

О.А. Нагибович<sup>1</sup>, Д.М. Уховский<sup>1</sup>, А.Н. Жекалов<sup>1</sup>,  
Н.А. Ткачук<sup>1</sup>, Л.Г. Аржавкина<sup>1</sup>, Е.Г. Богданова<sup>1</sup>,  
Е.В. Мурзина<sup>1</sup>, Т.М. Беликова<sup>2</sup>

## Механизмы гипоксии в Арктической зоне Российской Федерации

<sup>1</sup>Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург

**Резюме.** Актуальность исследования механизмов адаптации человека к экстремальным условиям Арктики и арктических пустынь связана, прежде всего, с истощением материковых запасов энергетических ресурсов и разработкой в высоких широтах природных запасов нефти и угля. Одним из лимитирующих факторов адаптации человека к высоким широтам является «полярная одышка», или «циркумполярный гипоксический синдром», природа которого до конца не ясна. Результаты исследований по этому вопросу носят неоднозначный характер. Так, некоторые исследователи полагают, что гипоксия на Крайнем Севере обусловлена кислородной недостаточностью и разреженностью воздуха. Другие считают, что гипоксия на Севере не связана со снижением парциального давления кислорода в воздухе, так как оно мало отличается от других регионов планеты и снижено только в высокогорье. Высказывается мнение, что полярная гипоксия связана с повышенным потреблением кислорода тканями, обусловленным усилением энергетического обмена и переключением его в ходе адаптации к холоду с углеводного типа на липидный на фоне увеличенной продукции кортизола и адреналина. Считается, что основная причина гипоксемии в условиях Севера заключается в нарушении диффузии кислорода и углекислого газа через альвеолярно-капиллярную мембрану лёгких. Однако, вне зависимости от причинной обусловленности, полярная гипоксия приводит к повышению сердечного выброса, минутного объёма кровообращения и артериального давления, активизации симпатического отдела нервной системы с преобладанием его тонуса над парасимпатическим отделом, увеличению в крови концентрации глюкокортикостероидов и катехоламинов. Установлено, что генез полярной гипоксии носит смешанный характер и является системным явлением, что необходимо учитывать при разработке лечебно-профилактических мероприятий для облегчения адаптации в высоких широтах.

**Ключевые слова:** адаптация, Арктика, Крайний Север, полярная гипоксия, кислородная недостаточность, диффузия газов.

Исследования механизмов адаптации человека к экстремальным условиям Арктики и арктических пустынь до сих пор относятся к единичным. Они связаны с обследованием либо участников высокоширотных экспедиций с небольшим количественным составом, либо мигрантов северных поселений [4, 29, 36]. В то же время, уже сегодня в высоких широтах ведутся разработки природных запасов нефти (Соединённые Штаты Америки, Норвегия) и угля (Норвегия, Россия). Интерес к этим территориям с наиболее экстремальными климатическими условиями будет возрастать с каждым годом по мере исчерпания материковых запасов энергетических ресурсов. Одним из лимитирующих факторов адаптации человека к высоким широтам относится «полярная одышка», или «циркумполярный гипоксический синдром» [1, 2, 27]. Природа этого явления до конца не ясна. Несомненный вклад в него вносит бронхоспазм при дыхании холодным воздухом [1, 2]. Однако более правильно рассматривать его как системное явление, связанное с изменением не только внешнего дыхания, но и периферических механизмов транспорта кислорода ( $O_2$ ), включая состояние эритроцитарных мембран

и окислительных процессов в тканях (запрос на потребление кислорода) [1, 27].

Генез северной тканевой гипоксии сложен, до конца не изучен и, по представлению исследователей, может иметь несколько причин. Так, по мнению ряда авторов [21, 24, 35], гипоксия на Крайнем Севере вызвана кислородной недостаточностью и разреженностью воздуха. Эти факторы приобретают особое значение во время термосферной реакции, обусловленной геомагнитными бурями. В период магнитной бури термосферная реакция носит глобальный характер и проявляется в виде уменьшения отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота в высокоширотных областях более чем в десять раз, по сравнению со спокойным уровнем магнитного поля. При этом в северном полушарии выраженность термосферной реакции в 1,5 раза больше, чем в южном [17, 21, 24, 35].

