососудов глубокого слоя дермы (более 30 мкм); синие — поверхностного слоя (менее 30 мкм).

ции $r=0,47$ для поверхностного слоя дермы и $r=0,69$ для глубокого слоя). Значительно лучшие статистические показатели аппроксимации были получены при сопоставлении данных ИКТ и морфометрических параметров микрососудов глубоких слоев кожи по сравнению с поверхностной сосудистой сетью.

Уравнение регрессии изменений диаметра сосудов МЦР более глубоких слоев кожи хвоста крыс в зависимости от величин прироста температуры имеет вид:

$$\Delta D = -10,4 + 6,0 \Delta T + 15,4 \Delta T^2$$

(коэффициент детерминации $R^2=47,5\%$; $r=0,69$; коэффициент Фишера для модели $F=13,1$; степени свободы $DF=2/29$; уровень значимости $p<0,001$), где ΔT — прирост (отрицательный или положительный) температуры поверхности кожи хвоста (°C); ΔD — изменения диаметра микрососудов относительно среднегруппового показателя (%).

Установленная параболическая регрессионная зависимость свидетельствует о том, что уменьшение просвета функционирующих микрососудов на 10% сопровождалось снижением температуры поверхности кожи на 0,3 °C. Дальнейшее снижение температурных показателей до -2 °C обусловлено в большей степени более выраженными явлениями сокращения кровотока при дилатации микрососудов до 60% с признаками нарастающего застойного полнокровия, стаза, вплоть до сладж-феномена. Повышение температуры поверхности кожи на 0,6 °C сопровождалось показателями усиления периферического кровотока в виде расширения просвета микрососудов на 5–10%. При возрастании температуры поверхности кожных покровов на 2,4 °C происходило практически двукратное увеличение диаметра микрососудов на 80–90%. Подобные явления функциональной гиперемии и усиления микрокровотока могут иметь место на начальных этапах эритемы, местных воспалительных процессов, при максимальных функциональных и физических нагрузках.

Существенно большее влияние на температурные показатели поверхности кожи хвоста экспериментальных биообъектов оказывают изменения

просвета более крупных микрососудов, в основном посткапилляров и венул, расположенных в глубоких слоях дермы кожи, за счет того, что в их просвете одновременно может находиться несколько эритроцитов. В просвете капилляров, преобладающих в поверхностных слоях дермы, могут отсутствовать или располагаться единичные часто меняющие свою форму (в основном вытянутые вдоль продольной оси сосуда) эритроциты.

В ранее проведенных сравнительных исследованиях изменений термографических и флоуметрических показателей кожной периферической гемодинамики установлено, что снижение тканевого кровотока сопровождалось уменьшением температуры, при усилении перфузии крови по путям микроциркуляции происходило увеличение температуры поверхности кожных покровов хвоста лабораторных крыс. Сопоставление выявленной параметрической зависимости с результатами морфометрического анализа сосудов МЦР кожи (рис. 4) свидетельствует о том, что снижение уровня периферического кровотока и уменьшение температуры поверхности кожи, указывающие, в частности, на развитие гипоксии, могут происходить не столько за счет сужения просвета, констрикции и спазма кожных сосудов, сколько за счет застойного полнокровия, венозной гиперемии, стазов с повышенной агрегацией эритроцитов, процессов сладж-феномена. В данных случаях просвет сосудов увеличивается, имеется дилатация разной степени выраженности, вплоть до их паретического расширения.

