

УДК [612.135:537.523.3](23.03)

О РЕМОДЕЛИРОВАНИИ МИКРОГЕМОЦИРКУЛЯЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОРОННОГО РАЗРЯДА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ

Ю.Х.-М. Шидаков, Н.В. Тимушкина, Л.В. Козачук, И.А. Абдумаликова

Рассматриваются изменения микроциркуляции в зоне коронного разряда, сопряженные с фазами адаптации к высокогорью.

Ключевые слова: коронный разряд; горы; микрогемодициркуляция.

ABOUT REMODELING OF MICROHEMOCIRCULATION UNDER THE INFLUENCE OF CORONA DISCHARGE HIGH-VOLTAGE ELECTRICITY LINE IN THE HIGHLANDS

Y.X.-M. Shidakov, N.V. Timushkina, L.V. Kozachuk, I.A. Abdumalikova

It is considered the changes of microcirculation in the crown discharge zone associated with the phases of adaptation to the highlands.

Keywords: corona discharge; mountains; microhemocirculation.

Оптимальное энергоснабжение, бесспорно, является критерием безопасности не только отдельного предприятия или страны, но и человечества в целом. Среди источников энергии (химической, электромагнитной, тепловой) электрическая энергия в мировом масштабе занимает ведущее место, поэтому ускоренными темпами строятся атомные (АЭС), тепловые (ТЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС), а также дальние (на 1000 километров) высоковольтные (ВВ) линии электропередач (ЛЭП). В Кыргызстане планируется строительство ГЭС Верхне-Нарынского каскада и Камбар-Аты, Ак-Булунской и Нарынской ГЭС-1 [1]. Это в будущем потребует проводку ВВ ЛЭП в высокогорных условиях, где течение тока по проводам имеет свои особенности [1].

Экспорт электроэнергии в зарубежье, наличие энергоемких производств с круглосуточным режимом работы уже в прошлом веке потребовали подключение, ремонт, профилактику ВВ ЛЭП по напряжением. Между тем медико-биологические аспекты этой проблемы оставались не изученными до конца 80-х гг. прошлого столетия. В эти годы под руководством одного из нас (Ю.Х.-М. Шидаков) было начато изучение особенности действия коронного разряда ВВ ЛЭП на организм животных и человека в условиях высокогорья [2], которые пришлось прервать в связи с распадом СССР. Эти серьезные исследования были проведены учеными

Института физиологии и экспериментальной патологии АН КиргССР, СибНИИ энергетики (головной институт СССР), НИИЭ КиргССР, представителями Нурекской ГЭС ТаджССР.

В настоящее время в связи с Евразийской интеграцией проблема вновь приобрела актуальность и требует дальнейшей разработки.

Целью настоящей работы явилось установление закономерностей ремоделирования микрогемодициркуляции под воздействием коронного разряда (КР) ВВ ЛЭП в аварийной и стабильной фазах адаптации крыс к высокогорью.

Материал и методы. Работа выполнена на белых лабораторных крысах-самцах массой 150–210 г в условиях высокогорного перевала Туя-Ашуу на высоте 3200 м над уровнем моря. Животные были разделены на три серии опытов. Животные первой (контрольной) серии исследовались в аварийной и стабильной фазах адаптации к условиям высокогорья без дополнительных вмешательств; вторая серия животных – в фазу срочной, а третья – животные в стабильной фазе адаптации помещались в клетки, экранирующие электромагнитное поле в зоне модели однофазной ВВ ЛЭП 500 кВ при коэффициенте коронирования на проводе $E_k = E/E_0 = 1,5$, где E_k – коэффициент коронирования; E – напряжение на поверхности провода; E_0 – начальное напряжение, соответствующее появлению короны. Эксперименты проводились

