

ВОЗМОЖНОСТИ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕЛОВЕКА (ДЕТЕЙ И ВЗРОСЛЫХ)

Р.С. Андреев¹, Ю.Н. Каленов², А.В. Якушкин³, Е.Б. Акимов⁴, В.Д. Сонькин^{1,5}

¹Институт возрастной физиологии Российской академии образования, Москва, Россия

²МБОУ «Гимназия во имя святителя Иннокентия Пензенского», Пенза, Россия

³Инновационный центр Олимпийского Комитета России, Москва, Россия

⁴Центральная ассоциация лыжников-гонщиков, Верона, штат Висконсин, США

⁵Российский государственный университет физической культуры, спорта, молодежи и туризма, Москва, Россия

Представлены результаты обследования детей, подростков и взрослых мужчин с применением современной инфракрасной тепловизионной техники, позволяющей получать температурные портреты поверхности тела человека, которые отражают активность метаболических процессов и индивидуальные особенности васкуляризации кожных покровов. Показана высокая индивидуальная стабильность термопортрета и одновременно широкое популяционное разнообразие основных температурных характеристик поверхности кожи. С возрастом температура кожи в условиях комнатной температуры (21°C) и мышечного покоя снижается, как и градиент между максимальными и минимальными температурами на выделенной поверхности кожи. Выявлены достоверные корреляции между температурными характеристиками поверхности спины и поверхности груди, ослабевающие с возрастом, что может быть следствием накопления жирового слоя, который экранирует поверхность кожи от потоков тепла из внутренних областей тела. Обнаружена достоверная связь характеристик термопортрета взрослых мужчин с признаками телосложения. Высказано предположение, что часть наиболее горячих зон на поверхности кожи является отражением активности бурой жировой ткани, которая обеспечивает несократительный термогенез при окружающей температуре на несколько градусов ниже термонеutralной.

Ключевые слова: инфракрасная термография; дети, подростки и взрослые; индивидуальная стабильность; популяционное разнообразие; телосложение; бурая жировая ткань

Температуру тела человека принято считать постоянной («гомойотермия» – в отличие от «пойкилотермии» рыб и земноводных). Однако это условно. Температура тела человека в зависимости от его функционального состояния может меняться в диапазоне от 32 до 42°C. В норме в состоянии мышечного покоя сравнительно постоянную температуру (37,5°C с суточными колебаниями в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$) имеет «ядро» тела человека (внутренние органы, головной и спинной мозг). Температура «оболочки» – то есть периферических тканей (кожа, подкожная клетчатка, значительная часть скелетной мускулатуры) значительно ниже и подвержена заметным колебаниям [Иванов, 1990]. К тому же различные участки кожной поверхности имеют неодинаковую температуру, зависящую от многих причин.

В типичных условиях внешней среды тело человека является источником инфракрасного из-

лучения со спектральной плотностью около 10 мкм [Колесов, Воловик, Прилучный, 2008]. Спектр излучения зависит только от температуры кожи и не зависит ни от возраста, ни от пола, ни от степени пигментации или других свойств. На температуру кожи влияют особенности васкуляризации поверхностных тканей, уровень метаболических процессов, теплопроводность подкожных тканей [Брюк, 1996; Марьянович, Цыган, Лобзин, 1997].

В XIX в. и большей части XX в. температуру тела человека в медицинских целях измеряли контактными термометрами различной конструкции – от ртутных и спиртовых до термпар. Это были точные, но точечные измерения. Современные медицинские тепловизоры представляют собой видеокамеры, ведущие запись сигнала в инфракрасном (ИК) диапазоне частот. Это позволяет бесконтактным методом получать динамические ряды кадров инфракрасной съемки значительной части

поверхности тела, и тем самым регистрировать не только мгновенное тепловое состояние, но и его изменения во времени [Колесов, Воловик, Прилучный, 2008; Zontak et al., 1998]. Такие технические возможности открывают совершенно новые перспективы использования тепловизионной техники для раскрытия физиологических механизмов реагирования организма человека на различные возмущающие воздействия. За последние 20 лет благодаря появлению новых компактных моделей тепловизоров медицинская инфракрасная термография (ИКТ) получила широкое распространение как диагностический метод выявления различных заболеваний (аппендицит, атеросклероз, воспалительные заболевания суставов, поражения периферических нервов, нарушения вегетативной регуляции, нарушения сосудистого русла, онкологические заболевания и многие другие). Однако сугубо медицинскими задачами использование ИКТ уже не ограничивается.

Поскольку около половины теплопотерь организма человека осуществляется через кожные покровы с помощью инфракрасного излучения [Иванов, 1990], можно считать, что тепловизор регистрирует реальную интенсивность энергетических процессов во внутренних органах [Сперроу, Сесс, 1971; Макаренко, Бочин, Упырев, 1973; Иваницкий, 2006; Колесов, Воловик, Прилучный, 2008] или в подкожных термогенных структурах [Сонькин и др., 2011]. Это, собственно, и является основанием для использования ИКТ не только в практической медицине, но и при физиологических исследованиях метаболических процессов – например, для выявления активного бурого жира [Cypess, 2009; Акимов с соавт., 2010; Symonds et al., 2012].

Измерение теплового излучения в инфракрасном диапазоне дает истинную температуру только для самого верхнего слоя кожи [Merla, Romani, 2006]. Эти данные позволяют лишь опосредованно судить о температуре подлежащих тканей, и только в тех случаях, когда тепловые потоки из глубины тела «проецируются» на кожные покровы [Шехтер, Розенфельд, Терновой, 1987].