Обсуждение. В настоящее время наиболее совершенным методом регистрации температурных показателей тела человека считается метод ИКТ [3, 7, 8]. ИКТ является неинвазивным диагностическим инструментом и методом мониторинга, позволяющим оценивать физиологические изменения, распределение температуры изучаемой поверхности; определенные анатомические перестройки также фиксируют на термоизображении. Обработка термограмм и сопоставление со статусом болезни позволя-

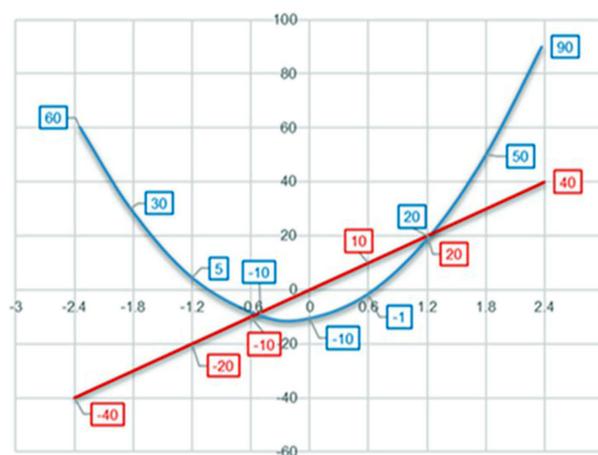


Рис. 4. Зависимости изменений микроциркуляции крови, диаметра микрососудов дермы и температуры поверхности кожи хвоста лабораторных крыс

Примечание: по оси абсцисс — отрицательный и положительный прирост температуры (°C); по оси ординат — изменения уровня периферического кровотока по данным лазерной доплеровской флоуметрии и морфометрических параметров диаметра микрососудов (%); красные линии и цифры в рамках — изменения уровня микроциркуляции крови по данным лазерной доплеровской флоуметрии; синие — изменения диаметра микрососудов дермы.

ет контролировать течение заболеваний и оценивать эффективность их лечения. Термография помогает идентифицировать изображения без надлежащих настроек освещения [2, 7, 9].

Определение точных фактических температур биообъектов, особенно в полевых условиях, считается трудной задачей. Это связано в определенной мере с физическими основами ИКТ, которая должна учитывать в совокупности несколько параметров, позволяющих произвести измерение абсолютной температуры. На температурные показатели оказывают влияние, в частности, факторы окружающей среды. В связи с этим абсолютные термографические измерения производят только в тех случаях, когда требуется очень точное измерение температуры. Поскольку практически всегда нецелесообразно определять точную температуру каждого биообъекта, в качестве альтернативы используют более практичный метод сравнительной количественной термографии, который является эффективным методом для оценки состояния биообъектов путем сравнения индивидуальных значений температуры животных экспериментальной группы с «эталонными» средними значениями контрольных групп или выбранной группы сравнения. Показателями сравнения являются разницы температур. При этом условия окружающей среды для подопытных и контрольных экспериментальных биообъектов должны быть одинаковыми. Разность температур для конкретного биообъекта фиксируется как превышение или понижение уровня температуры относительно среднего значения контрольной группы. Количественное измерение дает возможность определить степень выраженности изменений или тяжести повреждений.

При применении ИКТ для контроля состояния и диагностики патологии у биообъектов необходимо использовать критерии оценки, которые позволяют идентифицировать уровни температуры или анатомические области с измененной температурой по отношению к уровню критичности, и они могут быть применены к группам подобных биообъектов. Тепловизор позволяет пользоваться критерием разности температуры и классифицировать разную степень выраженности аномалии по температурным показателям. Эти критерии указывают на превышение или понижение температуры выше или ниже определенного базисного (контрольного) уровня. Интерпретация термограммы представляет собой процесс сравнения показателей температуры биообъекта с критериями оценки по заданным градициям функциональных изменений и патологических состояний организма.

Основными факторами, влияющими на изменения температуры кожи, являются состояние сосудистой системы и уровень микроциркуляции крови. Увеличение притока крови или его уменьшение, вызванное сужением сосудов или их закупоркой, приводят к возникновению изменений локальной температуры. Наличие патологических процессов ведет к изменениям величины и распределения температуры, причем эти изменения часто опережают другие клинические проявления, что важно для ранней диагностики и своевременного лечения заболеваний [7, 8, 10]. Данные динамического дистанционного термографического исследования разных видов животных используют для оценки нарушений периферического кровообращения [11]. ИКТ кожи хвоста мыши предоставляет информацию о вазомоторном тоне сосудистой сети [3].