Ряд исследователей [16, 26, 32, 33] считает, что гипоксия на Севере не связана со снижением парциального давления  $O_2$  в воздухе, так как оно мало отличается от других регионов планеты и снижено только в высокогорье. Кроме того, у полярников отмечаются

адаптационные морфологические и функциональные изменения органов дыхания, направленные на улучшение газообмена, заключающиеся в увеличении площади альвеолярной поверхности лёгких в среднем на 24% и объема лёгочных капилляров – на 39% [19, 23]. По мнению В.И. Хаснулина [31, 32], северная гипоксия носит метаболический характер и связана с нарушением активности дыхательных ферментов под действием экстремальных метеорофизических факторов. Л.Е. Громова [11] высказывает мнение о гематологической обусловленности полярной гипоксии. По её данным, полученным при изучении в динамике состояния здоровья вахтовых работников нефтедобычи в Заполярье при режиме труда и отдыха – 12 ч через 12 ч / (52 дня + 52 дня), к концу заезда снижается содержание гемоглобина крови (с 155 до 138 г/л,  $p < 0,001$ ). Напряжение функции эритронов сопровождается повышением суточной продукции эритроцитов и снижением средней продолжительности их жизни с 51 до 36 суток, наблюдается выраженный анизо- и пойкилоцитоз, что приводит к развитию железодефицитных состояний и анемии.

Некоторые исследователи приходят к выводу, что полярная гипоксия на Крайнем Севере связана с погодной гипероксией [16, 26], возникающей на фоне сочетания гипотермии с гипербарией [5], что обуславливает развитие в организме вторичной гипероксической гипоксии. При этом развитие гипероксической гипоксии происходит в результате повышения парциального давления  $O_2$  во вдыхаемом воздухе [16, 26].

Ряд авторов [1, 2, 18] высказывает мнение, что полярная гипоксия обусловлена повышенным потреблением тканями  $O_2$ , потенцированным повышением энергетического обмена и переключением с углеводного типа на липидный в ходе адаптации к холоду на фоне увеличенной продукции кортизола и адреналина. Повышение кислородного запроса тканей приводит к учащению частоты дыхания. Охлаждение верхних и нижних дыхательных путей рефлекторно учащает дыхание, делает его поверхностным, одновременно повышая бронхиальное сопротивление [6–8, 12, 13], что приводит к нарастанию удельного веса «мёртвого» пространства, снижению вентиляции альвеол, падению эффективности дыхания и усилению тканевой гипоксемии [1, 10, 28]. При гипервентиляции происходит вымывание углекислоты ( $CO_2$ ) из лёгких, крови, тканей, результатом чего является гипокапния. Потеря  $CO_2$  ведёт к сдвигу кислотно-щелочного равновесия в сторону газового алкалоза и, кроме того, оказывает специфическое действие на сосудистый тонус, вызывая сужение коронарных и периферических сосудов, сосудов мозга, кишечника, печени, почек и расширение сосудов скелетных мышц. Происходит перераспределение регионального кровообращения, заключающееся в увеличении кровотока в скелетной мускулатуре и снижении коронарного и мозгового кровотоков. Гипокапния вызывает ещё один важный эффект – селективную стимуляцию симпатического

отдела вегетативной нервной системы. Эндогенный выброс катехоламинов при этом возрастает в 3 раза, что увеличивает потребление кислорода мышцами на 1447% [9, 20, 22].

