

Б.Т. Величковский

ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМЫ НИЗКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИСЛОРОДА В ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА НА КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ

Российский государственный медицинский университет (Москва)

В статье приводится анализ результатов изучения механизмов адаптации кардио-респираторной системы к экстремальным условиям Крайнего Севера, а также предлагаются профилактические мероприятия, снижающие их неблагоприятное воздействие.

Известно, что основными факторами природной среды, оказывающими влияние на функциональное состояние организма человека, являются характерные для высоких широт холод и низкое абсолютное содержание водяных паров в атмосфере, что снижает эффективность газообмена в органах дыхания и может считаться ведущим звеном изменений органов дыхания.

Особенности процесса адаптации организма к экстремальным погодным условиям Крайнего Севера заключаются в морфологических и функциональных изменениях органов дыхания, в частности, в увеличении площади альвеолярной поверхности легких в среднем на 24 % и объема легочных капилляров – на 39 %. Особенностью процесса адаптации к экстремальным погодным условиям Крайнего Севера является также повышение систолического давления в легочной артерии выше 30 мм рт. ст. Это формирует специфичный для высоких широт клинико-морфологический комплекс.

Установлено, что адаптация к экстремальным климатическим условиям Севера проходит несколько этапов. В период начальной адаптации к холоду происходит наращивание функциональных резервов, увеличение площади газообмена за счет дополнительного раскрытия альвеол в верхних и средних зонах легких.

При длительном проживании на Севере (более 10–15 лет) возможность дальнейшего повышения адаптационных резервов организма оказывается исчерпанной, и увеличение площади газообмена осуществляется, главным образом, за счет морфологических изменений. Нарушение диффузии газов через альвеолярно-капиллярную мембрану легких приводит к развитию гипоксемии, на снижение которой направлены, в конечном счете, все компенсаторные механизмы системы дыхания. Длительная гипоксемия, усиливающаяся в холодное время года, повышает свободно-радикальные процессы и снижает содержание антиоксидантов в организме.

Поэтому большие физические перегрузки, курение, простуда вызывают нарастание гипоксемии и усиление патологических изменений легочной ткани, что в свою очередь, обуславливает частое возникновение и тяжелое течение острых и хронических заболеваний органов дыхания. Даже для практически здоровых жителей Заполярья типично появление нарастающей одышки и повышенной утомляемости при осуществлении повседневной деятельности. При этом, изменение функции внешнего дыхания характерно как для коренного населения Севера, так и для переселенцев.

В качестве профилактических мероприятий предлагается проведение кратковременных курсов приема высоких доз пищевых антиоксидантов в зимний период, поддержание в жилых и производственных помещениях оптимального температурного и влажностного режимов, а также использование средств индивидуальной защиты органов дыхания.

Ключевые слова: адаптация, кардио-респираторная система, газообмен, гипоксемия, профилактика

LOW COEFFICIENT CAUSES AND MECHANISMS OF USING OXYGEN IN HUMAN LUNGS IN THE FAR NORTH

B.T. Velichkovsky

The Russian state medical university, Moscow

The results analysis of studying the adaptation mechanisms of the cardio-respiratory system to the extreme conditions of Far North are represented in this article, as well as the preventive measures which may reduce their unfavourable effects are suggested.

The cold and low content of water vapors in the atmosphere which are characteristic to the high latitudes and which may decrease in the gas metabolism efficiency in the respiratory organs and may be considered as the leading link of the respiratory organ changes are known to be the main factors of the natural environment which may influence on the functional state of the human organism. The organism adaptation process features to the extreme weather conditions of Far North are known to consist in the morphological and functional changes in the respiratory organs, in particular, in increase in the area of the alveolar lung surface on the average by 24 % and the lung capillary volume – by 39 %. The increase in the systolic pressure in the lung artery higher than 30 mm of mercury column is also known to be process feature of the adaptation to the extreme weather conditions of Far North. This may form the clinical-morphological complex specific to the high latitudes.