Одним из наиболее надежных применений ИКТ является оценка роли термоэффекта в оболочках специализированных органов с потерей тепла, таких как хвост у мышей и крыс, ухо у морских свинок и кроликов, руки у людей [3]. В частности, ИКТ используют в качестве меры вазомоторного тонуса для выявления наличия или отсутствия вазоконстрикции или вазодилатации. Кожа играет важную роль в регулировании температуры (терморегуляции) и является самым большим органом в организме человека. Кожа также защищает другие органы от различных травм (механических воздействий, различных излучений, химикатов и т.д.).

Значительную часть поверхности кожи экспериментальных биообъектов покрывает шерсть. У крыс все тело, кроме хвоста, кистей и ступней, густо покрыто волосами. Бритье и процедуры удаления волос раздражают кожу и могут привести к воспалению и локальным изменениям температуры. Кожа хвоста разных линий лабораторных крыс не содержит волос и потовых желез. Хвост практически постоянно находится в поле зрения при любом положении животного (за исключением позиций, когда биообъект сидит на нем) и может быть без дополнительных помех и искажений, а также без депиляции использован для дистанционной бесконтактной термографической оценки микрососудистых изменений и нарушений.

ИКТ использовали для неинвазивной оценки реакции острого стресса у различных видов животных [12, 13]. Когнитивные и аффективные состояния сильно влияли на кровоток. При термографических исследованиях острых реакций на стресс выявлено значительное снижение температуры кожи хвоста и повышение температуры глаз, коррелирующих с показателями тревожно-фобических состояний при тестировании мышей и крыс в «Открытом поле» и «Приподнятом крестообразном лабиринте» [14, 15].

В последнее время наблюдается устойчивый рост использования тепловизионных камер для выявления корреляционных взаимосвязей между изменениями различных физиологических показателей и параметрами температуры кожи [7]. Корреляционная связь установлена между изменениями температуры ядра и данными ИКТ фронтальной и боковой поверхности лица и лба [16]. С помощью ИКТ регистрируют температуру поверхности областей и частей тела человека и животных, которая по абсолютным величинам отличается от температуры ядра тела живых организмов. При этом необходимо учитывать, что различные процедуры измерений внутренней температуры тела биообъектов (ручные манипуляции, относительно длительная иммобилизация, использование инородных тел в виде ректальных и ушных термометров, контактных аппликаторов, операции под общим наркозом для имплантации и вживления термодатчиков) сами по себе являются стрессорными и могут вызывать существенные температурные изменения и послеоперационные осложнения у лабораторных животных.

Корреляционные взаимосвязи установлены между термографическими показателями и данными измерений с помощью ЛДФ кожной тканевой перфузии [17]. С помощью ИКТ орбитальной области возможно неинвазивное косвенное измерение температуры мозга [18]. Различные эмоциональные нагрузки приводят к тому, что кровь течет из смежных областей лица в мозг, что приводит к изменению температуры лица. Различные области лица (кожа края носа, над глазами и в центре лба) являются эффективными

ми индикаторами температуры. Проведены экспериментальные исследования на крысах для определения временной зависимости цереброкорткального микропотока, измеряемого с помощью ЛДФ, и изменений температуры поверхности мозга с использованием инфракрасной камеры. Выявлена значительная положительная корреляция между максимальными изменениями перфузии и температуры мозга [19].

