

УДК 612.275.1; 612.223
doi:10.21685/2072-3032-2022-4-11

Современные методические подходы к оценке устойчивости к гипоксии и прогнозу физической работоспособности человека в условиях горной местности (обзор литературы)

А. И. Ширяева¹, И. В. Фатеев², А. А. Кузьмин³, О. В. Ветряков⁴, А. В. Шкарупа⁵

^{1,2,3}Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины, Санкт-Петербург, Россия

^{4,5}Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

¹gniiivm_2@mil.ru, ⁴o.v.vetryakov@mail.ru

Аннотация. На сегодня остается актуальным вопрос разработки эффективных методик оценки уровня устойчивости человека к выполнению физической нагрузки в условиях горной местности. В этой связи нами рассмотрены существующие в настоящее время методические подходы к оценке устойчивости организма к гипоксии: методы, основанные на регистрации изменений генетических и биохимических маркеров гипоксии; функциональные пробы (проба Штанге, Генча, Серкина, Розенталя и др.), сопровождающиеся кратковременной острой гипоксией с учетом антропометрических данных и без таковых; методы оценки устойчивости к гипоксии, основанные на дыхании воздухом с пониженным содержанием кислорода без выполнения физических нагрузок (наличие гипоксической гипоксии, гипобарической гипоксии) и с выполнением физических нагрузок (наличие гипоксической гипоксии и гипоксии нагрузки). На основании результатов анализа литературных данных отмечены основные положительные и отрицательные стороны данных методик, показана необходимость разработки методики, включающей в себя полноценную оценку реакции кардиореспираторной системы в условиях гипоксии при помощи кардиопульмонального нагрузочного тестирования.

Ключевые слова: острая горная болезнь, гипоксия, устойчивость к гипоксии, HIF1 α , VO₂max, физическая работоспособность в условиях гипоксии, кардиопульмональное нагрузочное тестирование, максимальная аэробная производительность

Для цитирования: Ширяева А. И., Фатеев И. В., Кузьмин А. А., Ветряков О. В., Шкарупа А. В. Современные методические подходы к оценке устойчивости к гипоксии и прогнозу физической работоспособности человека в условиях горной местности (обзор литературы) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2022. № 4. С. 107–124. doi:10.21685/2072-3032-2022-4-11

Modern methodological approaches to the assessment of hypoxia tolerance and physical working capacity prediction in the mountains (literature review)

A.I. Shiryayeva¹, I.V. Fateev², A.A. Kuz'min³, O.V. Vetryakov⁴, A.V. Shkarupa⁵

^{1,2,3}State Research and Testing Institute of Military Medicine, Saint-Petersburg, Russia

^{4,5}Military Medical Academy named after S.M. Kirov, Saint-Petersburg, Russia

¹gniiivm_2@mil.ru, ⁴o.v.vetryakov@mail.ru

Abstract. To this date, the issue of methods development for evaluation of human physical tolerance to exercises in the mountains remains relevant. In this regard, the authors consider the current methodological approaches to the assessment of hypoxia tolerance: methods based on recording of changes in genetic and biochemical hypoxia markers; functional tests (Stange's, Serkin's, Rosenthal's tests, etc.), accompanied by short-term acute hypoxia, with and without respect to anthropometric data; methods for evaluation of hypoxia tolerance based on breathing the oxygen-reduced air without performing physical exercise (anoxic hypoxia, hypobaric hypoxia) and with it (anoxic hypoxia and "load" hypoxia). Based on the results of the analysis of literature data, the main positive and negative aspects of these methods are noted, and the need to develop a methodology that includes a full assessment of the response of the cardiorespiratory system under hypoxic conditions using cardiopulmonary exercise testing is shown.

Keywords: acute mountain disease, hypoxia, hypoxia tolerance, HIF1 α , $\text{VO}_{2\text{max}}$, physical working capacity under hypoxia, cardiopulmonary exercise testing, aerobic capacity for work

For citation: Shiryayeva A.I., Fateev I.V., Kuz'min A.A., Vetryakov O.V., Shkarupa A.V. Modern methodological approaches to the assessment of hypoxia tolerance and physical working capacity prediction in the mountains (literature review). *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki = University proceedings. Volga region. Medical sciences*. 2022;(4):107–124. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3032-2022-4-11

Число профессионалов, выполняющих свою работу в горах: геологов, шахтеров, метеорологов, горных спасателей, альпинистов, спортсменов и пр., – постоянно растет. При этом подавляющее большинство видов деятельности в горах связано с серьезными физическими нагрузками, которые в сочетании с воздействием гипоксии и другими неблагоприятными факторами горной местности зачастую приводят к развитию патологических состояний, наносящих существенный вред здоровью человека. В большинстве случаев данные факторы оказывают комплексное воздействие, взаимно усиливая негативное влияние на функциональное состояние организма лиц, находящихся в горах. Их действие обуславливает декомпенсацию скрытых заболеваний сердечно-сосудистой и дыхательной систем, отягощает течение патологических процессов, травматизм сопровождается более выраженным и продолжительным кровотечением, а на фоне дегидратации организма скоротечнее и тяжелее протекает шок [1].

Основной же вклад в снижение работоспособности человека в условиях горной местности вносит кислородное голодание (экзогенная гипоксия) – патологическое состояние, характеризующееся пониженным содержанием кислорода в крови. У некоторых лиц (особенно среди ослабленных и уставших, травмированных и больных) признаки кислородного голодания отмечаются уже на высоте 2500–3000 м, а у большинства – на высотах более 4500 м [2, 3].

Подъем на высоту 2500 м и выше без курса акклиматизации опасен для жизни ввиду возможности острого развития отека легких и головного мозга. При самостоятельном скоростном подъеме на высоты свыше 3000 м без предварительной акклиматизации первые проявления горной болезни манифестируют в виде появления поведенческих расстройств и нарушений зрения. Для первых особенно характерно появление чувства эйфории и возбуждения, что приводит к опасному снижению самоконтроля в сложных услови-

ях выполнения профессиональных задач. Через 6–12 ч эйфория сменяется депрессией различной степени выраженности, раздражительностью [4, 5].

Степень выраженности, тяжесть и характер проявления изменений в организме человека при горной болезни зависят от ряда внешних факторов (уровень парциального давления кислорода и углекислого газа в окружающей среде, величина солнечной радиации, ионизация воздуха, резкие колебания температуры и влажности воздуха) и внутренних факторов (уровень насыщения крови и тканей кислородом, скорость изменения сатурации, базовое состояние здоровья, особенно сердечно-сосудистой, дыхательной и мочевыделительной систем, возраст, степень физического и психического напряжения, тренированность организма и его способность к адаптации, характер питания) факторов [6, 7].

В качестве одного из наиболее важных из них рассматривается фактор устойчивости человека к гипоксии. Известно несколько способов определения такой устойчивости, и практически все они основаны на высокой степени корреляции толерантности организма человека к физической нагрузке с устойчивостью к гипоксии. В настоящее время продолжают изучаться биохимические и генетические механизмы формирования, а также поиск методов прогнозирования устойчивости человека к гипоксии. В исследовании, выполненном М. В. Васиным и соавторами (2018), было показано, что активация комплекса II дыхательной цепи во время острой гипоксии является компенсаторной реакцией, позволяющей перенос электронов в дыхательной цепи при блокаде комплекса I [8]. Некоторые авторы предлагают в качестве предикторов устойчивости к гипоксии использовать связь между физической работоспособностью, устойчивостью к гипоксии нагрузки и генами: фактор I, индуцируемый гипоксией (HIF1 α) [9, 10]; ген ангиотензин-конвертирующего фермента (ACE), ген эндотелиальной синтазы окиси азота (eNOS), ген рецептора брадикинина (BDKRB2), ген эндотелина (ENDT1)) [11, 12]; ген ингибитора активатора плазминогена I (PAI-1), ген сосудистого эндотелиального фактора роста (VEGF) [11]; гены, детерминирующие факторы адаптации системы транспорта кислорода (ген эритропоэтина (EPO), ген миоглобина (MB)) [11, 13, 14].