The adaptation to the extreme climatic conditions of North was found to run via some stages. The increase in the functional reserves and the area of the gas metabolism due to the additional alveolar uncovering in the upper and middle lung zones may occur during the period of the initial adaptation to the cold. During the long-term residence in North (more than 10–15 years) the capability of the further increase in the adaptive organism reserves is known to be exhausted and the increase in the gas metabolism area may be observed mainly due to the morphological changes. The gas diffusion disorder via the alveolar-capillary lung membrane may promote the development of hypoxemia, to the decrease of which all the compensatory mechanisms of the respiratory system are finally activated.

The long-term hypoxemia which may be aggravated during the cold period was found to increase in the free radical process and to decrease in the content of the organism antioxidants. That's why, the large physical overloads, smoking, the cold may lead to the aggravation of the hypoxemia and to the increase in the pathological changes in the lung tissue which in turn may stipulate the after appearance of the acute and chronic diseases of the respiratory organs

which may be very painful. Even for the practically healthy residents of Zapolarya the occurrence of the short-wind and increased tiredness in performing the daily activity may be typical. Thereby, the function change of the external respiration is characteristic to both the native population of North and to the migrants. As the preventive measure, performing the short-term courses of taking the high doses of food antioxidants during the winter period, keeping the optimal temperature and moisture regimes in the living and production rooms as well as using the means of the individual protection for the respiratory organs are suggested.

Key words: adaptation, cardio-respiratory system, gas metabolism, hypoxemia, preventive measure

Большая продолжительность холодного периода года представляет собой характерную особенность климата значительной части территории нашей страны. На Кольском полуострове время напряженной холодовой терморегуляции составляет в среднем 152 дня, в центральных районах Западной и Восточной Сибири – 210–270 дней, на арктическом побережье Крайнего Севера – 345 дней [9].

При длительном пребывании на Севере у человека развивается комплекс характерных адаптационных изменений органов дыхания. Для практически здоровых жителей Заполярья, особенно работающих на открытом воздухе, типично появление нарастающей одышки и повышенной утомляемости при осуществлении повседневной деятельности. Указанное состояние получило название «полярной одышки» [1]. Морфологические и функциональные изменения органов дыхания заключаются, прежде всего, в увеличении площади альвеолярной поверхности легких в среднем на 24 % и объема легочных капилляров – на 39 % [2, 10]. Особенностью процесса адаптации к экстремальным погодным условиям Крайнего Севера является также повышение систолического давления в легочной артерии выше 30 мм рт. ст. [2]. Этому специфичному для высоких широт клинко-морфологическому комплексу изменений были даны различные наименования: «Синдром полярного напряжения» [8], «Магаданская пневмопатия» [10], «Циркумпольный гипоксический синдром» [3], «Экзогенная гипоксия Севера» [4]. Однако конкретные причины и, особенно, механизм развития выявленных изменений длительное время не удавалось определить. Были высказаны предположения, что, наряду с холодом, играют роль и другие факторы природной среды Крайнего Севера. Но или подозрительный фактор был недостаточно постоянен и характерен для высоких широт (низкое парциальное давление кислорода в атмосфере, сильные ветры), или он не мог быть причиной изменений организма, специфичных для жителей Крайнего Севера (колебания активности геомагнитного поля Земли). Только в конце 80-х годов был выявлен фактор природной среды, в такой же мере характерный для высоких широт, как и холод. Этот фактор – низкое абсолютное содержание водяных паров в атмосфере [5, 7]. Известно, что при сильном морозе влага вымерзает. На этом основана сушка белья на зимнем воздухе. Среднегодовое абсолютное содержание влаги в атмосферном воздухе приполярных областей ниже, чем в воздухе пустынь. В районах холодного климата низкая абсолютная влажность характерна не только для открытого пространства, но и для жилых, служебных и производственных помещений, то есть сухость воздуха является постоянным фактором среды обитания [16].

А.П. Авцин и др. [2] установили, что адаптация к экстремальным климатическим условиям Севера проходит несколько этапов. В период начальной адаптации к холоду происходит наращивание функциональных резервов за счет дополнительного раскрытия альвеол в верхних и средних зонах легких. При длительном проживании на Севере, более 10–15 лет, увеличение площади газообмена и расширение «рабочей зоны» диффузии осуществляется уже, главным образом, за счет морфологических изменений: увеличения размеров альвеол, а также количества, диаметра и объема капилляров, выбухающих в просвет альвеол. У этой группы населения давление крови в малом кругу значительно превышает нормальную величину, частота легочной гипертензии достигает 80 %. Вместе с тем, возможность дальнейшего повышения морфофункциональных адаптационных резервов у них оказывается уже достаточно истощенной. Поэтому большие физические перегрузки, курение, простуда вызывают нарастание гипоксемии и усиление патологических изменений легочной ткани. Последние, в свою очередь, обуславливают частое возникновение и тяжелое течение острых и хронических заболеваний органов дыхания. Изменение функции внешнего дыхания (ФВД) характерно как для коренного населения Севера, так и для переселенцев.