Результатами проведенного исследования подтверждаются данные о том, что в регуляции температуры кожи в основном участвуют более крупные микрососуды, расположенные глубже в дерме [5]. Исходя из установленных зависимостей, отмечено, что снижение температуры поверхности кожи хвоста не сопровождалось существенным уменьшением просвета капиллярных микрососудов, характеризующим сокращение тканевого кровотока в результате вазоконстрикции. Необходимо указать, что сосуды капиллярного типа, составляющие подавляющую часть МЦР, не имеют нервно-мышечного аппарата, позволяющего им активно сокращаться [20]. Изменения их просвета носят пассивный характер и зависят от степени их кровенаполнения, онкотического давления, оказываемого на стенки сосудов со стороны окружающей ткани, а также наличия в тканях и в содержимом сосудов биологически активных гуморальных факторов, влияющих в основном на проницаемость стенок гистогематических барьеров. В частности, существенное уменьшение диаметра капилляров может иметь место только при отсутствии в их просвете клеток красной крови (эритроцитов). Снижение капиллярного кровотока, регистрируемого с помощью физиологических методов исследования типа ЛДФ, происходит за счет спазма артериол и прекапиллярных сфинктеров, уменьшения количества функционирующих микрососудов, снижения их кровенаполнения и шунтирования кровотока по артериоловеноулярным анастомозам. Вазоконстрикция характерна для артериолярного звена, составляющего малую часть МЦР и редко встречающегося на гистологических препаратах кожи. Явления спазма артериол и морфологические эквиваленты активных вазомоций также практически не встречаются даже при исследовании тотальных препаратов серозных оболочек, где в отличие от гистологических срезов все компоненты МЦР представлены на плоскости как единое целое.

Использование динамической дистанционной ИКТ биообъектов может найти применение для оценки эффективности и безопасности широкого спектра воздействий полезных или вредных и опасных факторов на живой организм, связанных с тепловыми и холодowymi экстремальными нагрузками; лечебными и физиотерапевтическими процедурами; экстремальными климатическими условиями; ионизирующими и неионизирующими излучениями, включая оптические, электромагнитные поля тепловых и нетепловых уровней мощности, магнитными, ультразвуковыми, барическими факторами; действием различных фармакологических средств, химических и биологически активных веществ. Внедрение ИКТ в экспериментальную медицину является одним из направлений развития высокоэффективных методов диагностики, обеспечивающих контроль температурного состояния биообъектов без какого-либо вмешательства и выявление патологических изменений на ранней стадии их развития.

В экспериментальной медицине ИКТ может быть использована в качестве метода изучения физиоло-

гии и патологии периферических сосудов, позволяющего наглядно и бесконтактно контролировать эффективность и безопасность воздействия на живой организм различных факторов, объективно определять степень тяжести повреждений и прогнозировать состояние подопытных биообъектов в динамике после воздействия, включая возможности оценки риска развития отдаленных последствий и определения эффективных способов коррекции сосудистых нарушений.

Заключение. Определены параметры регрессионных зависимостей изменений термографических данных и морфометрических показателей диаметра сосудов МЦР ткани кожи хвоста лабораторных крыс. Морфофункциональные взаимосвязи для микрососудов, расположенных на разной глубине от поверхности кожи, были идентичными и характеризовались корреляционными связями средней силы. Установленная параболическая регрессионная зависимость свидетельствует о том, что уменьшение просвета функционирующих микрососудов на 10% сопровождалось снижением температуры поверхности кожи на 0,3 °С. Снижение температурных показателей до -2 °С было обусловлено в большей степени наличием более выраженных явлений сокращения кровотока при дилатации микрососудов до 60% с признаками нарастающего застойного полнокровия и стаза. Повышение температуры поверхности кожи на 0,6 °С сопровождалось показателями усиления периферического кровотока в виде расширения просвета микрососудов на 5–10%. При возрастании температуры поверхности кожных покровов на 2,4 °С происходило практически двукратное увеличение диаметра микрососудов на 80–90%.

Установленные диапазоны изменений термографических показателей являются грациями параметрических температурных параметров, характеризующих состояния и изменения периферического кровотока в коже у лабораторных крыс. Метод ИКТ позволяет проводить оценку степени выраженности изменений микроциркуляции крови кожных покровов и на основе параметрических зависимостей прогнозировать вероятность возникновения острых нарушений периферической гемодинамики у экспериментальных биообъектов во время и в ранние сроки после воздействия различных экстремальных факторов.

Конфликт интересов не заявляется.

Авторский вклад: концепция и дизайн исследования, получение и обработка данных, анализ и интерпретация результатов, написание статьи, утверждение рукописи для публикации — А. В. Даценко.