К другим способам оценки устойчивости к гипоксии следует отнести методы, в основе которых лежит проведение функциональных проб. В частности, сотрудником Военно-медицинской академии А. В. Дергуновым был предложен способ оценки устойчивости функциональных систем организма к гипобарической гипоксии, основанный на исследовании антропометрических и физиологических данных [15]. Рассчитывают показатель устойчивости систем по формуле

$$УГ = ЗДН / (P + H),$$

где УГ – показатель устойчивости функциональных систем организма к гипоксии, усл.ед.; P – масса тела, кг; H – рост, см; ЗДН – задержка дыхания через одну минуту после 15-кратных отжиманий от пола с прямым корпусом [15].

Оценку устойчивости авторы предлагают проводить по следующим критериям: УГ менее 0,10 – слабая; УГ от 0,10 до 0,15 – средняя; УГ более 0,15 – хорошая устойчивость. Определение устойчивости функциональных

систем организма человека к гипобарической гипоксии позволяет не только провести отбор лиц перед перемещением в горную местность, но и спрогнозировать развитие стабильной фазы адаптации у них в период пребывания в горах [15].

Подобный подход к решению данного вопроса предлагает и О. Г. Пастухов с соавторами (1997) [16]. Суть их изобретения заключается в сравнении длительности пробы Штанге и изменения частоты сердечных сокращений во время нее. По мнению авторов, это позволяет повысить точность определения устойчивости к гипоксии у лиц, занимающихся горным туризмом, для отбора участников высокогорных походов и прогнозировать адаптацию человека к условиям горной местности [16]. Положительной стороной применения данных методов оценки является простота выполнения и отсутствие необходимости использования специфического оборудования при минимальных трудозатратах. Однако информативность регистрируемых параметров применительно к оценке устойчивости к гипоксии не высока, а полученные результаты отражают генотипически и фенотипически обусловленную интегральную физиологическую реакцию организма на острую гипоксию, которая не позволяет адекватно судить о механизмах адаптации организма при длительном пребывании человека в условиях недостатка кислорода.

В то же время современное представление о направлениях адаптационных изменений в организме под воздействием гипобарической гипоксии основывается на понимании того, что при воздействии гипоксического фактора на организм человека в первую очередь ожидается реакция со стороны органов дыхания и кровообращения, а выраженность гипоксического воздействия определяется показателем сатурации крови кислородом [5, 17, 18]. На диагностике степени выраженности данных физиологических изменений, происходящих в условиях гипобарической гипоксии, моделируемой в барокамере, основывается большинство используемых во всем мире методик определения устойчивости к гипоксии и построения прогноза развития симптомов острой горной болезни [6, 19–21]. Данный подход реализован при оценке переносимости к гипоксии у летчиков и водолазов. Оценка переносимости умеренной степени гипоксии у летного состава, выявление скрытых форм заболеваний и отклонения в состоянии здоровья, которые могут стать причиной снижения устойчивости к недостатку кислорода, осуществляется при проведении барокамерных подъемов на высоты 5000–6000 м [22]. У водолазов также для определения устойчивости и физиологических резервов организма при гипоксии проводится гипоксическая проба (дыхание 10 % кислородно-азотной смеси в течение 5 мин при нормальном атмосферном давлении) [23]. Оценка переносимости гипоксии с применением данных методик проводится в условиях относительного покоя человека (в положении сидя или лежа) [19–23].

Ряд специалистов проводит оценку устойчивости организма к гипоксии в условиях нормобарической гипоксии (дыхание гипоксической смесью). Один из вариантов такого способа оценки – дыхание гипоксической газовой смесью с 10 % содержанием кислорода до снижения сатурации гемоглобина крови кислородом до 80 % в покое [24–26]. Оценка устойчивости проводят по времени гипоксического воздействия, времени восстановления сатурации гемоглобина крови кислородом до исходных значений после прекращения гипоксического воздействия и индекса гипоксии. Однако для лиц, чья деятельность в горной местности сопряжена с интенсивными физическими

нагрузками, не менее актуальна оценка устойчивости к гипоксии при выполнении физических упражнений.

Поиску оптимального способа определения устойчивости к гипоксии при выполнении физической нагрузки посвящено большое количество работ. [27–32]. Однако развивающаяся при мышечной деятельности гипоксия нагрузки имеет свои характерные особенности и отличается от горной гипоксии, поэтому большинство таких методик не нашло широкого применения.

В работе М. М. Филиппова и соавторов описаны отличительные особенности развивающихся в здоровом организме двух типов гипоксических состояний: гипоксии нагрузки при мышечной деятельности и гипоксической гипоксии в горах [33]. Отмечено, что причиной возникновения гипоксии нагрузки является не артериальная гипоксемия, являющаяся обязательным условием для развития горной гипоксии, а несоответствие между возможностями систем и органов доставлять кислород клеткам с увеличенным кислородным запросом [33]. Это сопровождается повышением скорости продукции и выделения углекислого газа. В случае неудовлетворения кислородного запроса, возникающего при нагрузке, формируется кислородный долг и продуцируется избыток выделяемого углекислого газа. Гипоксия, развивающаяся в горной местности, на последних стадиях как правило сопряжена со сдвигом кислотно-основного состояния, а характерным отличием гипоксии нагрузки является развитие декомпенсированного метаболического ацидоза вследствие повышения в крови недоокисленных продуктов и резкого падения рН на фоне снижения количества бикарбонатов и роста дефицита буферных оснований [33].

В этой связи, учитывая особенности двух типов гипоксии, для адекватного прогноза устойчивости человека к ним необходимо разработать методику, включающую в себя оба фактора: физическую нагрузку и гипоксическую гипоксию.

Наиболее близкая среди таких методик оценки устойчивости к гипоксии – это проведение барокамерного подъема с приседаниями [34], в которой авторы предлагают новый вариант прогнозирования устойчивости к гипоксии. Ключевым показателем при прогнозировании устойчивости авторы выделяют сатурацию гемоглобина крови кислородом. Изменение данного параметра под воздействием гипоксического фактора рассматривают в качестве одного из основных критериев устойчивости к гипоксии [31, 35, 36]. Однако проведение оценки устойчивости в гипобарической камере требует дорогостоящего оборудования (барокамера), обученного персонала для проведения барокамерных подъемов, а ограниченный внутренний объем барокамеры не позволяет адекватно смоделировать высокий уровень физической нагрузки.

Коллективом авторов была разработана программа, определяющая порядок и методику поэтапного проведения обследования высококвалифицированных спортсменов зимних видов спорта по определению физической работоспособности и оценке индивидуальной устойчивости в измененных климатических (гипоксических и гипотермических) условиях [37]. Исследование проводилось в климатической комнате в условиях умеренной степени нормобарической гипоксии с содержанием кислорода на уровне $17,0 \pm 0,2 \%$, эквивалентной высотам 1600 ± 100 м, при этом проводили разностороннюю оценку реакции кардиореспираторной системы в модельных условиях. Однако ав-

торы не предоставляют результаты полученных данных по этим параметрам и не дают никаких рекомендаций по поводу прогнозирования устойчивости к выполнению физической нагрузки в условиях гипоксии. Также предпринималась попытка прогнозирования устойчивости к гипоксии при выполнении физической нагрузки в условиях нормобарической гипоксии [38]. Однако в этом случае авторы ограничились оценкой данных пробы PWC170, частоты сердечных сокращений, артериального давления и сатурации гемоглобина крови кислородом, при этом не были разработаны критерии прогнозирования устойчивости к гипоксии, а лишь выдвинуто предложение по использованию данной методики для оценки влияния различных степеней гипоксии на переносимость физической нагрузки человеком.