Таблица 1 – Химический состав воздуха

| Показатели химического состава воздуха | Контроль | | Длительность эксперимента, час | | |
|--|---------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|
| | во дворе ВНИС | в зале ВНИС до коронирования провода | 1 | 4 | 8 |
| Химические | | | | | |
| NO мг/м ³ | 0,005 | 0,01 | 0,21 | 0,30 | 0,21 |
| NO ₂ мг/м ³ | 0,000 | 0,000 | 0,19 | 0,135 | 0,11 |
| HCN мг/м ³ | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 |
| SO ₂ мг/м ³ | 0,002 | 0,002 | 0,005 | 0,004 | 0,002 |
| Аэроионы | | | | | |
| p ⁺ ион/см ² | 400 | 550 | 16,000 | 29,800 | 30,000 |
| p ⁻ ион/см ² | 800 | 1200 | 31,500 | 17,066 | 13,333 |
| N ⁺ ион/см ² | 1,270 | 1540 | 160,000 | 160,000 | 160,000 |
| N ⁻ ион/см ² | 1,340 | 1650 | 130,000 | 130,000 | 130,000 |

на базе высокогорной научно-исследовательской станции (ВНИС) КиргНИИЭ. Животные подвергались действию КР по 8 часов в течение 1, 3, 5 дней.

Через 1, 4, 8 часов в пробах воздуха их клеток с крысами определяли содержание азона (O₃), оксида азота (NO), двуокиси азота (NO₂), синильной кислоты (HCN), двуокиси серы (SO₂), тяжелых и легких аэроионов (АИ) обоого знака (N⁺, N⁻, p⁺, p⁻) аэроиниметром Ибрагимова. В качестве контроля служили аналогичные исследования воздуха во дворе и в помещении ВНИС перед началом экспериментов.

Микроциркуляторное русло (МЦР), микрогеомоциркуляция (МГЦ) изучались прижизненно под контактном микроскопом «Люмам К-1». Одновременно определялись проницаемость МЦР методом метки белка и синим Эванса Т-1824 (И.А. Ойвин и соавт., 1961), вязкость крови вискозиметром марки «ВК-4», гематокрит с помощью микроцентрифуги МГЦ-8. Суправитально кровеносные сосуды животных инъецировались черной тушью на 10 %-ном нейтральном формалине в разведении 1:4 с последующим изготовлением просветленных и гистологических препаратов по общепринятым методикам.

Результаты исследования физико-химического состава воздуха сведены в таблицу, откуда следует, что общее количество АИ во дворе ВНИС составляет 3810 ион/см³, а в экспериментальном зале до начала коронирования провода – 4940 ион/см³ (таблица 1).

Такая разница вызвана тем, что двор ВНИС располагается вблизи трассы Бишкек – Ош, движение автотранспорта по которой довольно интенсивное. Это снижает количество АИ, по сравнению с данными, полученными вдали от дороги, в 1,5–2,0 раза. Число АИ в экспериментальном зале ВНИС повышено по отношению к данным во дворе, но снижено относительно результатам, полученным вдали от трассы.

По истечении одного часа после начала коронирования провода в воздухе из клеток с крысами общее число АИ достигло 1507500, что в 305 раз больше исходных данных. По истечении четырех часов коронирования число АИ составило 336866 ион/см³, а через 8 часов – 333333 ион/см³, что больше исходных данных в 68 и 67 раз соответственно. При этом число p⁺ с продлением сроков коронирования провода нарастает: через 1 час в 29, через 4 часа – в 54, через 8 часов – 54,5 раза. Напротив, p⁻ в течение первого часа эксперимента резко увеличивается (в 26 раз), затем постепенно снижается, но превосходит исходные величины (через 4 часа – в 14 раз, через 8 – 11 раз).

Тяжелые положительно зараженные АИ – N⁺ во все сроки эксперимента увеличены, по сравнению с исходными данными в 103 раза. Динамика N⁻ аналогична таковой p⁻, но на более высоком уровне. Так, в течение первого часа эксперимента их число увеличивается в 787 раз, а через 4 и 8 часов – в 79 раз, по сравнению с контрольными данными.