Н.И. Бобров, О.П. Ломов, В.П. Тихомиров [3], Н.Р. Деряпа, И.Ф. Рябинин [13], И.И. Диденко с соавт. [14], В.Г. Евдокимов, О.В. Рогачевская, Н.Г. Варламова [15] указывают на затрудненное извлечение  $O_2$  в легких из низкотемпературного и сухого окружающего воздуха в условиях Севера. Среднегодовое абсолютное содержание влаги в атмосферном воздухе приполярных областей ниже, чем в воздухе пустынь, т.к. при сильном морозе влага вымерзает. В районах с холодным климатом низкая абсолютная влажность характерна не только для открытого пространства, но и для жилых, служебных и производственных помещений, т.е. сухость воздуха является постоянным фактором среды обитания [6–8, 25], основная причина снижения содержания  $O_2$  в артериальной крови – гипоксемии – в условиях Севера заключается в нарушении диффузии  $O_2$  и  $CO_2$  через альвеолярно-капиллярную мембрану лёгких. На снижение гипоксемии направлены, в конечном счёте, все компенсаторные механизмы системы дыхания. Согласно закону Фика, диффузионная способность лёгких прямо пропорциональна градиенту концентрации  $O_2$  и  $CO_2$ , площади аэрогематического барьера, коэффициенту растворимости газов в водной фазе альвеолярно-капиллярной мембраны и обратно пропорциональна толщине аэрогематического барьера [22, 30]. Ни концентрация газов, ни их растворимость не нарушаются в условиях Севера, а площадь аэрогематического барьера даже возрастает. Следовательно, причина затруднения газообмена состоит в ухудшении проницаемости аэрогематического барьера, вызванном интерстициальным отёком лёгочной ткани, специфичным для высоких широт. Структура альвеолярно-капиллярной мембраны при этом практически не нарушается: вода, фильтрующаяся в интерстиций лёгких, бедна протеинами, а их функциональная способность в наибольшей мере понижена в нижних и базальных отделах лёгких в связи с влиянием силы тяжести. В норме лёгочная ткань содержит мало воды. Это обусловлено дренирующей функцией лимфатической системы лёгких и постоянством соотношения онкотического давления крови и проницаемости лёгочных капилляров. Классическими причинами развития интерстициального отёка служат нарушения функции сердца, заболевания почек, гипопропротеинемия, вызванная циррозом печени. Но ни в одном из этих случаев не наблюдается таких больших влагопотерь с выдыхаемым воздухом, как на Севере. Поэтому и при анализе причин развития интерстициального отёка в лёгких необходимо определить молекулярный механизм, специфичный для высоких широт. Движение воды и растворённых в ней  $O_2$  и  $CO_2$  через клеточные мембраны 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 альвеолах лёгких в условиях высоких широт прямо противоположное. Вода из лёгочных капилляров проникает на поверхность слизистой оболочки альвеол, а растворённый в ней  $O_2$  с поверхности альвеол диффундирует в лёгочные капилляры. Указанная встречная диффузия, в конечном счёте, снижает скорость всасывания  $O_2$ . Тем самым понижается диффузионная способность альвеолярной поверхности по отношению к  $O_2$  и уменьшается коэффициент его использования. Наоборот, односторонняя диффузия воды и  $CO_2$ , усиливает гипокапнию. В разнонаправленной диффузии воды и газов в альвеолярноклеточной мембране, по-видимому, и заключается скрытая молекулярная первопричина характерного для Крайнего Севера ухудшения газообменной функции лёгких, возникновения интерстициального отёка в нижних и базальных зонах лёгких, развития гипоксемии и гипокапнии. Постоянный интерстициальный отёк со временем приводит к развитию фиброзных изменений и понижению функции в нижних и базальных отделах лёгких [6–8, 25].

У человека в высоких широтах также повреждается система доставки  $O_2$  к тканям, что, в первую очередь, связано с изменением структуры эритроцитарных мембран и скорости диффузии через них  $O_2$  и  $CO_2$ . Один из механизмов этого явления – активация процессов перекисного окисления ненасыщенных жирных кислот, структурных компонентов эритроцитарных мембран, и ослабление в условиях северного стресса системы антиоксидантной защиты. Изменение структуры и вязкости эритроцитарных мембран, обусловленное снижением в них содержания антиоксиданта токоферола и накопления лизоформ фосфолипидов и продуктов перекисного окисления липидов – диеновых конъюгатов, приводит к нарушению диффузии  $O_2$  и  $CO_2$  через эритроцитарные мембраны. Это, в свою очередь, ведёт не только к снижению скорости диффузии газов через мембраны эритроцитов, но и к увеличению вязкости крови и уменьшению скорости кровотока в капиллярном русле, что также является фактором усиления тканевой гипоксии [1, 33].

Тем не менее, вне зависимости от причинной обусловленности, полярная гипоксия приводит к повышению сердечного выброса, минутного объёма кровообращения и артериального давления, активизации симпатического отдела вегетативной нервной системы с преобладанием его тонуса над парасимпатическим отделом, увеличению в крови концентрации глюкокортикостероидов и катехоламинов. Эти изменения направлены на обеспечение достаточного кровотока, определяющего транспорт  $O_2$  между кровью и тканями [11, 17, 19].

**Заключение.** Установлено, что генез полярной гипоксии сложен и носит смешанный характер. Он обусловлен экзогенными причинами, связанными с особенностями вдыхаемого воздуха, а также нарушениями в респираторной системе, приводящими

к снижению поступления  $O_2$  в лёгкие, повреждением систем доставки  $O_2$  к тканям, повышением кислородного запроса тканей.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что жизнедеятельность человека в высоких широтах (Арктика, Антарктида), предъявляет особые требования к качеству питания, витаминпрофилактике, оптимизации режимов труда и отдыха, а также к средствам гигиенической защиты организма от неблагоприятного действия факторов окружающей среды (температуры, влажности, скорости ветра, изменения фотопериодики и т. д.). В жилых и производственных помещениях следует поддерживать оптимальным не только температурный, но и влажностный режим воздуха, используя различные типы влагоувлажнителей непрерывного действия, а одежда и средства индивидуальной защиты органов дыхания должны предотвращать пагубное влияние как холода, так и низкого абсолютного содержания влаги в атмосферном воздухе.