Симметричное либо асимметричное распределение температур по поверхности тела (относительно вертикальной осевой линии) является важным диагностическим признаком [Иваницкий, 2006; Колесов, 2006; Шпилевский, 1977; Merla, Romani, 2006]. Нарушения симметрии могут быть следствием необычных структурных особенностей сосудистой сети, местных изменений тонуса сосудов и кровообращения при различных функциональных пробах, локальных изменений теплопродукции, а также изменения теплопроводности

тканей [Brown, 1992; Sherman, Woerman, Karstetter, 1996].

Факторы, влияющие на применение ИКТ в исследованиях человеческого организма

Поскольку инфракрасное излучение может производиться множеством источников в окружении человека, а также может изменяться под воздействием множества факторов, для стандартизации условий его измерения при проведении диагностических исследований на человеке необходимо учитывать влияние как минимум трех групп факторов:

1. Факторы окружающей среды (место проведения процедуры).
2. Индивидуальные факторы, влияющие на температуру кожи.
3. Технические факторы (свойства оборудования).

Первая группа – это те факторы, которые относятся к характеристикам окружающей обстановки, где происходит исследование. Эти факторы очень важны и, как правило, контролируются – для этого необходимо лишь стандартизовать протокол.

Количество индивидуальных факторов столь огромно, и они настолько разнообразны и сложны по своей структуре, что контролировать их не представляется возможным. Однако их необходимо учитывать при интерпретации результатов ИКТ.

Эта группа факторов может быть разделена на «внутренние», которые включают в себя морфофункциональные особенности и специфику состояния организма испытуемого, и «внешние» факторы, являющиеся временными и обычно связанные с личными привычками или ежедневной деятельностью испытуемых.

К внутренним факторам, в частности, относятся основные индивидуальные особенности испытуемых, которые имеют отношение к биологическим и анатомическим параметрам: возраст, пол, состояние здоровья, телосложение и т.п. Влияние многих из них неоднозначно.

Внешние факторы, которые влияют на температуру кожной поверхности, можно подразделить на:

- (1) факторы, которые связаны с потреблением каких-либо веществ,
- (2) нелекарственные факторы, которые связаны с лечением (массаж, физиотерапия и т.п.), и
- (3) факторы, которые связаны с физической активностью пациента.

Таблица 1. Возрастные и антропометрические характеристики (M+m) испытуемых разных возрастных групп

Показатель	Возраст, лет	Длина тела, см	Масса тела, кг	ИМТ кг/м ²
Мальчики, n = 29	8,8 ± 0,8	132,7 ± 7,7	32,9 ± 9,7	18,4 ± 4,2
Подростки, n = 165	16,4 ± 0,9	179,6 ± 6,9	68,4 ± 12,4	21,9 ± 3,7
Мужчины, n = 53	23,5 ± 0,67	174 ± 0,96	70 ± 1,58	22,8 ± 0,38

Третья большая группа факторов связана с техническими характеристиками используемого оборудования: разрешающая способность, чувствительность, скорость съемки, надежность, качество программного обеспечения для анализа термограмм, и т.п.

Таким образом, число факторов, которые влияют на результаты ИКТ при съемке тела человека, огромно. Невозможность контроля над всеми этими факторами можно считать одной из самых слабых точек ИКТ. Тем не менее, неинвазивность, безопасность, динамичность и дешевизна ИКТ стимулируют возрастающий интерес к нему для новых областей исследования, хотя и требуются дополнительные усилия для повышения надежности этой быстро развивающейся технологии.

Задачей нашего исследования было сопоставить характеристики термопортрета младших и старших школьников между собой, а также с аналогичными измерениями у молодых мужчин. Одновременно мы оценивали взаимосвязи характеристик термопортрета с некоторыми показателями физического развития наших испытуемых. Итогом этой работы должно было стать понимание путей применения метода ИКТ в антропологических и прикладных физиологических исследованиях.

Организация и методы исследования

В качестве испытуемых в исследовании принимали участие 29 мальчиков и 22 девочки 8–10 лет, 165 подростков 15–17 лет мужского пола и 53 молодых взрослых мужчины в возрасте от 22 до 32 лет. Все испытуемые, а также родители несовершеннолетних, были проинформированы о целях и методах исследования и дали письменное согласие на участие в нем. Работа проводилась либо в школе, где обучаются испытуемые, либо в Центре тестирования спортсменов Москомспорта. Все испытуемые проходили антропометрическое обследование (табл. 1), которое позволяло оценить состав тела и его жировую массу, а также

физическое развитие в целом. На основании данных о массе (M) и длине тела (L) рассчитывали индекс массы тела (ИМТ) Кетле-2 (M/L²).

Перед термографированием испытуемые проходили температурную адаптацию в течение 15 минут в изолированном помещении с температурой 21–22°C и влажностью 45–50% в состоянии мышечного покоя, раздетые по пояс, в положении стоя или сидя. Эта схема проведения исследования была призвана обеспечить умеренную активацию несократительного термогенеза бурой жировой ткани (БЖТ). После 15-минутной экспозиции с помощью тепловизора NEC TH 9100SL проводилась термография поверхности спины и/или груди. Тепловизор располагался на расстоянии 3 м от испытуемого на высоте 140 см от пола. Полученные термограммы обрабатывались с помощью специализированной программы Image Processor®. Для количественного анализа на каждой термограмме вручную выделяли зону, в пределах которой с помощью программных средств автоматически определяли с точностью до 0,1°C максимальную (MкТ), минимальную (MнТ) и средне-взвешенную (СвТ) температуру, а также температурный градиент (ТГ). При характеристике популяционных распределений термографических данных в группе детей 8–10 лет представлены данные смешанной выборки мальчиков и девочек (n=51), поскольку между полами достоверных различий по показателям температуры поверхности груди и спины не было выявлено.