Содержание NO в экспериментальном зале ВНИС до начала коронирования провода выше, чем во дворе, в 2 раза. В воздухе из клеток с крысами содержание NO в течение первого часа коронирования увеличивается в 21 раз, в течение 4 часов – в 30 раза. К концу восьмого часа эксперимента содержание NO в крысиных клетках не отличается от данных, полученных через 1 час после начала эксперимента. Известно, что NO в технике получают продуванием воздуха через пламя электрической дуги. В наших экспериментах очевидно образование его под действием коронного разряда, но не ясно, почему содержание NO в первые 4 часа коронирования провода нарастает, а в последующем начинает снижаться.

NO нестойкий газ и быстро окисляется до NO₂. Содержание NO₂ в клетках с крысами под действием коронного разряда в первые 4 часа уве-

личивается, в последующие 4 часа снижается, но не до исходной величины.

Содержание HCN к концу 4-х часового коронирования увеличивается в 2, к концу 4-х часового – в 3 раза, по сравнению с исходными данными.

Содержание SO_2 под действием КР в течение одного часа нарастает в 25 раз, четырех часов – в 2 раза, восьми часов – не отличается от исходных данных.

Таким образом, КР на модели ВВ ЛЭП 500 кВ при $E_k = 1,5$ в условиях высокогорья вызывает сложные изменения физико-химического состава воздуха в рабочей зоне (до 50 см от потенциала). При этом изменения в организме зависят от сроков адаптации животных к высокогорью, продолжительности и частоты действия КР, от структурной организации и функциональной специализации органов (кожа, скелетная мышца, брыжейка и стенка тонкой кишки, печень, поджелудочная железа, легкие, мозг и др.).

Поэтому в настоящей статье рассматриваются результаты, полученные только при однодневном восьмичасовом нахождении животных в зоне КР в аварийной и стабильной фазах к высокогорью.

Клиника при восьмичасовом однодневном воздействии КР в аварийной фазе адаптации животных к высокогорью характеризуется покрасневшими выпученными глазами, редким глубоким дыханием, синюшностью мордочек, появлением прозрачного секрета под ноздрями. Крысы стремятся расположиться у противоположной от коронирующего провода стенке клетки и мало двигаются. После прекращения КР и вдали от потенциала крысы в течение 2–3 часов гиподинамичны, не подходят к воде и пище, наблюдается сонливость.

Проницаемость МЦР составляет $61,06 \pm 4,85$ % ($P < 0,05$), что превышает данные, полученные у интактных крыс с равным сроком адаптации к условиям высокогорья.

Вязкость крови повышается в 1,5–2,0 раза, по сравнению с контрольными величинами и составляет $8,27 \pm 0,90$ усл. ед. Гематокрит достоверно не меняется и равняется $41,33 \pm 2,40$ %.

Клиника при восьмичасовом однодневном воздействии КР в стабильной фазе адаптации (60 дней) животных к высокогорью существенно не отличается от данных, полученных в опытах в аварийной фазе (5–7 дней). Единственно, что бросается в глаза – это относительно частое и менее глубокое дыхание животных.

Проницаемость МЦР ($44,39 \pm 2,16$ %) достоверно снижается по сравнению с предыдущими данными. Вязкость крови ($7,42 \pm 0,24$ усл. ед.) имеет тенденцию к снижению, а гематокрит ($43,67 \pm 0,77$ %) – к повышению, по сравнению с данными, полученными в аварийной фазе адаптации.

При контактной биомикроскопии кожи наблюдается замедление кровотока, сгущение капиллярной сети, дилатация венул и спазм артериол. Кровоток в скелетной мускулатуре лабилен, вазомоция усилена, что способствует постоянному изменению реологии, капиллярного гематокрита и направления крови в пределах модуля МЦР.

В брыжейке тонкой кишки сгущение капиллярной сети и дилатация прекапилляров приводят к гиперваскуляризации органа. На этом фоне отмечаются микрокровоизлияния и диapedез эритроцитов. Нарушена гемореология, что выражается нарушением осевого потока, наличием признаков сладжа. В стенке тонкой кишки отмечается извитость капилляров и венул, агрегация эритроцитов, нарушение ламинарного течения крови.