Об этом, в частности, свидетельствуют данные Г.Е. Мироновой и др. [11]. Авторы обследовали проживающих в Республике Саха (Якутии) практически здоровых лиц двух основных этнических групп – якутов и русских (табл. 1). Показатели максимальной вентиляции легких, пневмотахометрии и резерва дыхания соответствовали верхним границам европейской нормы или несколько превышали ее. Индекс Тиффно в среднем соответствовал $81,8 \pm 1,9$ % и $80,8 \pm 0,5$ %, свидетельствуя об отсутствии нарушения бронхиальной проходимости или изменений эластичности легочной ткани.

Таблица 1
Показатели функции внешнего дыхания у практически здоровых людей различных этнических групп, проживающих в Республике Саха [Якутии]

Показатели ФВД	Якуты n = 197	Русские n = 242
МОД, %	144,6 ± 5,0	142,8 ± 4,8
ЖЕЛ, %	90,8 ± 1,6	96,3 ± 1,4
Индекс Тиффно, %	81,8 ± 1,9	80,8 ± 0,5
МВЛ, %	103,9 ± 3,2	127,6 ± 1,7
Резерв дыхания, %	91,6 ± 0,6	87,6 ± 1,0
Пневмотахометрия, л/сек		
вдох	4,31 ± 0,10	3,38 ± 0,04
выдох	4,31 ± 0,12	4,52 ± 0,06
КИО ₂ , мл/л	29,5 ± 1,3	28,9 ± 1,2

В старших возрастных группах, как у мужчин, так и у женщин отмечалась тенденция к снижению этого показателя. Так, у мужчин в возрастной группе 40–49 лет индекс Тиффно соответствовал $77,4 \pm 1,7$ %, у женщин в возрасте 50–59 лет – $76,0 \pm 4,1$ %, что, вероятно, связано с изменением эластичности соединительно-тканых структур легкого в пределах возрастных физиологических колебаний. Коэффициент использования кислорода (KIO_2), отражающий количество миллилитров кислорода, потребляемого организмом из каждого литра воздуха, поступающего в легкие, как у якутов, так и у русских, оказался меньше 35, что свидетельствует о низкой эффективности газообмена [12]. В итоге, в двух сопоставимых по возрасту и полу этнических группах населения Республики Саха (Якутия) у практически здоровых лиц было выявлено отсутствие статистически достоверных различий показателей ФВД и низкий коэффициент использования кислорода при развитии компенсаторной гипервентиляции.

И.И. Диденко [5] наблюдал на Таймыре снижение коэффициента использования кислорода до $30,7 \pm 1,1$ мл/л в условиях основного обмена и до $26,8 \pm 1,9$ мл/л при работе на наружном воздухе. Одновременно имела место типичная гипервентиляция и гипокания с парциальным давлением кислорода в альвеолах 110 мм. рт. ст. и понижением парциального давления диоксида углерода до 30–34 мм рт. ст. Снижение значения KIO_2 у жителей Севера отмечено и другими исследователями [4, 5]. Таким образом, в условиях высоких широт низкая эффективность газообмена кислорода в органах дыхания может считаться ведущим звеном как функциональных, так и морфологических изменений органов дыхания.

Для понимания причин адаптационных изменений важны результаты исследований, проведенных И.И. Деденко и Б.В. Устюшиным в ФНЦ «Институт гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» [15]. Авторы показали, что 8-часовое пребывание здоровых добровольцев в комфортных температурных условиях ($+20$ °C), но при сниженной абсолютной влажности воздуха до значений, характерных для регионов Крайнего Севера (2 г/м³), вызывает увеличение кровенаполнения легких и повышение сосудистого тонуса. В условиях проводимого эксперимента причина выявленных изменений могла заключаться только в потере влаги в альвеолах. Результаты исследований позволили авторам определить физиологически оптимальную и допустимую величину абсолютной влажности вдыхаемого воздуха: $9,6$ г/м³ и $5,7$ г/м³ соответственно. Каким образом сухой воздух ухудшает условия газообмена в легких, до последнего времени остается не выясненным.