Результаты

Когда человек одет адекватно окружающей температуре или находится в помещении с комфортной температурой, то между теплопродукцией и теплоотдачей устанавливается динамическое равновесие, имеющее на термограмме вид по-разному окрашенных зон кожных покровов (рис. 1, слева). При попадании в более холодное помещение тепловое состояние открытых участков

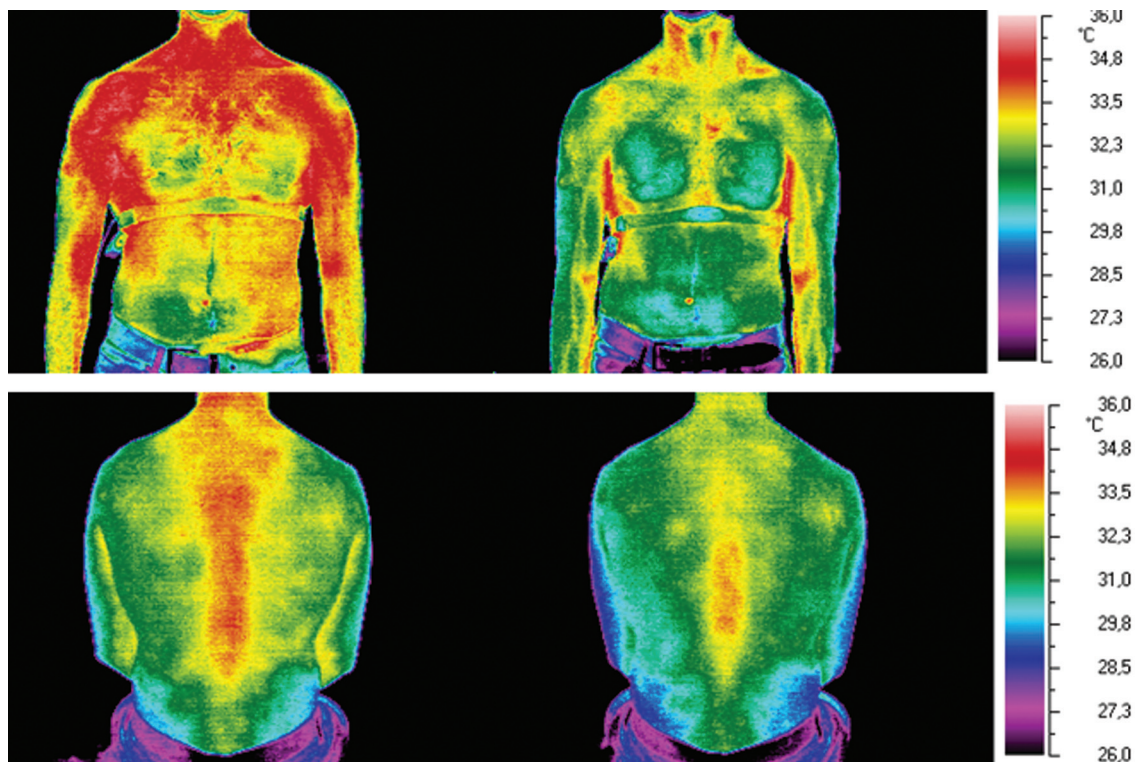


Рис. 1. Изменения кожной температуры в процессе адаптации к условиям умеренных теплотерь ($t=21^{\circ}\text{C}$, влажность 45%) в течение 20 минут. Слева: сразу после раздевания; справа: через 20 минут адаптации

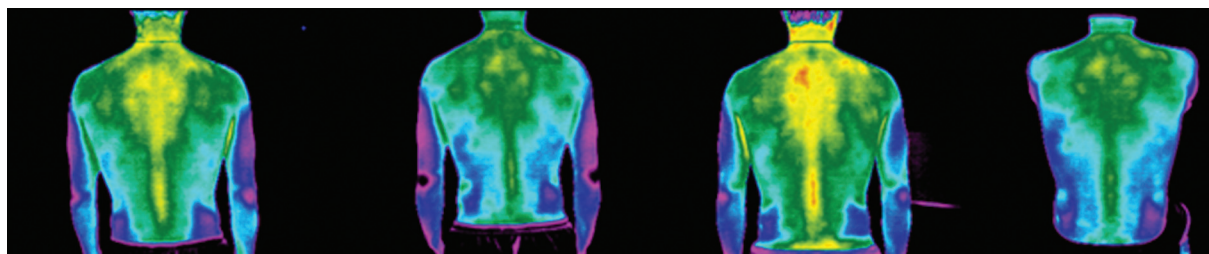


Рис. 2. Инфракрасные термопортреты спины одного испытуемого, сделанные в разные периоды наблюдения на протяжении 3 лет (2008–2010 гг.)

тела в течение 15–20 минут изменяется – происходит адаптация к конкретным условиям среды, теплоотдача уменьшается и средняя температура кожи спины снижается (рис. 1, справа). Тем не менее, некоторые участки кожи остаются значительно более теплыми, чем другие.

Очевидно, что в этой ситуации регуляция теплового потока через кожу осуществляется главным образом за счет сосудодвигательных реакций. В то же время, поскольку температура 21°C на 5–7 градусов ниже термонеutralной [Иванов, 1990], можно полагать, что небольшой уровень активации химической терморегуляции имеет место. В этом случае видимые на ИКТ «горячие» участки кожи – это зоны, под которыми на некото-

рой глубине располагаются термогенные структуры (например – бурая жировая ткань). В пользу этого предположения говорит высокая стабильность индивидуального термопортрета в течение многих месяцев наблюдений (рис. 2).