### Литература

1. Авцын, А.П. Патология человека на Севере / А.П. Авцын [и др.]. – М.: Медицина, 1985. – 416 с.
2. Авцын, А.П. Проявление адаптации и дезадаптации у жителей Крайнего Севера / А.П. Авцын, А.Г. Марачев // Физиология человека. – 1975. – Т. 1, № 4. – С. 587–600.
3. Бобров, Н.И. Физиолого-гигиенические основы акклиматизации человека на Крайнем Севере / Н.И. Бобров, О.П. Ломов, В.П. Тихомиров. – Л.: Медицина. 1979. – 184 с.
4. Бойко, Е.Р. Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере / Е.Р. Бойко. – Екатеринбург: ЕГУ, 2005. – 190 с.
5. Борисова, С.В. Рекреационный потенциал северного Кавказа / С.В. Борисова, Г.П. Катеруша // Український гідрометеорологічний журнал. – 2008. – № 3. – С. 67–74.
6. Величковский, Б.Т. Причины и механизмы снижения коэффициента использования кислорода в лёгких человека на Крайнем Севере / Б.Т. Величковский // Биосфера. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 213–217.
7. Величковский, Б.Т. Молекулярные механизмы нарушения газообменной функции лёгких на Крайнем Севере / Б.Т. Величковский // Пульмонология. – 2005. – № 4. – С. 61–64.
8. Величковский, Б.Т. Полярная одышка / Б.Т. Величковский // Социальное партнерство. – 2006. – № 3. – С. 54–56.
9. Глезер, Г.А. Изменения гемодинамики у здоровых лиц и больных артериальной гипертензией при гипервентиляции / Г.А. Глезер [и др.] // Кардиология. – 1986. – Т. 26, № 3. – С. 65–68.
10. Гора, Е.П. Экология человека / Е.П. Гора. – М.: Дрофа, 2007. – 544 с.
11. Громова, Л.Е. Гигиенические основы охраны здоровья нефтяников вахтовых форм труда в условиях Крайнего Севера: автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Л.Е. Громова. – Архангельск, НИИ Полярной медицины СГМУ, 2009. – 47 с.
12. Гультьева, В.В. Взаимосвязи в системе внешнего дыхания при разных условиях её функционирования у здоровых мужчин: дис. ... канд. биол. наук / В.В. Гультьева. – Новосибирск: НИИФ, 2002. – 158 с.
13. Деряпа, Н.Р. Адаптация человека в полярных районах Земли / Н.Р. Деряпа, И.Ф. Рябинин. – Л.: Медицина, 1977. – 296 с.
14. Диденко, И.И. Гигиена микроклимата и физиология теплообмена в процессе труда на Крайнем Севере / И.И. Диденко [и др.]. – М.: ВНИИМИ, 1983. – 64 с.
15. Евдокимов, В.Г. Моделирующее влияние факторов Севера на кардиореспираторную систему человека в онтогенезе