Следует отметить, что изучению физической работоспособности (ФР) как интегрального показателя состояния организма при воздействии горной гипоксии посвящено большое количество работ [39–47].

Многочисленные исследования начиная с ранней работы N. Zuntz показали, что максимальная физическая работоспособность, или максимальное потребление кислорода (VO_{2max}), снижается после подъема на большую высоту [48]. Данные ряда исследований, собранные P. Cerretelli [49], демонстрируют снижение VO_{2max} на 5–10 % по сравнению с уровнем моря даже на очень скромной высоте 2500 м, примечательно, что отсутствовали различия между испытуемыми, подвергшимися воздействию острой гипоксии, и теми, кто имел преимущество акклиматизации. Другими словами, VO_{2max} не возвращается к значениям уровня моря при акклиматизации. Небольшое снижение VO_{2max} у профессиональных спортсменов наблюдается уже на высоте 500 м над уровнем моря [50]. Еще одной важной особенностью является тот факт, что снижение максимальной ФР происходит, независимо от исходного уровня физической подготовки человека [51, 52].

Важность снижения VO_{2max} заключается в том, что способность к выполнению физической работы снижается, так что выполнять упражнения с той же интенсивностью становится труднее. Например, альпинист, пытающийся выполнять физические упражнения с той же интенсивностью, что и на уровне моря, заметит большее ощущение усилия или будет вынужден снизить интенсивность тренировки в устойчивом состоянии для достижения того же процента от VO_{2max} .

Наблюдение P. Cerretelli о том, что акклиматизация не приводит к улучшению VO_{2max} , противоречит опыту многих альпинистов, которые считают, что после акклиматизации они лучше работают на большой высоте. Причина этого кажущегося несоответствия заключается в том, что альпинизм, треккинг и многие другие виды деятельности на большой высоте не выполняются на уровне VO_{2max} или близком к нему, а наоборот, выполняются при субмаксимальной интенсивности, где улучшение происходит после акклиматизации [53–56]. Например, еще в 1958 г. L. G. Pugh показал, что потребление кислорода у альпинистов, успешно достигающих высоты 6000 м, соответствует от 1/2 до 3/4 от VO_{2max} [57]. К сожалению, важность этого раннего наблюдения была в значительной степени упущена учеными, изучающими ФР во время акклиматизации; основное внимание сосредоточено на изменениях различных параметров и их влиянии на максимальную произво-

дительность, тогда как в действительности больше внимания должно быть сосредоточено на субмаксимальной.

Для оценки ФР используются различные прямые и косвенные параметры и показатели: уровень физической нагрузки; максимальное потребление кислорода, достигнутое при предельной по интенсивности нагрузке; величина нагрузки, при которой достигается определенная частота сердечных сокращений (например, тесты с определением PWC170, PWC150 и PWC130) [58]; индекс гарвардского степ-теста, индекс Руфье Диксона [59]; показатели при достижении порога анаэробного обмена и др. [60].

На практике ФР определяется с использованием функциональных проб, которых насчитывается более 200. Ввиду относительной простоты проведения и отсутствия необходимости в дополнительном оборудовании наиболее часто используются пробы Руфье с приседаниями за 30 с, 3-минутный бег на месте, а также пробы с задержкой дыхания: Проба Штанге, Генчи, Серкина [61].

Для определения ФР организма и общей ФР в медицинской практике и в спорте высших достижений используют пробы с физической нагрузкой. Подобные тесты являются унифицированными для оценки функционального состояния и выявления нарушения толерантности к физической нагрузке, а также дают возможность оценить уровень общей физической работоспособности, независимо от воздействия окружающих факторов. Преимущество также отдается тем видам нагрузки, при выполнении которых регистрация показателей может быть выполнена непосредственно во время тестирования. В зависимости от технического оснащения нагрузочные тесты можно разделить на две группы [62]:

1) высокотехнологичные методы исследования и оценки, к которым относятся кардиопульмональные нагрузочные тестирования (КПНТ) (требуется дорогостоящее оборудование: эргоспирометрические системы, беговые дорожки, велоргометры и т.д., – позволяющее провести оценку функции дыхательной и сердечно-сосудистой систем;

2) лабораторные и внелабораторные, или «полевые», нагрузочные тесты (не требуется специальное оборудование).

По сравнению с нагрузочными тестами (лабораторными и внелабораторными) КПНТ представляет собой более информативный метод, который позволяет получить интегративный ответ на физическую нагрузку, включающую в себя: легочную, сердечно-сосудистую, кроветворную, нейропсихологическую и скелетно-мышечную системы, которые не отражаются адекватно через измерение функции отдельной системы органов [63, 64], считаясь «золотым стандартом» для функциональной оценки кардиопульмональной функции [65–67]. Этот неинвазивный, динамический физиологический обзор позволяет оценить как субмаксимальные, так и пиковые ответы на физические нагрузки, предоставляя врачу вспомогательную информацию о функциональном состоянии организма для оценки работоспособности и уточнения причин функциональных нарушений, необходимых для принятия клинического решения и определения тактики и стратегии ведения пациентов [68, 69].

В настоящее время системы КПНТ позволяют оценить функциональное состояние сердечно-сосудистой и дыхательной систем как в покое, так и при выполнении нагрузки, основываясь на регистрации ряда показателей: потребление кислорода, выделения углекислого газа, объем вентиляции легких,

частота дыхания, частота сердечных сокращений, артериальное давление, время нагрузки, характеристик анаэробного порога [62, 64].

Таким образом, на сегодня существует несколько методических подходов к оценке устойчивости организма к гипоксии, для каждого из них есть свои показания и особенности применения: методы, основанные на регистрации изменений генетических и биохимических маркеров гипоксии; функциональные пробы (проба Штанге, Генча, Серкина, Розенталя и др.), сопровождающиеся кратковременной острой гипоксией, с учетом антропометрических данных и без таковых; методы оценки устойчивости к гипоксии, основанные на дыхании воздухом с пониженным содержанием кислорода без выполнения физических нагрузок (наличие гипоксической гипоксии, гипобарической гипоксии) и с выполнением физических нагрузок (наличие гипоксической гипоксии и гипоксии нагрузки) и проведением КПНТ и без такового. Все данные подходы к оценке устойчивости к гипоксии имеют право на существование, а при выборе метода оценки следует учитывать инструментальные возможности, время для проведения оценки, целевой контингент, место проведения и т.д. Каждый из данных подходов имеет свои положительные и отрицательные стороны, которые следует учитывать при оценке устойчивости к гипоксии. Однако, по нашему мнению, подход к оценке устойчивости человека к гипоксии при выполнении физических нагрузок с учетом полноценной оценки реакции кардиореспираторной системы (что позволяют делать КПНТ) является наиболее верным и объективным. В то же время остается открытым ряд вопросов: какой уровень гипоксического воздействия, предъявляемый испытуемым, и какой характер физической нагрузки являются наиболее объективными, а также на основании каких критериев необходимо проводить оценку устойчивости человека к гипоксии при выполнении физических нагрузок. Решение этих вопросов требует проведения экспериментальных исследований, научной основой которых станет изучение взаимосвязей между функциональной реактивностью организма и его физической работоспособностью в неблагоприятных условиях горной местности, что является целевой установкой для наших дальнейших работ.