Хотя выраженность отдельных «горячих» и «холодных» пятен на ИКТ может несколько изменяться (это зависит от окружающей температуры, влажности, времени адаптации к условиям измерения, предыдущих функциональных нагрузок, положения тела, настроек камеры и т.п.), но их общий рисунок, локализация и форма наиболее ярких пятен остаются практически без изменения на протяжении всего периода наблюдения. Это в некоторой степени напоминает кожные узоры на

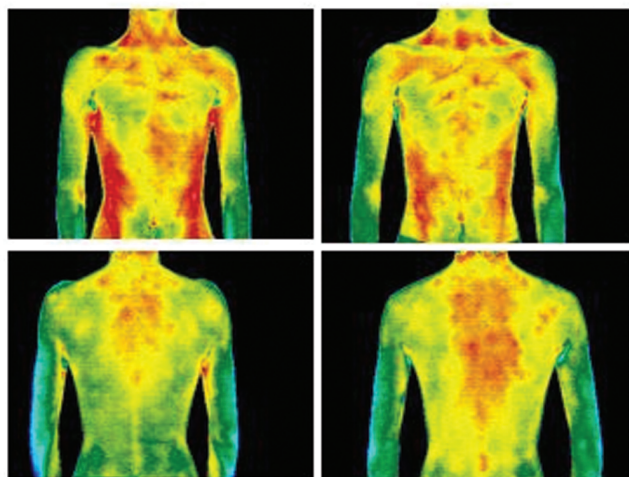


Рис. 3. Инфракрасные температурные портреты груди и спины двух братьев-близнецов 15 лет

пальцах, неизменность которых на протяжении жизни является важным условием их применения в антропологии и криминалистике.

По всей видимости, характеристики термопортрета в большой мере имеют генетические предпосылки, определяющие характер васкуляризации кожи и наличие подкожных термогенных структур. В качестве подтверждения этого утверждения приведем термопортреты двух братьев-близнецов (рис. 3), у которых рисунок распределения тепловых полей на груди и на спине очень сходен, хотя и расходится в деталях.

Такая стабильность температурных портретов особенно впечатляет на фоне огромного межиндивидуального разнообразия как среди взрослых, так и среди детей, примеры которого представлены на рис. 4.

В таблице 2 представлены усредненные данные для всех наших испытуемых мужского пола, сгруппированные по возрастному признаку.

Таблица 2. Температурные показатели (M+m) кожной поверхности груди и спины испытуемых мужского пола разных возрастных групп в условиях мышечного покоя и минимальной активации терморегуляторной теплопродукции (t=21°C)

Показатель	МнТ, °С	МкТ, °С	СвТ, °С
Поверхность груди			
Мальчики, n = 29	29,5 ± 0,8	35,3 ± 1,8	32,2 ± 2,1
Подростки, n = 165	29,8 ± 1,2	34,0 ± 0,6	32,0 ± 0,9
Взрослые мужчины, n = 53	28,8 ± 0,21	34,6 ± 0,20	31,7 ± 0,14
Поверхность спины			
Мальчики, n = 29	29,2 ± 1,3	34,2 ± 0,9	32,3 ± 1,0
Подростки, n = 165	29,3 ± 1,5	33,9 ± 0,7	31,9 ± 1,0
Взрослые мужчины, n = 53	29,0 ± 0,22	33,7 ± 0,19	31,7 ± 0,12

У детей и подростков температура поверхности кожи немного выше, чем у взрослых, что вполне согласуется с известной закономерностью более высокого уровня энергетического метаболизма у млекопитающих на ранних этапах онтогенеза. Различия между детьми 8–10 лет и подростками 14–16 лет недостоверны. В ходе исследования мы убедились, что разница между максимальными и минимальными температурами поверхности тела (градиент температуры) достигает как у взрослых, так и у детей 3–6 градуса. Здесь тоже заметна разница между возрастными группами: градиент температуры у детей, как правило, выше, чем у взрослых.

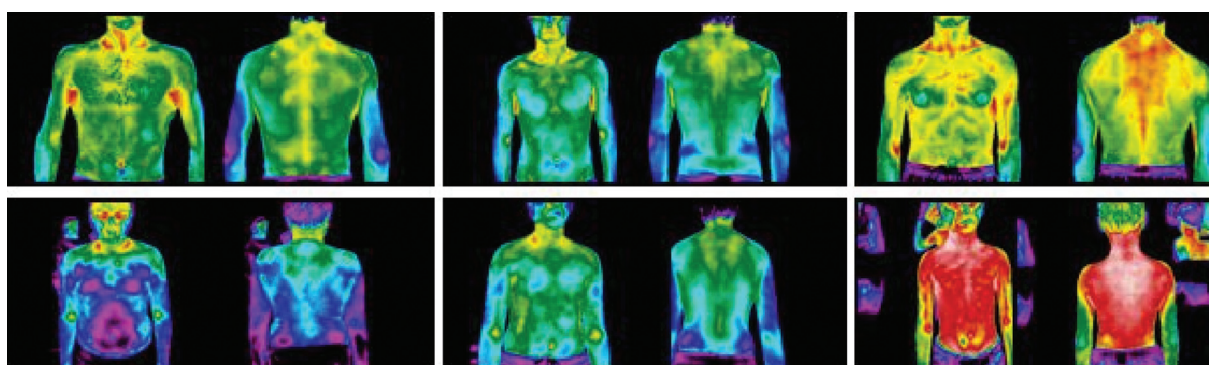


Рис. 4. Индивидуальные варианты термопортретов, зарегистрированных в одинаковых условиях (после 15 мин адаптации при 21°C и влажности 45%) у трех взрослых испытуемых (вверху) и трех детей 9 лет (внизу) (в каждой паре слева грудь, справа спина)