References (Литература)

1. Ring EF, Ammer K. Infrared thermal imaging in medicine. *Physiol Meas* 2012; 33 (3): 33–46.
2. Morozov AM, Mokhov EM, Kadykov VA, Panova AV. Medical thermography: capabilities and perspectives. *Kazan Medical Journal* 2018; 99 (2): 264–70. Russian (Морозов А. М., Мохов Е. М., Кадыков В. А., Панова А. В. Медицинская термография: возможности и перспективы. *Казанский медицинский журнал* 2018; 99 (2): 264–70).
3. Meyer CW, Ootsuka Y, Romanovsky AA. Body temperature measurements for metabolic phenotyping in mice. *Front Physiol* 2017; 8: 520.
4. Datsenko AV, Shikhodyrov VV. Automatic image analysis in the study of the microcirculatory bed. *Arkhiv Patologii* 1986; 48 (10): 75–8. Russian (Даценко А. В., Шиходыров В. В. Автоматический анализ изображений в исследовании микроциркуляторного русла. *Архив патологии* 1986; 48 (10): 75–8).

5. Allen J, Howell K. Microvascular imaging: Techniques and opportunities for clinical physiological measurements. *Physiol Meas* 2014; 35 (7): 91–141.
6. Datsenko AV, Fomina TV, Dyoshin IA, Kazmin VI. Investigation of the relationship between changes in thermographic and flowmetric parameters of skin peripheral hemodynamics in laboratory rats. *Saratov Journal of Medical Scientific Research* 2017; 13 (4): 901–7. Russian (Даценко А. В., Фомина Т. В., Дёшин И. А., Казьмин В. И. Исследование взаимосвязи изменений термографических и флоуметрических показателей состояния кожной периферической гемодинамики у лабораторных крыс. *Саратовский научно-медицинский журнал* 2017; 13 (4): 901–7).
7. Lahiri BB, Bagavathiappan S, Jayakumar T, Philip J. Medical applications of infrared thermography: A review. *Infrared Physics & Technology* 2012; 55 (4): 221–35.
8. Kozhevnikova IS, Pankov MN, Gribov AV, et al. The use of infrared thermography in modern medicine (Literature review). *Human Ecology* 2017; (2): 39–46. Russian (Кожевникова И. С., Панков М. Н., Грибов А. В. и др. Применение инфракрасной термографии в современной медицине (обзор литературы). *Экология человека* 2017; (2): 39–46).
9. Kumar US, Sudharsan NM. Non invasive detection of abnormalities using thermal image. *Int J Pharm Technol* 2017; 9 (2): 29524–32.
10. Potekhina YuP, Golovanova MV. The reasons of the change of local body temperature. *Medical Almanac* 2010; 11 (2): 297–8. Russian (Потехина Ю. П., Голованова М. В. Причины изменения локальной температуры тела. *Медицинский альманах* 2010; 11 (2): 297–8).
11. Konoplev VA, Gorokhov VE, Bokarev AV, Kovalev SP. Infrared thermography of the pathology of the distal part of the limbs of household and agricultural animals. *International bulletin of Veterinary Medicine* 2018; (1): 93–7. Russian (Коноплев В. А., Горохов В. Е., Бокарев А. В. Инфракрасная термография патологии дистальной части конечностей домашних и сельскохозяйственных животных. *Международный вестник ветеринарии* 2018; (1): 93–7).
12. Rekant SI, Lyons MA, Pacheco JM, et al. Veterinary applications of infrared thermography. *Am J Vet Res* 2016; 77 (1): 98–107.
13. Stewart M, Webstert JR, Schaefer AL, et al. Infrared thermography as a non-invasive tool to study animal welfare. *Anim Welfare* 2005; 14 (4): 319–25.
14. Vianna DM, Carrive P. Changes in cutaneous and body temperature during and after conditioned fear to context in the rat. *Eur J Neurosci* 2005; 21 (9): 2505–12.
15. Lecorps B, Rödel HG, Féron C. Assessment of anxiety in open field and elevated plus maze using infrared thermography. *Physiol Behav* 2016; 157: 209–16.
16. Cheung BM, Chan LS, Lauder IJ, Kumana CR. Detection of body temperature with infrared thermography: accuracy in detection of fever. *Hong Kong Med J* 2012; 18 (3): 31–4.
17. Sagaidachnyi AA, Fomin AV. Analysis of time derivative of the temperature response of fingers on the brachial occlusion and its relationship with hemodynamic parameters. *Regional blood circulation and microcirculation* 2017; 16 (3): 31–40. Russian (Сагайдачный А. А., Фомин А. В. Анализ временной производной температурной реакции пальцев рук на плечевую окклюзию и ее взаимосвязь с параметрами гемодинамики. *Регионарное кровообращение и микроциркуляция* 2017; 16 (3): 31–40).
18. DiLeo T, Roberge RJ, Kim JH. Effect of wearing an N95 filtering facepiece respirator on superomedial orbital infrared indirect brain temperature measurements. *J Clin Monit Comput* 2017; 31 (1): 67–73.
19. Zębala M, Kaczmarska K, Bogucki J, et al. Intraoperative assessment of cerebral blood flow changes in normal and pathological brain tissue using an infrared camera. *Quantitative Infrared Thermography Journal* 2018; 15 (2): 240–51.
20. Khugaeva VK. Legends and real pattern of microcirculation. *Pathogenesis* 2013; 11 (2): 32–41. Russian (Хугаева В. К. Легенды и реальные закономерности микроциркуляции. *Патогенез* 2013; 11 (2): 32–41).