Список литературы

1. Образцов Л. Н. Курс избранных лекций по военно-медицинской географии : учеб. пособие / под общей ред. А. М. Шелепова. СПб. : ВМедА им. С. М. Кирова, 2003. 112 с.
2. Левченкова О. С., Новиков В. Е. Индукторы регуляторного фактора адаптации к гипоксии // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2014. № 2. С. 134–144.
3. Образцов Л. Н. Особенности медицинского обеспечения подразделений Сухопутных войск в горных ландшафтах : учеб. пособие / под ред. проф. А. М. Шелепова. СПб. : ВМедА, 2005. 88 с.
4. Davis C., Hackett P. Advances in the prevention and treatment of high altitude illness // Emergency Medicine Clinics of North America. 2017. Vol. 35. P. 241–260. doi:10.1016/j.emc.2017.01.002
5. Faulhaber M., Wille M., Gatterer H. [et al.]. Resting arterial oxygen saturation and breathing frequency as predictors for acute mountain sickness development: a prospective cohort study // Sleep Breath. 2014. Vol. 18, № 3 P. 669–674. doi:10.1007/s11325-013-0932-2

6. Bjertness E., Gonggalahzi, Labasangzhu [et al.]. Acute mountain sickness, arterial oxygen saturation and heart rate among Tibetan students who reascend to Lhasa after 7 years at low altitude: a prospective cohort study // *BMJ open*. 2017. Vol. 7 (7). P. e016460. doi:10.1136/bmjopen-2017-016460
7. Imray C., Wright A., Subudhi A., Roach R. Acute mountain sickness: pathophysiology, prevention, and treatment // *Progress in cardiovascular diseases*. 2010. Vol. 52, № 6. P. 467–484. doi:10.1016/j.pcad.2010.02.003
8. Васин М. В., Ушаков И. Б. Активация комплекса II дыхательной цепи во время острой гипоксии как индикатор ее переносимости // *Биофизика*. 2018. Т. 63, № 2. С. 329–333.
9. Айзятуллова Е. Д., Жарков А. В., Балыкин М. В. Физическая работоспособность спортсменов с полиморфизмом в гене HIF1 α // *Механизмы функционирования нервной, эндокринной и висцеральных систем в процессе онтогенеза : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 75-летию Адыгейского гос. ун-та (г. Майкоп, 08–09 октября 2015 г.)*. Майкоп : Изд-во Адыгейского гос. ун-та, 2015. С. 20–23.
10. Пятибрат А. О. Молекулярные механизмы и фармакологическая поддержка адаптации к профессиональной деятельности в экстремальных условиях : дис. ... д-ра мед. наук. Минск, 2016. 295 с.
11. Моссэ И. Б., Гончар А. Л., Жур К. В. [и др.]. Генетические маркеры устойчивости организма к гипоксии // *Молекулярная и прикладная генетика*. 2010. Т. 11. С. 74–82.
12. Dias R. G., Peretra A., Negrão C. [et al.]. Genetic polymorphisms determining of the physical performance in elite athletes // *Revista Brasileira de Medicina Esporte*. 2007. Vol. 13, № 3 P. 186–192. doi:10.1590/S1517-86922007000300016
13. Wu J., Hu Y., Liu G. SNP A79G in the second exon of the myoglobin gene in elite long distance runners // *British Journal of Sports Medicine*. 2005. Vol. 39. P. 781–782. doi:10.1136/bjism.2004.017145
14. Ahmetov I. I., Popov D., Missina S. [et al.]. Polymorphism of the Vascular Endothelial Growth Factor Gene (VEGF) and Aerobic Performance in Athletes // *Human Physiology*. 2008. Vol. 34, № 4. P. 477–481. doi:10.1134/S0362119708040129
15. Патент 2538381 С2 Российская Федерация, МПК А61В 5/00, А61В 5/107. Способ оценки устойчивости функциональных систем организма к высокогорной гипоксии / Дергунов А. В., Пятибрат Е. Д., Ивченко Е. В. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова (ВМедА). № 2012138003/14 ; заявл. 05.09.2012 ; опубл. 10.01.2015.
16. Патент 2140764 С1 Российская Федерация, МПК А61В 5/04, А61В 5/02. Способ определения у горных туристов устойчивости к гипоксии / Пастухов О. Г., Варданянц А. Э., Кузнецов А. И. № 97111601/14 ; заявл. 08.07.1997 ; опубл. 10.11.1999.
17. Bärtsch P., Swenson E. R., Paul A. [et al.]. Hypoxic ventilatory response, ventilation, gas exchange, and fluid balance in acute mountain sickness // *High Altitude Medicine & Biology*. 2002. Vol. 3, № 4. P. 361–376. doi:10.1089/15270290260512846
18. Song H., Ke T., Luo W.-J., Chen J.-Y. Non-high altitude methods for rapid screening of susceptibility to acute mountain sickness // *BMC Public Health*. 2013. Vol. 13, № 1. P. 1–7. doi:10.1186/1471-2458-13-902
19. Акунов А. Ч. Применение симулированного высокогорья для выявления субъектов, склонных к развитию острой горной болезни // *Известия ВУЗОВ (Кыргызстан)*. 2010. № 2. С. 8–10.
20. Burtcher M., Flatz M., Faulhaber M. Prediction of susceptibility to acute mountain sickness by SaO₂ values during short-term exposure to hypoxia // *High Altitude Medicine & Biology*. 2004. Vol. 5, № 3. P. 335–340. doi:10.1089/ham.2004.5.335
21. Paul S., Gangwar A., Bhargava K. [et al.]. Diagnosis and prophylaxis for high-altitude acclimatization: Adherence to molecular rationale to evade high-altitude illnesses // *Life sciences*. 2018. Vol. 203. P. 171–176. doi.org/10.1016/j.lfs.2018.04.040