В физиологических условиях защита органов дыхания от неблагоприятных воздействий осуществляется несколькими взаимосвязанными системами и механизмами. На Крайнем Севере особое напряжение испытывает система кондиционирования вдыхаемого воздуха. В кондиционировании температуры и влажности вдыхаемого холодного воздуха важная роль принадлежит верхним дыхательным путям. При носовом дыхании температура воздуха, поступа-

ющего в трахею, лишь на $1-2$ °C ниже температуры тела, независимо от температуры атмосферного воздуха. Процесс согревания регулируется рефлекторно. Чувствительные окончания тройничного нерва раздражаются струей холодного воздуха. Импульс через продолговатый мозг переключается на парасимпатические центры и достигает носовых раковин. Кавернозные ткани носовых раковин расширяются и переполняются кровью. Через сузившийся просвет носовых проходов воздух движется тонкой струей, омывая теплую поверхность слизистой оболочки. Благодаря этому согревание вдыхаемого воздуха осуществляется весьма интенсивно. На холоде для сокращения потерь тепла в верхних дыхательных путях изменяется характер дыхания: возникает частое поверхностное дыхание, иногда с явлениями ларингоспазма.

Увлажнение вдыхаемого воздуха также в основном происходит в полости носа за счет насыщения его влагой, покрывающей слизистую оболочку. Достаточная влажность воздуха необходима для оптимального функционирования мерцательного эпителия трахеи и бронхов и дыхательной поверхности альвеол. Дегидратация слизистой слоя, покрывающего реснички, увеличивает вязкость секрета, что снижает активность мерцательного эпителия. В средней полосе России для увлажнения вдыхаемого воздуха за сутки со слизистой оболочки носа здорового человека испаряется порядка 500 мг воды. На Севере в условиях чрезмерно низкого содержания влаги в воздухе происходит повышение влагопотерь с поверхности, как верхних дыхательных путей, так и легких. Суточные потери воды с выдыхаемым воздухом достигают 1500 мл. Теплопотери испарением с поверхности легких составляют 42 % всех теплопотерь организма за счет испарения, вместо типичных для средней полосы 30 % [5].

В нагревании и увлажнении вдыхаемого воздуха принимает участие и ротовая полость. Однако в отсутствие носового дыхания ротовая полость не может обеспечить его полноценное кондиционирование.

В связи с повышением потерь влаги через легкие и кожу у полярников происходит сокращение диуреза в среднем до 600 мл/сут, тогда как у жителей умеренной климатической зоны объем диуреза колеблется от 1200 до 1600 мл. Одновременно наблюдается увеличение водопотребления, получившее название «жажда Севера» [16]. Количество жидкости, потребляемой участниками высокоширотных экспедиций, повышается до 2500 мл в сутки, что примерно в 1,5 раза больше, чем средний уровень водопотребления у населения, проживающего в зоне умеренного климата – 1800 мл/сут. [6].

Нам представляется, что в условиях Крайнего Севера снижение содержания кислорода в артериальной крови – гипоксемия – обусловлена нарушением диффузии газов (O_2 и CO_2) через альвеоларно-капиллярную мембрану легких. На снижение гипоксемии направлены, в конечном счете, все компенсаторные механизмы системы дыхания. Согласно закону Фика, диффузионная способность легких прямо пропорциональна градиенту концентрации газов