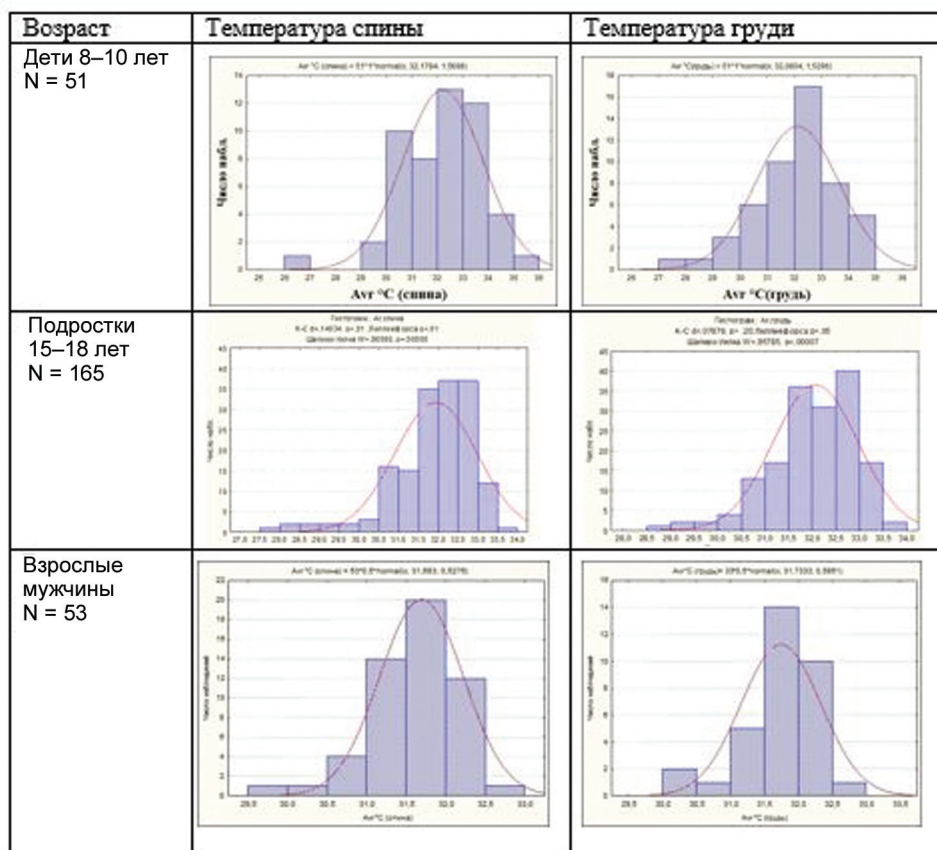


Рис. 5. Гистограммы распределения показателя СВТ спины (слева) и груди (справа) в различных возрастных группах

Примечание: в группе детей 8-10 лет представлены данные смешанной выборки мальчиков и девочек (n=51), поскольку между полами достоверных различий по показателям температуры поверхности груди и спины выявлено не было

На поверхности груди распределение температуры носит несколько иной характер, чем на спине (табл. 2). Так, величины МНТ и СВТ по своим значениям приблизительно совпадают с таковыми на спине, однако максимальная температура на груди у детей и взрослых (но не у подростков) выше в среднем примерно на 1°C. По этой причине на груди зафиксированы более высокие величины температурного градиента, то есть разницы между максимальной и минимальной температурой.

Популяционное разнообразие температурных характеристик может быть продемонстрировано с помощью гистограмм распределения СВТ в популяции (рис. 5), которое в большинстве случаев приближается к нормальному. При этом если мода, то есть наиболее типичная величина средневзвешенной температуры кожи спины и груди, с возрастом немного сдвигается в сторону более низких значений и составляет во всех частях популяции от 31,5 до 32°C, то индивидуальный разброс у детей простирается от 26 до 35°C, а у взрослых снижается и уместается в диапазон от 29,5 до 33°C.

Если учесть, что температура ядра тела человека удерживается в норме в диапазоне $37 \pm 0,3^\circ\text{C}$, то выявленное индивидуальное разнообразие кожной температуры в условиях минимальной активации теплопродукции представляется очень большим и заслуживающим внимательного изучения с точки зрения морфофункциональных причин и физиологических механизмов, приводящих к наличию этого разнообразия.

Температура спины и груди взаимосвязаны и отражают единый тепловой поток, который определяется метаболическими и васкуляризационными факторами. Об этом свидетельствует наличие высоких корреляционных связей между характеристиками термограммы спины и груди (табл. 3), однако с возрастом они несколько ослабевают. У детей достоверно коррелируют все три показателя термограммы, у подростков – два, а у взрослых – лишь один, наиболее интегральный – средневзвешенная температура кожной поверхности. Снижение корреляционной взаимосвязи между тепловым состоянием кожи груди и спины можно

Таблица 3. Коэффициенты корреляции температуры кожной поверхности груди и спины испытуемых разных возрастных групп

Возрастная группа	МнТ	МкТ	СвТ
Мальчики 8–10 лет	0,89*	0,88*	0,96*
Подростки 15–17 лет	0,80*	0,64	0,91*
Взрослые мужчины	0,59	0,38	0,79*

Примечания. * – $p < 0,01$.

объяснить результатом накопления подкожного жира, экранирующего тепловые потоки, исходящие от ядра тела.

У взрослых мужчин выявлена достоверная отрицательная корреляция с ИМТ как для СВТ ($r=-0,73$), так и для МКТ ($r=-0,58$) и МНТ ($r=-0,67$). Таким образом, фактор телосложения оказывает заметное влияние на распределение кожных температур.