22. Об утверждении Федеральных авиационных правил медицинского обеспечения полетов государственной авиации : приказ Минобороны РФ № 265 от 27 апреля 2009 г. // КонсультантПлюс.
23. Правила водолазной службы ВМФ. М. : Военное издательство, 2003. С. 286.
24. Глазачев О. С., Геппе Н. А., Тимофеев Ю. С. [и др.]. Индикаторы индивидуальной устойчивости к гипоксии – путь оптимизации применения гипоксических тренировок у детей // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2020. Т. 65, № 4. doi:10.21508/1027-4065-2020-65-4-78-84.
25. Зеленкова И. Е. Физиологические процессы гипоксической устойчивости спортсменов различной квалификации при дозированных физических нагрузках : автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2014. 163 с.
26. Методические рекомендации ОКР. Применение дополнительного искусственного гипоксического воздействия в спорте высших достижений. М., 2013. С. 11.
27. Дергунов А. В. Патофизиологическая оценка и фармакокоррекция процессов высокогорной адаптации у лиц со скрытыми формами недостаточности кровообращения, дыхания и при их сочетании : автореф. дис. ... д-ра мед. наук : 14.00.16 / Рос. ун-т дружбы народов. М., 1995. 268 с.
28. Газенко О. Г., Гиппенрейтер Е. Б., Малкин В. Б. Экспертная оценка высотной устойчивости кандидатов в состав советской экспедиции "Эверест-82" // Адаптация и резистентность организма в условиях гор. Киев, 1986. С. 124–137.
29. Патент 2020868 Российская Федерация, МПК А61В 5/08. Способ определения адаптационной устойчивости человека к гипоксии / Галанцев В. П., Январева И. Н., Савченко Б. Н. ; патентообладатель Санкт-Петербургский государственный университет. № 5017555/14 ; заявл. 18.12.1991 ; опубл. 15.10.1994.
30. Махновский В. П. Индивидуально-типологическая оценка и коррекция резистентности организма человека в процессе адаптации к высокогорной гипоксии : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Бишкек, 2005. 40 с.
31. Тимофеев Н. Н., Королев Ю. Н., Апенков А. Ф. Вопросы адаптации военнослужащих к условиям высокогорья // Актуальные проблемы физической подготовки силовых структур. 2012. № 2. С. 57–61.
32. Глазырина Т. М., Ганапольский В. П., Юсупов В. В., Ятманов А. Н. Модель устойчивости к факторам высокогорья у лиц призывного возраста // Экстремальная деятельность. 2016. № 4. С. 29–31.
33. Филиппов М. М., Балыкин М. В., Ильин В. Н. [и др.]. Сравнительная характеристика гипоксии, развивающейся при мышечной деятельности, и гипоксической гипоксии в горах // Ульяновский медико-биологический журнал. 2014. № 4. С. 86–95.
34. Быков В. Н., Ветряков О. В., Цыган В. Н. [и др.]. Оценка устойчивости военнослужащих к гипоксии на фоне гипобарии и высокой физической активности // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2017. Т. 59, № 3. С. 129–133.
35. Головина А. С., Филиппова Е. Б., Голубев В. Н. [и др.]. О влиянии интервальных гипоксических тренировок на параметры сердечного выброса // Здоровье и образование в XX веке. 2008. Т. 10, № 7. С. 336–337.
36. Голубев В. Н., Головина А. С., Филиппова Е. Б. [и др.]. Состояние физической работоспособности после курса интервальных гипоксических тренировок // Актуальные проблемы физической подготовки силовых структур. 2015. № 3. С. 35–41.
37. Ворников М. В., Разинкин С. М., Петрова В. В. [и др.]. Методика индивидуальной оценки устойчивости спортсменов к максимальным физическим нагрузкам в условиях измененной гипоксической и гипотермической среды // Медицина труда и промышленная экология. 2013. № 9. С. 37–42.
38. Ветряков О. В., Халимов Ю. Ш., Быков В. Н., Фисун А. Я. Влияние различных степеней нормобарической гипоксии на физическую работоспособность человека // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2018. Т. 62, № 2. С. 7–9.

39. Calbet J. A. L., Lundby C., Boushel R. Integrative conductance of oxygen during exercise at altitude // *Hypoxia*. 2016. P. 395–408. doi:10.1007/978-1-4899-7678-9_26
40. Casey D. P., Joyner M. J. Compensatory vasodilatation during hypoxic exercise: mechanisms responsible for matching oxygen supply to demand // *The Journal of physiology*. 2012. Vol. 590, № 24. P. 6321–6326. doi:10.1113/jphysiol.2012.242396
41. Harvey N. R. [et al.]. Genetic variants associated with exercise performance in both moderately trained and highly trained individuals // *Molecular Genetics and Genomics*. 2020. Vol. 295, № 2. P. 515–523. doi:10.1007/s00438-019-01639-8
42. Lovering A. T., Duke J. W., Elliott J. E. Intrapulmonary arteriovenous anastomoses in humans—response to exercise and the environment // *The Journal of physiology*. 2015. Vol. 593, № 3. P. 507–520. doi:10.1113/jphysiol.2014.275495
43. Stembridge M., Ainslie P. N., Shave R. Mechanisms underlying reductions in stroke volume at rest and during exercise at high altitude // *European journal of sport science*. 2016. Vol. 16, № 5. P. 577–584. doi:10.1080/17461391.2015.1071876
44. Sutton J. R., Houston C. S. Hypoxia: the tolerable limits. Brown & Benchmark Pub., 1988.
45. Verges S., Rupp T., Jubeau M., Wuyam B. [et al.]. Cerebral perturbations during exercise in hypoxia // *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2012. № 302. P. 903–916.
46. Wagner P. D. A theoretical analysis of factors determining VO₂max at sea level and altitude // *Respiration physiology*. 1996. Vol. 106, № 3. P. 329–343. doi: 10.1016/S0034-5687(96)00086-2
47. Walsh N. P., Oliver S. J. Exercise, immune function and respiratory infection: An update on the influence of training and environmental stress // *Immunology and cell biology*. 2016. Vol. 94, № 2. P. 132–139. doi:10.1038/icb.2015.99
48. Zuntz N. [et al.]. Höhenklima und Bergwanderungen in ihrer Wirkung auf den Menschen: Ergebnisse experimenteller Forschungen im Hochgebirge und Laboratorium. Berlin : Deuthches Verlagshaus Bong & Company, 1906.
49. Cerretelli P. Gas exchange at high altitude // *Pulmonary gas exchange*. 1980. Vol. 2. P. 97–147.
50. Wehrlin J. P., Hallen J. Linear decrease in V.O₂max and performance with increasing altitude in endurance athletes // *Eur J Appl Physiol*. 2006. Vol. 96, № 4. P. 404–412. doi:10.1007/s00421-005-0081-9
51. West J. B., Hachett P., Bayer S. J., Graber D. J. Maximal exercise at extreme altitudes on Mount Everest // *Journal of applied physiology*. 1983. Vol. 55, № 3. P. 688–698. doi:10.1152/jappl.1983.55.3.688
52. Fulco C. S., Rock P. B., Cymerman A. Maximal and submaximal exercise performance at altitude // *Aviation Space and Environmental Medicine*. 1998. Vol. 69, № 8. P. 793.
53. Horstman D., Weiskopf R., Jackson R. E. Work capacity during 3-wk sojourn at 4,300 m: effects of relative polycythemia // *Journal of Applied Physiology*. 1980. Vol. 49, № 2. P. 311–318. doi:10.1152/jappl.1980.49.2.311
54. Latshang T. D., Turk A. J., Schoch O., Hess T. Acclimatization improves submaximal exercise economy at 5533 m // *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 2013. Vol. 23, № 4. P. 458–467. doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01403.x
55. Maher J. T., Jones L. G., Hartley L. H. Effects of high-altitude exposure on submaximal endurance capacity of men // *Journal of Applied Physiology*. 1974. Vol. 37, № 6. P. 895–898. doi: 10.1152/jappl.1974.37.6.8
56. Subudhi A. W., Bourdillon N., Bucher J. [et al.]. AltitudeOmics: the integrative physiology of human acclimatization to hypobaric hypoxia and its retention upon reascent // *PloS one*. 2014. Vol. 9, № 3. P. e92191. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092191>
57. Pugh L. G. C. E. Muscular exercise on Mount Everest // *The Journal of Physiology*. 1958. Vol. 141, № 2. P. 233. doi:10.1113/jphysiol.1958.sp005970