(O_2 и CO_2), площади аэрогематического барьера, коэффициенту растворимости газов в водной фазе альвеолярно-капиллярной мембраны и обратно пропорциональна толщине аэрогематического барьера [14]. Ни концентрация газов, ни растворимость их не нарушаются в условиях Севера, а площадь аэрогематического барьера даже возрастает. Следовательно, причину надо искать в ухудшении проницаемости аэрогематического барьера. При практически не нарушенной структуре альвеолярно-капиллярной мембраны подобные изменения может вызвать физиологический интерстициальный отек, при котором вода, фильтрующаяся в интерстиций легких, бедна протеинами. В пользу такого предположения говорит тот факт, что функциональная способность в наибольшей мере понижена в нижних и базальных отделах легких, где в связи с влиянием силы тяжести физиологический отек более выражен. В норме легочная ткань содержит мало воды. Это обусловлено дренажной функцией лимфатической системы легких и постоянством соотношения онкотического давления крови и сопротивления проницаемости легочных капилляров. Классическими причинами развития интерстициального отека служат нарушения функции сердца, заболевания почек, гипопротениемия, вызванная циррозом печени. Но ни в одном из этих случаев не наблюдается таких больших влагопотерь с выдыхаемым воздухом, как на Севере. Поэтому при анализе развития интерстициального отека в легких необходимо определить его специфичный молекулярный механизм, характерный для высоких широт.

Движение через клеточные мембраны воды, а также растворенные в ней газы: кислород и диоксид углерода, – осуществляется путем диффузии в направлении меньшей концентрации. Возможности регулирования этого по своей сути физического процесса у организма крайне ограничены. Вместе с тем, направление этих диффузионных потоков в альвеолярной области легких в условиях Высоких широт прямо противоположное. Вода из легочных капилляров просачивается на поверхность слизистой оболочки альвеол, а растворенный в ней кислород с поверхности альвеол перемещается в легочные капилляры. Указанная встречная диффузия, в конечном счете, снижает скорость перемещения кислорода через клеточную мембрану. Тем самым понижается диффузионная способность альвеолярной поверхности по отношению к кислороду и уменьшается коэффициент использования кислорода (KIO_2). Наоборот, односторонняя диффузия воды и диоксида углерода, усиливает гипоканию. Мы полагаем, что в разнонаправленной диффузии воды и газов в альвеолярно-клеточной мембране и заключается скрытая молекулярная первопричина характерного для Крайнего Севера ухудшения газообменной функции легких, усиления интерстициального отека в нижних и базальных зонах легких, развития гипоксемии и гипокании.

Следует отметить, что принципиально аналогичные адаптационные изменения в альвеолах развиваются не только в условиях Высоких широт. Они по-

стоянно наблюдаются после резекции доли легкого при развитии компенсаторных процессов улучшения газообмена в оставшейся легочной ткани [13].

Но на Севере, по-видимому, возможен и дополнительный механизм затруднения газообмена, связанный с нарушением теплового гомеостаза в глубоких отделах легких. Испарение влаги с поверхности альвеол вызывает дополнительные потери тепла. На испарение 1 мл воды, как известно, требуется 2,4 кДж. Усиленного кровенаполнения существующей капиллярной сети альвеол может быть недостаточно для поддержания необходимого уровня как газообмена, так температурного гомеостаза. Обе указанные причины обуславливают развитие односторонних адаптационных морфологических изменений в легких, заключающихся в образовании в альвеолярных стенках новых капилляров, увеличении их диаметра и общей объемной плотности на единицу площади альвеолярных перегородок.

В физиологии и клинике исследуется дыхание при повышенном и пониженном атмосферном давлении. Для нашей страны не менее актуальным является изучение дыхания при пониженной абсолютной влажности воздуха в условиях нормального атмосферного давления. Необходима оценка изменений функции внешнего дыхания у больных и здоровых лиц, проживающих на Крайнем Севере, с учетом как уровня гипоксемии, так и гипокании, снижающей чувствительность дыхательного центра. Постоянный усиленный интерстициальный отек со временем приводит к развитию фиброзных изменений и понижению функции в нижних и базальных отделах легких. Лица с подобными изменениями органов дыхания должны подлежать переводу с работы на наружном воздухе. Длительная гипоксемия, усиливающаяся в холодное время года, повышает свободно-радикальные процессы и снижает содержание антиоксидантов в организме, в частности, витаминов С и Е, не столько вследствие дефицита их в пище, сколько благодаря повышенной утилизации. Как показала Г.Е. Миронова с соавторами [11], в условиях Крайнего Севера оправдано проведение кратковременных двухнедельных курсов приема высоких доз пищевых антиоксидантов: аскорбиновой кислоты (по 25 мг на кг массы тела) и α -токоферола (по 4 мг на кг массы тела) совместно в два приема утром и вечером. Целесообразно проведение двух таких курсов в зимний период, особенно лицам, злоупотребляющим курением табака, представляющим собой высокий фактор риска в условиях Севера. Не менее велико на Севере отрицательное влияние и другой пагубной привычки – злоупотребления алкоголем. Легкие представляют собой самую большую мембрану нашего организма. Исходный липидный «строительный материал» для клеточных мембран синтезируется в печени. Ухудшение функционального состояния печени снижает синтез фосфолипидов, необходимых для построения клеточных мембран. Одновременно уменьшается образование и антиоксидантных ферментов и низкомолекулярных антиоксидантов (мочевой кислоты и др.), необходимых для нейтрализации избытка