- / В.Г. Евдокимов, О.В. Рогачевская, Н.Г. Варламова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 257 с.
16. Исаев, А.А. Экологическая климатология / А.А. Исаев. – М.: Научный мир, 2003. – 472 с.
  17. Кириллов, А.К. Изменение жизнедеятельности дрожжей и состояние электромагнитного фона окружающей среды / А.К. Кириллов // Космическая экология и ноосфера. Тез. Крымского международного семинара – Крым: Партеинит, 1999. – С. 39.
  18. Коган, А.Б. Экологическая физиология человека / А.Б. Коган. – Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского университета, 1990. – 264 с.
  19. Леутин, В.П. Линейная скорость артериального кровотока в полушариях мозга у левшей и правшей при гипоксии / В.П. Леутин, Е.А. Пыстина, С.В. Ярош // Физиология человека. – 2004. – Т. 30, № 5. – С. 45.
  20. Малкин, В.Б. Гипервентиляция / В.Б. Малкин, Е.П. Гора. – М.: Наука, 1990. – С. 178.
  21. Мартынюк, В.С. Экспериментальная верификация электромагнитной гипотезы солнечно-биосферных связей / В.С. Мартынюк, Н.А. Темурьянц // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». – 2007. – Т. 20 (59), № 1. – С. 8–27.
  22. Маршак, М.Е. Физиологическое значение углекислоты / М.Е. Маршак. – М.: Медицина, 1969. – С. 144.
  23. Милованов, А.П. Адаптация малого круга кровообращения человека в условиях Севера / А.П. Милованов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 171 с.
  24. Намгаладзе, А.А. Математическое моделирование термосферных и ионосферных эффектов геомагнитной бури / А.А. Намгаладзе, М. Ферстер, Р.Ю. Юрик // Физика околоземного космического пространства. – Мурманск: ПГИ, 2000. – С. 336–360.
  25. Нефёдов, В.Б. Газообменные функции лёгких / В.Б. Нефёдов // Клеточная биология лёгких в норме и при патологии. – М.: Медицина, 2000. – С. 44–56.
  26. Овчарова, В.Ф. Гомеостаз в погодную гипоксию и гипероксию / В.Ф. Овчарова // Климат и здоровье человека: тез. докл. научн. конф. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – Т. 2. – С. 142–149.
  27. Панин, Л.Е. Человек в экстремальных условиях Арктики / Л.Е. Панин // Бюллетень СО РАМН, 2010. – Т.30, № 3. – С. 92–98.
  28. Попова, О.Н. Характеристика адаптивных реакций внешнего дыхания у молодых лиц трудоспособного возраста, жителей Европейского Севера: автореф. дис. ... д-ра мед. наук / О.Н. Попова. – Архангельск: СГМУ, 2009. – 39 с.
  29. Тигранян, Р.А. Гормонально-метаболический статус организма при экстремальных условиях / Р.А. Тигранян. – М.: Наука, 1990. – 288 с.
  30. Ткаченко, Б.И. Основы физиологии человека / под ред. Б.И. Ткаченко. – М.: Литера, 1998. – Т. 3. – 474 с.
  31. Хаснулин, В.И. Современный взгляд на народную медицину Севера / В.И. Хаснулин [и др.]. – Новосибирск: СО РАМН, 1999. – 281 с.
  32. Хаснулин, В.И. Введение в полярную медицину / В.И. Хаснулин. – Новосибирск: СО РАМН, 1998. – 337 с.
  33. Хаснулин, В.И. Северный стресс, формирование артериальной гипертензии на Севере, подходы к профилактике и лечению // В.И. Хаснулин, А.В. Хаснулина, И.И. Четветкина // Экология человека. – 2009. – № 6. – С. 26–30.
  34. Чашин, В.П. Труд и здоровье человека на Севере / В.П. Чашин, И.И. Диденко. – Мурманск: НПО «Гигиена и профпатология», 1990. – 102 с.
  35. Юрик, Р.Ю. Моделирование термосферно-ионосферного взаимодействия в периоды магнитных бурь: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Р.Ю. Юрик. – Мурманск: ПГИ, 2006. – 125 с.
  36. Observations on the Soviet / Canadian Trans-polar Ski Trek / Ed. R.J. Shepard, A. Rode. Basel: Karger, 1992. – 190 p.

O.A. Nagibovich, D.M. Ukhovskiy, A.N. Zhekalov, N.A. Tkachuk,  
L.G. Arzhavkina, E.G. Bogdanova, E.V. Murzina, T.M. Belikova

### Mechanisms of hypoxia in Arctic zone of Russian Federation

**Abstract.** Relevance of studies of human adaptation to extreme conditions of the Arctic is linked primarily to the depletion of the continental energy reserves, and development in the high latitudes of the natural resources of oil and coal. One of the limiting factors of human adaptation to high latitudes is «polar dyspnea» or «circumpolar hypoxia syndrome», the nature of which is not completely clear. The results of this question researches are mixed. Some researchers think that hypoxia in the Far North due to oxygen deficiency and rarefied air. Others believe, that hypoxia in the North isn't associated with reduction of oxygen partial pressure in the air, because the oxygen pressure in the North is a little different from other regions of the planet, and reduced only in the highlands. It is suggested that the polar hypoxia caused by increased tissues oxygenconsumption due to increase in energy metabolism and shift it in the course of adaptation to cold with increased production of cortisol and adrenalin. It is assumed that the main cause of hypoxemia in the North is the violation of oxygen and carbon dioxide through the alveolar-capillary membrane lung. However, regardless of causality, polar hypoxia leads to increase in cardiac output, minute volume of blood circulation and blood pressure, activation of the sympathetic part of th nervous system with its predominance of parasympathetic tonus, the increase in the blood concentration of glucocorticoids and catecholamines. It is found that genesis of the polar hypoxia is mixed and is a systemic phenomenon, which should be considered in the development of therapeutic and preventive measures to facilitate adaptation at high latitude.

**Key words:** adaptation, the Arctic, the Far North, polar hypoxia, oxygen deficiency, the diffusion of gases.

Контактный телефон: 8-921-971-92-96; e-mail: vanadzor\_@ramler.ru