58. Белоцерковский З. Б. Эргометрические и кардиологические критерии физической работоспособности у спортсменов : учеб. пособие. 2-е изд., доп. М. : Советский спорт, 2009. 308 с.
59. Методы исследования и фармакологической коррекции физической работоспособности человека : монография / под ред. академика РАН И. Б. Ушакова. М. : Медицина, 2007. 104 с.
60. Лелявина Т. А., Ситникова М. Ю., Березина А. В., Шляхто Е. В. Значение и корректность термина “анаэробный порог”. Пороговые изменения компенсаторно-приспособительных реакций организма при возрастающей физической нагрузке // Российский кардиологический журнал. 2014. Т. 11, № 115. С. 19–24. doi:10.15829/1560-4071-2014-11-19-24.
61. Ребизова Е. А., Гусаков И. Г., Гиль Г. В., Бритыко Е. А. Проба Штанге и Генчи как определение возможности организма // Материалы докладов 52-й Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов. 2019. С. 365–367.
62. Мустафина М. Х., Черняк А. В. Кардиореспираторный нагрузочный тест // Атмосфера. Пульмонология и аллергология. 2013. № 3. С. 56–62.
63. Albouaini K., Egred M., Alahmar A., Wright D. J. Cardiopulmonary exercise testing and its application // Heart. 2007. Vol. 93, № 10. P. 1285–1292.
64. Herdy A. H., Ritt L. E., Stein R., Araujo C. G. Cardiopulmonary exercise test: background, applicability and interpretation // Arquivos brasileiros de cardiologia. 2016. Vol. 107, P. 467–481. doi:10.5935/abc.20160171
65. Guazzi M., Cohraads V. M., Adams V., Halle M. EACPR/AHA Scientific Statement. Clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations // Circulation. 2012. Vol. 126, № 18. P. 2261–2274. doi:10.1161/cir.0b013e31826fb946
66. Herdy A. H., Uhlendorf D. Reference values for cardiopulmonary exercise testing for sedentary and active men and women // Arquivos brasileiros de cardiologia. 2011. Vol. 96. P. 54–59. doi:10.1590/S0066-782X2010005000155
67. Piepoli M. F., Agostoni P. G., Corra U., Belardinelli R. Statement on cardiopulmonary exercise testing in chronic heart failure due to left ventricular dysfunction: recommendations for performance and interpretation Part II: How to perform cardiopulmonary exercise testing in chronic heart failure // European journal of cardiovascular prevention and rehabilitation: official journal of the European Society of Cardiology, Working Groups on Epidemiology & Prevention and Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology. 2006. Vol. 13, № 3. P. 300–311. doi:10.1097/00149831-200606000-00003
68. Кербигов О. Б., Аверьянов А. В., Борская Е. Н., Крутова Т. В. Кардиопульмональное нагрузочное тестирование в клинической практике // Клиническая практика. 2012. № 2. С. 58–70.
69. Balady G. J., Sietsema K., Arena R., Myers J. Clinician’s guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association // Circulation. 2010. Vol. 122, № 2. P. 191–225. doi:10.1161/CIR.0b013e3181e52e69

References

1. Obratsov L.N. *Kurs izbrannykh lektsiy po voenno-meditsinskoy geografii: ucheb. posobie = A course of selected lectures on military medical geography: textbook*. Saint Petersburg: VMedA im. S.M. Kirova, 2003:112. (In Russ.)
2. Levchenkova O.S., Novikov V.E. Inducers of the regulatory factor of adaptation to hypoxia. *Rossiyskiy mediko-biologicheskiy vestnik imeni akademika I.P. Pavlova = Russian medical and biological bulletin named after academician I.P. Pavlova*. 2014;(2):134–144. (In Russ.)
3. Obratsov L.N. *Osobennosti meditsinskogo obespecheniya podrazdeleniy Sukhoputnykh voysk v gornykh landshaftakh : ucheb. posobie = Peculiarities of medical support*

- for units of the Ground Forces in mountain landscapes: textbook. Saint Petersburg: VMedA, 2005:88. (In Russ.)
4. Davis C., Hackett P. Advances in the prevention and treatment of high altitude illness. *Emergency Medicine Clinics of North America*. 2017;35:241–260. doi:10.1016/j.emc.2017.01.002
 5. Faulhaber M., Wille M., Gatterer H. et al. Resting arterial oxygen saturation and breathing frequency as predictors for acute mountain sickness development: a prospective cohort study. *Sleep Breath*. 2014;18(3):669–674. doi:10.1007/s11325-013-0932-2
 6. Bjertness E., Gonggalahzi, Labasangzhu et al. Acute mountain sickness, arterial oxygen saturation and heart rate among Tibetan students who reascend to Lhasa after 7 years at low altitude: a pro-spective cohort study. *BMJ open*. 2017;7(7):e016460. doi:1136/bmjopen-2017-016460
 7. Imray C. Wright A., Subudhi A., Roach R. Acute mountain sickness: pathophysiology, prevention, and treatment. *Progress in cardiovascular diseases*. 2010;52(6):467–484. doi:10.1016/j.pcad.2010.02.003
 8. Vasin M.V., Ushakov I.B. Activation of the 2nd complex of the respiratory chain during acute hypoxia as an indicator of its tolerance. *Biofizika = Biophysics*. 2018;63(2):329–333. (In Russ.)
 9. Ayzatulova E.D., Zharkov A.V., Balykin M.V. Physical performance of athletes with polymorphism in the HIF1 α gene. *Mekhanizmy funktsionirovaniya nervnoy, endokrinnoy i vistseral'nykh sistem v protsesse ontogeneza : materialy Mezhdunar. nauch. konf., posvyashchennoy 75-letiyu Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta (g. Maykop, 08–09 oktyabrya 2015 g.) = Functioning mechanisms of the nervous, endocrine and visceral systems in the process of ontogenesis: proceedings of the International scientific conference, dedicted to the 75th anniversary of Adygei State University (Maikop, October 8-9, 2015)*. Maykop: Izd-vo Adygeyskogo gos. un-ta, 2015:20–23. (In Russ.)
 10. Pyatibrat A.O. *Molecular mechanisms and pharmacological support of adaptation to professional activity in extreme conditions*. PhD dissertation. Minsk, 2016:295. (In Russ.)
 11. Mosse I. B., Gonchar A. L., Zhur K. V. et al. Genetic markers of organism resistance to hypoxia. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika = Molecular and applied genetics*. 2010;11:74–82. (In Russ.)
 12. Dias R. G., Peretra A., Negrão C. et al. Genetic polymorphisms determining of the physical performance in elite athletes. *Revista Brasileira de Medicina Esporte*. 2007;13(3):186–192. doi:10.1590/S1517-86922007000300016
 13. Wu J., Hu Y., Liu G. SNP A79G in the second exon of the myoglobin gene in elite long distance runners. *British Journal of Sports Medicine*. 2005;39:781–782. doi:10.1136/bjsm.2004.017145
 14. Ahmetov I. I., Popov D., Missina S. et al. Polymorphism of the Vascular Endothelial Growth Factor Gene (VEGF) and Aerobic Performance in Athletes. *Human Physiology*. 2008;34(4):477–481. doi:10.1134/S0362119708040129
 15. Patent 2538381 S2 Russian Federation, MPK A61V 5/00, A61V 5/107. *Sposob otsenki ustoychivosti funktsional'nykh sistem organizma k vysokogornoy gipoksii = Method for assessing the resistance of the functional systems of the body to high-mountain hypoxia*. Dergunov A.V., Pyatibrat E.D., Ivchenko E.V. et al.; patent holder Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe voennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Voenno-meditsinskaya akademiya im. S.M. Kirova (VMedA). № 2012138003/14; appl. 05.09.2012; publ. 10.01.2015. (In Russ.)
 16. Patent 2140764 C1 Russian Federation, MPK A61V 5/04, A61V 5/02. *Sposob opredeleniya u gornykh turistov ustoychivosti k gipoksii = Method for determining resistance to hypoxia in mountain tourists*. Pastukhov O.G., Vardan'yants A.E., Kuznetsov A.I. № 97111601/14; appl. 08.07.1997; publ. 10.11.1999. (In Russ.)