свободных радикалов. Все это ведет к ослаблению устойчивости органов дыхания к внешним воздействиям. Именно по этой причине пневмония алкоголика на Крайнем Севере представляет собой смертельное заболевание.

В северных районах в жилых и производственных помещениях следует поддерживать оптимальным не только температурный, но и влажностный режим воздуха, используя различные типы воздухоувлажнителей непрерывного действия. Одежда и средства индивидуальной защиты органов дыхания также должны предотвращать пагубное влияние не только холода, но и низкого абсолютного содержания влаги в атмосферном воздухе, для чего эффективны пушистые шерстяные шарфы, меховые воротники с длинным ворсом и др., перспективные респираторы с устройством для подогрева вдыхаемого воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авцын А.П. Введение в географическую патологию. – М.: Медгиз, 1972. – 328 с.
2. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Марачев А.Г., Милованов А.П. Патология человека на Севере. – М.: Медицина, 1985. – 415 с.
3. Авцын А.П., Марачев А.Г., Матвеев А.Н. Циркумполярный гипоксический синдром // Вестн. АМН СССР. – 1979. – № 6. – С. 32–39.
4. Бобров Н.И., Ломов О.П., Тихомиров В.П. Физиолого-гигиенические основы акклиматизации человека на Крайнем Севере. – Л.: Медицина, 1979. – 184 с.
5. Гигиена микроклимата и физиология теплообмена в процессе труда на Крайнем Севере / И.И. Диденко [и др.]. – М.: ВНИИМИ, 1983. – 64 с.
6. Деряпа Н.Р., Рябинин И.Ф. Адаптация человека в полярных районах Земли. – Л.: Медицина, 1977. – 218 с.
7. Диденко И.И. Изучение теплообмена человека на Крайнем Севере в различных микроклиматических производственных условиях // Гиг. и сан. 1979. – № 3. – С. 75–78.
8. Казначеев В.П. Современные аспекты адаптации. – Новосибирск: Наука, 1980. – 192 с.
9. Кандрор И.С. Очерки по физиологии и гигиене человека на Крайнем Севере. – М.: Медицина, 1968. – 280 с.
10. Милованов А.П. Адаптация малого круга кровообращения человека в условиях Севера. – Новосибирск: Наука, 1981. – 172 с.
11. Миронова Г.Е., Васильев Е.П., Величковский Б.Т. Хронический обструктивный бронхит в условиях Крайнего Севера. – Красноярск: Сибирь, 2003. – 170 с.
12. Нефедов В.Б. Газообменные функции легких // В кн.: Клеточная биология легких в норме и при патологии. – М.: Медицина, 2000. – С. 44–56.
13. Романова Л.К. Регенерация легких в эксперименте и клинике. – М.: Медицина, 1971. – 198 с.
14. Ткаченко Б.И. Основы физиологии человека. – Т. 3. Клинико-физиологические аспекты. – М.: Литера, 1998. – 474 с.
15. Устюшин Б.В. Физиолого-гигиенические аспекты труда человека на открытых территориях Крайнего Севера: автореф. дис. ... док. мед. наук. – М., 1991. – 45 с.
16. Чашин В.П., Диденко И.И. Труд и здоровье человека на Севере. – Мурманск: Гигиена и профпатология, 1990. – 104 с.

Сведения об авторе

Величковский Борис Тихонович – доктор медицинских наук, профессор, академик РАМН, главный научный сотрудник отдела молекулярной биологии Российского государственного медицинского университета, Москва.