Обсуждение результатов

Сравнительный анализ позволяет выявить ряд характеристик, устойчиво повторяющихся на термопортретах разных людей. Во-первых, обращает на себя внимание более или менее симметричное расположение наиболее крупных и ярких пятен на поверхности тела, особенно со стороны спины – в области груди симметрия менее выражена. Во-вторых, у всех обследованных, независимо от относительной представленности «горячих» зон, ярко-красные («горячие») пятна имеются в области шеи и в подключичной ямке. В остальных характеристиках в большей мере проявляются устойчивые индивидуальные особенности термограммы, чем некие общие закономерности.

Представленные результаты корреляционного анализа показывают, что температурные характеристики, регистрируемые методом инфракрасной термографии, имеют высокий уровень отрицательных корреляционных связей с показателями состава тела. Иными словами, телосложение, и, в частности, количество жира в организме, играет существенную роль в формировании термопортрета за счет того, что теплоотдача при наличии выраженной жировой прослойки уменьшается. Совершенно аналогичные закономерности были выявлены нами ранее на взрослых испытуемых [Акимов и др., 2010]. По-видимому, это является проявлением общебиологической закономерности. Жировой слой, с одной стороны, служит теплоизолятором и не пропускает тепло из ядра тела

в наружные слои, с другой стороны, благодаря той же способности к теплоизоляции сохраняет тепло внутри организма. Следует отметить, что одинаковые закономерности выявлены для температуры поверхности спины и груди.

Возможности визуализации, которые предоставляет современная инфракрасная тепловизионная видеотехника, позволяют увидеть мозаичное распределение температур на поверхности тела человека, который в течение некоторого времени (15 минут) находился в условиях умеренной активации механизмов терморегуляции – при комфортной влажности и окружающей температуре, на 5–7 градусов ниже термонейтральной. Несмотря на ярко выраженные индивидуальные различия, можно выделить несколько зон, которые у большинства испытуемых демонстрируют повышенную либо пониженную температуру по сравнению со средне-взвешенной. Так, почти у всех испытуемых отмечается повышенная температура в области шеи, в межлопаточной области спины и вдоль грудного отдела позвоночника, а также узкой полоской вдоль поясничного отдела позвоночника. На груди наряду с шейным отделом выделяется обычно ключичная зона и область грудины. Латеральные поверхности, напротив, демонстрируют низкие температуры, которые могут отличаться от самых горячих точек на 5–6 градусов. Эти результаты совпадают с данными, полученными в исследованиях других авторов [Zontak et al., 1998; Clark et al., 1977; Nedergaard et al., 2007].

Три процесса могут определять различия локальных участков кожи по излучению тепла, которое фиксируется тепловизором. Первый – локальный кровоток, который определяется плотностью кожных капилляров (анатомический фактор) и тонусом вазоконстрикторных гладких мышц (фактор автономной регуляции сосудистого тонуса). Второй процесс – интенсивность потоотделения, которая также зависит от анатомического фактора (плотность распределения кожных потовых желез) и симпатической холинэргической активации интенсивности потоотделения. Однако при температуре 21°C потоотделение на открытых участках кожи неактивно, т.к. его участие в поддержании температурного гомеостаза не требуется. Третий процесс – метаболическая активность нижележащих тканей, находящаяся под управлением адренергических стимулов симпатического отдела автономной нервной системы. Выбор среди такого рода тканей невелик – это могут быть либо тонические скелетные мышцы, либо БЖТ.

Еще одним обстоятельством, влияющим на распределение кожных температур, может быть выраженность и толщина жирового слоя, высту-

пающего в качестве теплоизолятора. Чем толще слой жира в том или ином участке тела, тем меньше тепла к кожному покрову будет поступать из нижележащих термогенных структур и тем быстрее такой участок поверхности будет охлаждаться при температуре ниже термонейтральной.

В наблюдениях за динамикой термопортрета в процессе адаптации к комнатной температуре мы, как и другие исследователи [Колесов, 2006; Akimov et al., 2009; Merla et al., 2005; Zontak et al., 1998], видели постепенное охлаждение кожи спины, в чем проявляется действие механизмов физической терморегуляции, целью которых в данном случае является снижение теплопотерь. Однако процесс этого охлаждения протекает неравномерно, и отдельные горячие участки остаются видны на термопортрете достаточно долго. Мы полагаем, что эта неравномерность может быть обусловлена локальным увеличением метаболической активности симпатозависимых тканей, расположенных в подкожном слое, на фоне общей вазоконстрикции капилляров кожных покровов. Под симпатозависимыми метаболически активными тканями, расположенными в подкожном слое, мы подразумеваем бурую жировую ткань (БЖТ) – только такое предположение, на наш взгляд, способно каким-то образом объяснить весь комплекс полученных нами результатов.

Как известно, бурая жировая ткань является самой метаболически активной тканью организма млекопитающих и человека. Ее метаболическая активность находится под жестким контролем симпатической ветви автономной нервной системы [Корниенко, 1979; Медведев, Елсукова, 2002; Astrup, 1986; Himms-Hagen, 1990; Nedergaard et al., 2007]. Локализация поверхностно расположенной БЖТ разными авторами описывается по-разному: чаще всего у взрослых ее обнаруживают со стороны груди в области шеи и в подключичной зоне, вдоль грудины, а также в подмышечных впадинах и на локтевых сгибах рук. Считается, что со стороны спины БЖТ у взрослых, в отличие от детей, практически отсутствует, за исключением шеи [Nedergaard et al., 2007].