17. Bärtsch P., Swenson E. R., Paul A. et al. Hypoxic ventilatory response, ventilation, gas exchange, and fluid balance in acute mountain sickness. *High Altitude Medicine & Biology*. 2002;3(4):361–376. doi:10.1089/15270290260512846
18. Song H., Ke T., Luo W.-J., Chen J.-Y. Non-high altitude methods for rapid screening of susceptibility to acute mountain sickness. *BMC Public Health*. 2013;13(1):1–7. doi:10.1186/1471-2458-13-902
19. Akunov A.Ch. The use of simulated highlands to identify subjects prone to the development of acute mountain sickness. *Izvestiya VUZOV (Kyrgyzstan) = University proceedings (Kyrgyzstan)*. 2010;(2):8–10. (In Russ.)
20. Bartscher M., Flatz M., Faulhaber M. Prediction of susceptibility to acute mountain sickness by SaO₂ values during short-term exposure to hypoxia. *High Altitude Medicine & Biology*. 2004;5(3):335–340. doi:10.1089/ham.2004.5.335
21. Paul S., Gangwar A., Bhargava K. et al. Diagnosis and prophylaxis for high-altitude acclimatization: Adherence to molecular rationale to evade high-altitude illnesses. *Life sciences*. 2018;203:171–176. doi.org/10.1016/j.lfs.2018.04.040
22. On the approval of the Federal Aviation Rules for the medical support of state aviation flights: Order of the Ministry of Defense of the Russian Federation No.265 from April 27, 2009. *Konsul'tantPlus = KonsultantPlus*. (In Russ.)
23. *Pravila vodolaznoy sluzhby VMF = Navy Diving Service Regulations*. Moscow: Voennoe izdatel'stvo, 2003:286. (In Russ.)
24. Glazachev O.S., Geppe N.A., Timofeev Yu.S. et al. Indicators of individual resistance to hypoxia - a way to optimize the use of hypoxic training in children. *Rossiyskiy vestnik perinatologii i pediatrii = Russian bulletin of perinatology and pediatrics*. 2020;65(4). (In Russ.). doi:10.21508/1027-4065-2020-65-4-78-84.
25. Zelenkova I.E. *Physiological processes of hypoxic resistance of athletes of various qualifications under dosed physical loads*. PhD abstract. Moscow, 2014:163. (In Russ.)
26. *Metodicheskie rekomendatsii OKR. Primenenie dopolnitel'nogo iskusstvennogo gipoksicheskogo vozdeystviya v sporte vysshikh dostizheniy = Methodological recommendations of the OKR. The use of additional artificial hypoxic exposure in elite sports*. Moscow, 2013:11. (In Russ.)
27. Dergunov A.V. *Pathophysiological assessment and pharmacocorrection of high-mountain adaptation processes in persons with latent forms of circulatory and respiratory failure and their combination*. PhD abstract. Moscow, 1995:268. (In Russ.)
28. Gazenko O.G., Gippenreyter E.B., Malkin V.B. Expert assessment of high-altitude stability of candidates for the Soviet expedition “Everest-82”. *Adaptatsiya i rezistentnost' organizma v usloviyakh gor = Adaptation and resistance of the body in the mountains*. Kiev, 1986:124–137. (In Russ.)
29. Patent 2020868 Russian Federation, MPK A61V 5/08. *Sposob opredeleniya adaptatsionnoy ustoychivosti cheloveka k gipoksii = Method for determining the adaptive resistance of a person to hypoxia*. Galantsev V.P., Yanvareva I.N., Savchenko B.N.; patent holder Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet. № 5017555/14; appl. 18.12.1991; publ. 15.10.1994. (In Russ.)
30. Makhnovskiy V.P. *Individual-typological assessment and correction of the resistance of the human body in the process of adaptation to high-mountain hypoxia*. PhD abstract. Bishkek, 2005:40. (In Russ.)
31. Timofeev N.N., Korolev Yu.N., Apenkov A.F. Issues of adaptation of military personnel to the conditions of high mountains. *Aktual'nye problemy fizicheskoy podgotovki silovykh struktur = Actual problems of physical training of military structures*. 2012;(2):57–61. (In Russ.)
32. Glazyrina T.M., Ganapol'skiy V.P., Yusupov V.V., Yatmanov A.N. Model of resistance to high altitude factors in persons of military age. *Ekstremal'naya deyatel'nost' = Extreme activity*. 2016;(4):29–31. (In Russ.)

33. Filippov M.M., Balykin M.V., Il'in V.N. et al. Comparative characteristics of hypoxia developing during muscular activity and hypoxic hypoxia in the mountains. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskiy zhurnal = Ulyanovsk medical and biological journal*. 2014;(4):86–95. (In Russ.)
34. Bykov V.N., Vetryakov O.V., Tsygan V.N. et al. Evaluation of the resistance of military personnel to hypoxia against the background of hypobaria and high physical activity. *Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2017;59(3):129–133. (In Russ.)
35. Golovina A.S., Filippova E.B., Golubev V.N. et al. On the effect of interval hypoxic training on cardiac output parameters. *Zdorov'e i obrazovanie v XX veke = Health and education in the 20th century*. 2008;10(7):336–337. (In Russ.)
36. Golubev V.N., Golovina A.S., Filippova E.B. et al. The state of physical performance after a course of interval hypoxic training. *Aktual'nye problemy fizicheskoy podgotovki silovykh struktur = Actual problems of physical training of power structures*. 2015;(3):35–41. (In Russ.)
37. Vornikov M.V., Razinkin S.M., Petrova V.V. et al. A method for individually assessing the resistance of athletes to maximum physical exertion in a changing hypoxic and hypothermic environment. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational health and industrial ecology*. 2013;(9):37–42. (In Russ.)
38. Vetryakov O.V., Khalimov Yu.Sh., Bykov V.N., Fisun A.Ya. The influence of various degrees of normobaric hypoxia on the human physical performance. *Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2018;62(2):7–9. (In Russ.)
39. Calbet J.A.L., Lundby C., Boushel R. Integrative conductance of oxygen during exercise at altitude. *Hypoxia*. 2016;395–408. doi:10.1007/978-1-4899-7678-9_26
40. Casey D.P., Joyner M.J. Compensatory vasodilatation during hypoxic exercise: mechanisms responsible for matching oxygen supply to demand. *The Journal of physiology*. 2012;590(24):6321–6326. doi:10.1113/jphysiol.2012.242396
41. Harvey N.R. et al. Genetic variants associated with exercise performance in both moderately trained and highly trained individuals. *Molecular Genetics and Genomics*. 2020;295(2):515–523. doi:10.1007/s00438-019-01639-8
42. Lovering A.T., Duke J.W., Elliott J.E. Intrapulmonary arteriovenous anastomoses in humans—response to exercise and the environment. *The Journal of physiology*. 2015;593(3):507–520. doi:10.1113/jphysiol.2014.275495
43. Stembridge M., Ainslie P.N., Shave R. Mechanisms underlying reductions in stroke volume at rest and during exercise at high altitude. *European journal of sport science*. 2016;16(5):577–584. doi:10.1080/17461391.2015.1071876
44. Sutton J.R., Houston C.S. *Hypoxia: the tolerable limits*. Brown & Benchmark Pub., 1988.
45. Verges S., Rupp T., Jubeau M., Wuyam B. [et al.]. Cerebral perturbations during exercise in hypoxia. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2012;(302):903–916.
46. Wagner P.D. A theoretical analysis of factors determining VO₂max at sea level and altitude. *Respiration physiology*. 1996;106(3):329–343. doi: 10.1016/S0034-5687(96)00086-2
47. Walsh N.P., Oliver S.J. Exercise, immune function and respiratory infection: An update on the influence of training and environmental stress. *Immunology and cell biology*. 2016;94(2):132–139. doi:10.1038/icb.2015.99
48. Zuntz N. et al. *Höhenklima und Bergwanderungen in ihrer Wirkung auf den Menschen: Ergebnisse experimenteller Forschungen im Hochgebirge und Laboratorium*. Berlin: Deuthches Verlagshaus Bong & Company, 1906.
49. Cerretelli P. Gas exchange at high altitude. *Pulmonary gas exchange*. 1980;2:97–147.
50. Wehrlin J.P., Hallen J. Linear decrease in V.O₂max and performance with increasing altitude in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol*. 2006;96(4):404–412. doi:10.1007/s00421-005-0081-9