УДК [57+61]:575.224.232:616–00

Оригинальная статья

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХЦВЕТНОГО FISH-МЕТОДА ОКРАСКИ ХРОМОСОМ ПРИ АНАЛИЗЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ АБЕРРАЦИЙ ХРОМОСОМ: ПИЛОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Е. И. Добровольская — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, врач-генетик специализированной лаборатории цитологии, генетики и иммунологии; **В. Ю. Нугис** — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, заведующий лабораторией радиационной гематологии и цитогенетики, доктор биологических наук; **Г. П. Снигирева** — ФГБУ «Российский научный центр рентгено-радиологии» Минздрава России, заведующая лабораторией молекулярной биологии и цитогенетики, доктор биологических наук; **М. Г. Козлова** — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, научный сотрудник лаборатории радиационной гематологии и цитогенетики; **В. А. Никитина** — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, ведущий научный сотрудник лаборатории радиационной гематологии и цитогенетики, биолог криобанка Центра биомедицинских технологий, кандидат медицинских наук.

USE OF THE TRICOLOR FISH-PAINTING METHOD OF CHROMOSOMES FOR THE ANALYSIS OF RADIATION-INDUCED CHROMOSOMAL ABERRATIONS: A PILOT STUDY

E. I. Dobrovol'skaya — State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Doctor-geneticist of Specialized Laboratory of Cytology, Genetics and Immunology; **V. Yu. Nugis** — State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Head of Laboratory of Radiation Hematology and Cytogenetics, DSc; **G. P. Snigiryova** — Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Head of Laboratory of Molecular Biology and Cytogenetics, DSc; **M. G. Kozlova** — State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Researcher of Laboratory of Radiation Hematology and Cytogenetics; **V. A. Nikitina** — State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Leading Researcher of Laboratory of Radiation Hematology and Cytogenetics, Biologist of Specialized Laboratory of Cytology, Genetics and Immunology of Center for Biomedical Technologies, PhD.

Дата поступления — 25.07.19 г.

Дата принятия в печать — 05.12.2019 г.

Добровольская Е. И., Нугис В. Ю., Снигирева Г. П., Козлова М. Г., Никитина В. А. Использование трехцветного FISH-метода окраски хромосом при анализе радиационно-индуцированных aberrаций хромосом: пилотное исследование. *Саратовский научно-медицинский журнал* 2019; 15 (4): 982–985.