На наш взгляд, достаточно веским, хотя и косвенным аргументом в пользу гипотезы о роли бурой жировой ткани в формировании термопортрета, служат результаты наших пилотных экспериментов с региональным холодным воздействием [Сонькин и соавт., 2011]. Значительную (примерно 2-кратную) активацию потребления кислорода по сравнению с покоем, которую мы наблюдали в этих экспериментах, необходимо (в отсутствие признаков холодовой дрожи) признать проявлением несократительного термогенеза. Однако сам по

себе факт наличия у человека несократительного термогенеза не вызывает сомнений [Nedergaard et al., 2007], вопрос состоит в локализации этих тканей, которые этот несократительный термогенез осуществляют. Судя по динамике температуры спины, определенная часть этих тканей располагается в зоне вокруг позвоночного столба и в области шеи. Однако, видимо, еще более активные островки этих тканей располагаются на груди в верхней ее части, вдоль грудины и в подмышечных впадинах. Разумеется, это никоим образом не исключает активации БЖТ, расположенной в недоступных для наблюдения с помощью тепловизора полостях тела – например, в периренальной области.

Если принять предположение, что температурный портрет человека хотя бы отчасти связан с активностью бурой жировой ткани, то становится понятным и наличие умеренной по силе отрицательной корреляционной связи параметров термопортрета с ИМТ. Даже если не предполагать существования зависимости количества БЖТ в организме от типа телосложения, легко представить себе, что разная толщина подкожного жира будет в разной степени скрывать метаболическую активность нижележащих тканей. В этом случае вполне естественно ожидать, что люди с более высоким ИМТ, обладающие, как правило, большим жировым запасом, будут иметь более низкую температуру поверхности кожи в условиях комнатной температуры. На существование именно такой зависимости содержания бурого жира от состава тела человека имеются прямые указания в литературе [Nedergaard et al., 2007].

Открывающиеся перспективы исследований в области прикладной и, особенно, спортивной физиологии весьма разнообразны и заманчивы. Так, например, получает вполне ясное объяснение феномен повышения физической работоспособности спортсменов, которые применяют холодные ванны в процессе релаксации между соревновательными нагрузками в ходе многоэтапных соревнований [Buchheit et al., 2009; McDermott et al., 2009; Wilcock et al., 2006]. Существенный вклад в понимание механизмов оздоровления и контроля массы тела вносят полученные нами результаты также с учетом недавнего открытия гормона «ирисина», который вырабатывается мышцами при физической нагрузке и стимулирует превращение клеток белого жира в БЖТ [Boström et al., 2012]. Мы полагаем, что дальнейшее развитие этого направления будет продуктивным для антропологических исследований адаптации человека к физическим и температурным нагрузкам.