51. West J. B., Hachett P., Bayer S. J., Graber D. J. Maximal exercise at extreme altitudes on Mount Everest. *Journal of applied physiology*. 1983;55(3):688–698. doi:10.1152/jappl.1983.55.3.688
52. Fulco C.S., Rock P.B., Cymerman A. Maximal and submaximal exercise performance at altitude. *Aviation Space and Environmental Medicine*. 1998;69(8):793.
53. Horstman D., Weiskopf R., Jackson R.E. Work capacity during 3-wk sojourn at 4,300 m: effects of relative polycythemia. *Journal of Applied Physiology*. 1980;49(2):311–318. doi:10.1152/jappl.1980.49.2.311
54. Latshang T. D., Turk A. J., Schoch O., Hess T. Acclimatization improves submaximal exercise economy at 5533 m. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 2013;23(4):458–467. doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01403.x
55. Maher J.T., Jones L.G., Hartley L.H. Effects of high-altitude exposure on submaximal endurance capacity of men. *Journal of Applied Physiology*. 1974;37(6):895–898. doi: 10.1152/jappl.1974.37.6.8
56. Subudhi A.W., Bourdillon N., Bucher J. et al. AltitudeOmics: the integrative physiology of human acclimatization to hypobaric hypoxia and its retention upon reascent. *PLoS one*. 2014;9(3):e92191. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092191>
57. Pugh L.G.C.E. Muscular exercise on Mount Everest. *The Journal of Physiology*. 1958;141(2):233. doi:10.1113/jphysiol.1958.sp005970
58. Belotserkovskiy Z.B. *Ergometricheskie i kardiologicheskie kriterii fizicheskoy rabotosposobnosti u sportsmenov: ucheb. posobie. 2-e izd., dop.* = *Ergometric and cardiological criteria for physical performance in athletes: textbook, the 2nd edition, supplemented*. Moscow: Sovetskiy sport, 2009:308. (In Russ.)
59. Ushakov I.B. (ed.). *Metody issledovaniya i farmakologicheskoy korrektsii fizicheskoy rabotosposobnosti cheloveka: monografiya* = *Research methods and pharmacological correction of human physical performance: monograph*. Moscow: Meditsina, 2007:104. (In Russ.)
60. Lelyavina T.A., Sitnikova M.Yu., Berezina A.V., Shlyakhto E.V. The meaning and correctness of the term “anaerobic threshold”. Threshold changes in compensatory-adaptive reactions of the body with increasing physical activity. *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian journal of cardiology*. 2014;11(115):19–24. (In Russ.). doi:10.15829/1560-4071-2014-11-19-24.
61. Rebizova E.A., Gusakov I.G., Gil' G.V., Brit'ko E.A. et al. The Stange and Genchi test as a determination of the organism's capabilities. *Materialy dokladov 52-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. prepodavateley i studentov = Proceedings of the 52th International scientific and engineering conference of lecturers and students*. 2019:365–367. (In Russ.)
62. Mustafina M.Kh., Chernyak A.V. Cardiorespiratory stress test. *Atmosfera. Pul'monologiya i allergologiya = Atmosphere. Pulmonology and allergology*. 2013;(3):56–62. (In Russ.)
63. Albouaini K., Egred M., Alahmar A., Wright D.J. Cardiopulmonary exercise testing and its application. *Heart*. 2007;93(10):1285–1292.
64. Herdy A.H., Ritt L.E., Stein R., Araujo C.G. Cardiopulmonary exercise test: background, applicability and interpretation. *Arquivos brasileiros de cardiologia*. 2016;107:467–481. doi:10.5935/abc.20160171
65. Guazzi M., Cohraads V.M., Adams V., Halle M. EACPR/AHA Scientific Statement. Clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. *Circulation*. 2012;126(18):2261–2274. doi:10.1161/cir.0b013e31826fb946
66. Herdy A.H., Uhlendorf D. Reference values for cardiopulmonary exercise testing for sedentary and active men and women. *Arquivos brasileiros de cardiologia*. 2011;96:54–59. doi:10.1590/S0066-782X2010005000155

67. Piepoli M.F., Agostoni P.G., Corra U., Belardinelli R. Statement on cardiopulmonary exercise testing in chronic heart failure due to left ventricular dysfunction: recommendations for performance and interpretation Part II: How to perform cardiopulmonary exercise testing in chronic heart failure. *European journal of cardiovascular prevention and rehabilitation: official journal of the European Society of Cardiology, Working Groups on Epidemiology & Prevention and Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology*. 2006;13(3):300–311. doi:10.1097/00149831-200606000-00003
68. Kerbikov O.B., Aver'yanov A.V., Borskaya E.N., Krutova T.V. Cardiopulmonary monitoring and clinical practice. *Klinicheskaya praktika = Clinical practice*. 2012;(2):58–70. (In Russ.)
69. Balady G.J., Sietsema K., Arena R., Myers J. Clinician's guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2010;122(2):191–225. doi:10.1161/CIR.0b013e3181e52e69

Информация об авторах / Information about the authors

Алена Игоревна Ширяева

младший научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного центра Медико-биологической защиты, Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лесопарковая, 4)

E-mail: gniiivm_2@mil.ru

Alena I. Shiryayeva

Junior researcher, Scientific Research Center of Biomedical Defense, State Research and Testing Institute of Military Medicine (4 Lesoparkovaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Иван Владимирович Фатеев

доктор медицинских наук, начальник отдела Научно-исследовательского испытательного центра Медико-биологической защиты, Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лесопарковая, 4)

E-mail: gniiivm_2@mil.ru

Ivan V. Fateev

Doctor of medical sciences, head of the department of Scientific Research Center of Biomedical Defense, State Research and Testing Institute of Military Medicine (4 Lesoparkovaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Андрей Александрович Кузьмин

доктор медицинских наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного центра Медико-биологической защиты, Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лесопарковая, 4)

E-mail: gniiivm_2@mil.ru

Andrey A. Kuz'min

Doctor of medical sciences, senior staff scientist of Scientific Research Center of Biomedical Defense, State Research and Testing Institute of Military Medicine (4 Lesoparkovaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Олег Викторович Ветряков

доктор медицинских наук, старший преподаватель кафедры военно-полевой терапии, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 4)

E-mail: o.v.vetryakov@mail.ru

Oleg V. Vetryakov

Doctor of medical sciences, senior lecturer of the sub-department of military field therapy, Military Medical Academy named after S.M. Kirov (4 Akademika Lebedeva street, Saint-Petersburg, Russia)

Александр Викторович Шкарупа

кандидат медицинских наук, главный преподаватель кафедры военной травматологии и ортопедии, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 4)

Aleksandr V. Shkarupa

Candidate of medical sciences, principal lecturer of the sub-department of traumatology and orthopedics, Military Medical Academy named after S.M. Kirov (4 Akademika Lebedeva street, Saint-Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 16.06.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.09.2022

Принята к публикации / Accepted 21.10.2022