Библиография

- Акимов Е.Б., Андреев Р.С., Каленов Ю.Н., Кирдин А.А., Сонькин В.Д., Тоневитский А.Г. Температурный портрет человека и его связь с аэробной производительностью и уровнем лактата в крови // Физиология человека, 2010. Т. 36. № 4. С. 89–101.
- Брюк К. Тепловой баланс и регуляция температуры тела // Физиология человека. М.: Мир, 1996. С. 665–687.
- Иваницкий Г.Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине // Успехи физических наук, 2006. Т. 176. № 12. С. 1293–1320.
- Иванов К.П. Основы энергетики организма: Теоретические и практические аспекты. [В 3 т.]. Т. 1: Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция. Л.: Наука, 1990. 307с.
- Колесов С.Н. Остеохондроз позвоночника: неврологические и тепловизионные синдромы. Н. Новгород, 2006.
- Колесов С.Н., Воловик М.Г., Прилучный М.А. Медицинское тепловидение: современный методологический подход: Монография. Нижний Новгород: ФГУ «ННИИ-ТО Росмедтехнологий», 2008. 184 с.
- Корниенко И.А. Возрастные изменения энергетического обмена и терморегуляции. М.: Наука, 1979. 156 с.
- Макаренко Т.П., Бочин Ю.Н., Упырев А.В. Радиоизотопное сканирование, ультразвуковая биолокация, тепловидение в клинике. М.: Медицина, 1973. 246 с.
- Марьянович А.Г., Цыган В.Н., Лобзин Ю.В. Температура тела // Терморегуляция: от физиологии к клинике. СПб., 1997. С. 5–7.
- Медведев Л.Н., Елсукова Е.И. Бурая жировая ткань человека // Успехи физиологических наук, 2002. Т. 33. С. 17–29.
- Сонькин В.Д., Акимов Е.Б., Андреев Р.С., Каленов Ю.К., Якушкин А.В. Динамическая инфракрасная термография как метод изучения теплового состояния организма человека при различных функциональных пробах (электронный ресурс) 2011. URL: <http://phmag.imbp.ru/articles/Sonkin.pdf> (дата обращения 12.05.2016).
- Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 296 с.
- Шехтер А.И., Розенфельд Л.Г., Терновой Н.К. Термография в диагностике заболеваний некоторых органов // Вестник рентгенологии и радиологии, 1987. № 1. С. 70–76.
- Шпилевский Э.М. Термоасимметрия как критерий теплового состояния организма в норме и патологии // Мат. научн. конф. по вопросам теоретической и клинической медицины. Минск, 1977. С. 89–92.
- Akimov E.B., Andreev R.S., Arkov V.V., Kiridin A.A., Saryanc V.V., Sonkin V.D., Tonevitsky A.G. Thermal "portrait" of sportmen with different aerobic capacity // Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis, 2009. Vol. 14. P. 7–16.
- Astrup A. Thermo genesis in human brown adipose tissue and skeletal muscle induced by sympathomimetic stimulation // Acta Endocrinol. Suppl. (Copenh.), 1986. Vol. 278. P. 1–32.
- Boström P., Wu J., Jedrychowski M.P., Korde A., Ye L., Lo J.C., Rasbach K.A., Boström E.A., Choi J.H., Long J.Z., Kajimura S., Zingaretti M.C., Vind B.F., Tu H., Cinti S., Hojlund K., Gygi S.P., Spiegelman B.M. A PGC1- α -dependent myokine that drives brown-fat-like development of white fat and thermogenesis // Nature, 2012. Vol. 481: P. 463–468.
- Brown R.D. Quantification of fever (editorial) // Clint. Pediatr. (Philad), 1992. Vol. 31. N 4. P. 228–229.
- Buchheit M., Cormie P., Abbiss C.R., Ahmaidi S., Nosaka K.K., Laursen P.B. Muscle deoxygenation during repeated sprint running: Effect of active vs. passive recovery // Int. J. Sports Med., 2009. N 6. P. 418–425.
- Clark R.P., Mullan B.J., Pugh L.G. Skin temperature during running – a study using infra-red color thermography // J. Physiol., 1977. Vol. 267. P. 53.
- Cypess A.M. Infrared thermography for monitoring brown adipose tissue // US patent WO/2009/067501. 28.05.2009.
- Fernandez-Cuevas I., Bouzas Marins J.C., Lastras J.A., Carmona P. M. G., Cano S. P., Garcia-Concepcion M. A., Sillero-Quintana M. Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: A review // Infrared Physics & Technology, 2015. Vol. 71. P. 28–55.
- Himms-Hagen J. Role of thermogenesis in the regulation of energy balance in relation to obesity // Can. J. Physiol. Pharmacol., 1989. N 4. P. 394–401.
- McDermott B.P., Casa D.J., Gaudio M.S., Lopez R.M., Yeager S.W., Armstrong L.E., Maresch C.M. Acute whole-body cooling for exercise-induced hyperthermia: a systematic review // J. Athl. Train., 2009. N 1. P. 84–93.
- Merla A., Romani G.L. Functional infrared imaging in medicine: a quantitative diagnostic approach // Conference proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. Vol. 1. P. 224–227.
- Merla, A., Iodice P., Tangherlini A., Michele G.D., Romualdo S.D., Saggini R., Romani G.L. Monitoring skin temperature in trained and untrained subjects throughout thermal video // Proceedings of the 27th Annual International Conference EMBS, Shanghai, China, 2005. P. 1684–1686.
- Nedergaard J., Bengtsson T., Cannon B. Unexpected evidence for active brown adipose tissue in adult humans // Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab., 2007. Vol. 293: P. 444–452.
- Sherman R.A., Woerman A.L., Karstetter K.W. Comparative effectiveness of videothermography, contact thermography, and infrared beam thermography for scanning relative skin temperature // J. Rehabil. Res. Dev., 1996. Vol. 33. N 4. P. 377–386.
- Symonds M.E., Henderson K., Elvidge L., Bosman C., Sharkey D., Perkins A.C., Budge H. Thermal imaging to assess age-related changes of Skin Temperature within the supraclavicular region co-locating with Brown Adipose Tissue in healthy children // J. Pediatr., 2012. Vol. 161, N 5. P. 892–898.
- Wilcock I.M., Cronin J.B., Hing W.A. Physiological response to water immersion: a method for sport recovery? // Sports Med., 2006. Vol. 36. N 9. P. 747–765.
- Zontak A., Sideman S., Verbitsky O., Beyar R. Dynamic thermography: analysis of hand temperature during exercise // Ann. Biomed. Eng., 1998. Vol. 26. P. 988–993.

Контактная информация:

Акимов Егор Борисович: e-mail: egorka23@gmail.com;
Андреев Роман Сергеевич: e-mail: Andreev-roma@yandex.ru;
Каленов Юрий Николаевич: e-mail: kalenov.yury@yandex.ru;
Якушкин Андрей Васильевич: e-mail: yakushkin.andre@yandex.ru;
Сонькин Валентин Дмитриевич: e-mail: sonkin@mail.ru.

APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY TO IDENTIFY MORPHOLOGICAL AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF A PERSON (CHILDREN AND ADULTS)

R.S. Andreev¹, Yu.N. Kalenov¹, A.V. Yakushkin², E.B. Akimov, V.D. Son'kin^{1,5}

¹*Institute of Developmental Physiology Russian Academy of Education, Moscow, Russia*

²*Grammar school in the name of St. Innocent of Penza, Penza, Russia*

³*Innovation Center of the Russian Olympic Committee, Moscow, Russia*

⁴*Central Cross Country Ski Association, Verona, WI, USA*

⁵*Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism, Moscow, Russia*

The article presents new results of children, adolescent and adult male survey using modern infrared thermal imaging technology. This technology allows to obtain temperature images of a human body surface, reflecting the activity of metabolic processes and individual characteristics of skin vascularization. It is shown that individual temperature images are characterized by high stability, while population variability of basic temperature characteristics of the skin surface is high. With age, the skin temperature decreases under the condition of room temperature (21°C) and muscle rest, and the gradient between the maximum and minimum temperatures for a selected skin surface also decreases. Significant correlation between temperature characteristics of the back and chest surfaces is revealed, weakening with age, which may be caused by fat accumulation shielding the skin surface from the heat flows from within the interior of the body. Significant correlation between individual temperature image features of adult males on one side and body built characteristics on the other is demonstrated. It is suggested that some of the hottest areas on the skin surface reflect activity of brown adipose tissue, which provides nonshivering thermogenesis when environmental temperature is a few degrees below the thermoneutral.

Keywords: infrared thermography; children, adolescents and adults; individual stability; population diversity; body composition; brown adipose tissue