Микроциркуляторное русло печени существенно не отличается от данных, полученных в контроле.

Легкие полнокровные, выявляется картина высокого объемного кровотока, что может вызвать перегрузку правого желудочка сердца. На отдельных участках просматриваются мелкоточечные кровоизлияния под висцеральную плевроу.

В головном мозге кровоток замедлен, о чем свидетельствует сужение сосудов оболочек мозга, агрегация и сладжирование эритроцитов.

Однодневная восьмичасовая экспозиция животных на фоне 60-дневной адаптации к высокогорью вызывает менее выраженные изменения МЦР и МГЦ, чем на фоне аварийной фазы. Однако, по сравнению с данными контрольных опытов, можно отметить модификацию перераспределительной реакции кровообращения. В эти сроки адаптации у интактных животных четко выражена централизация кровообращения с соответствующим ремоделированием ангиоархитектоники в коже, мышцах и внутренних органах. Под действием восьмичасового коронного разряда возникают признаки децентрализации кровообращения. Поэтому в субдермальном слое кожи кровоток мало отличается от данных интактных животных, хотя гиповаскуляризация органа не вызывает сомнений, иначе наблюдается усиление линейной и объемной скорости кровотока в коже и скелетных мышцах по относительно редкому кровеносному руслу. Напротив, в брыжейке, тонком кишечнике на фоне гиперваскуляризации наблюдается замедление линейной скорости кровотока, особенно в капиллярах и венулах.

Возникает парадоксальная картина, когда по скудному кровеносному руслу кожи и скелетных мышц кровь течет с большей скоростью, чем по обильному МЦР брыжейки и кишечника. Иначе говоря, наблюдается извращение типичной для высокогорья перераспределительной реакции крови.

Ремоделирование отдельных звеньев МЦР является признаком приспособления к создавшимся условиям. Так, замедление кровотока в одном звене МЦР сочетается с ускорением в другом, особенно по магистральным капиллярам и артериоловеноулярным анастомозам. Однако это не предотвращает явлений отека легких и тканевой гипоксии сердца, мозга и т. д.

Обсуждение. КР вызывает сложные изменения физико-химических свойств газо-воздушной среды вокруг коронирующей ВВ ЛЭП. Следовательно, на организм специалистов, работающих в зоне коронного разряда, действует целый комплекс модифицированных физических и химических факторов, вклад каждого из которых в процессах ремоделирования МЦР и МГЦ оценить можно только со значительными допущениями и оговорками. Это – с одной стороны. С другой – не легко связать те или иные изменения МЦР и МГЦ с отдельными факторами газо-воздушной среды в зоне КР.

Так, энергетики, подвергшиеся КР ВВ ЛЭП на высоте 2700 м над ур. м., отмечали чувство опьянения разной степени, а крысы выглядели сонными, что можно отнести к действию высокой концентрации NO, учитывая его наркотические свойства. Оксид азота участвует «в передаче сигналов в синапсах нервной системы; формировании системы обучения, памяти, чувства боли, проведения зрительных сигналов, обоняния, повышении резистентности нейронов коры больших полушарий к ишемии» [3]. Отсюда действие NO в зоне КР можно было предположить как нейропротекторное. Однако все эти эффекты осуществляются оксидом азота только в физиологических условиях [3].

Под действием КР в условиях высокогорной гипоксии вместо централизации отмечается децентрализация кровообращения. Известно также, что оксид азота играет сигнальную роль в сосудистых реакциях [4] и выступает одновременно в качестве вазодилататора и вазоконстриктора. Не исключено, что поступление NO извне, наряду с образованием его в качестве гистогормона в организме, является причиной извращения обычной для высокогорья централизации кровообращения. Еще в 70-е гг. прошлого века наша соотрудница Т.Н. Терентьева установила извращение реакции гладкомышечных клеток прекапилляров на ацетилхолин на перевале Туя-Ашуу. Тогда объяснить это не было возможности, сегодня мы можем сказать, что в условиях высокогорной гипоксии нарушается синтез NO, что извращает реакцию гладкомышечных клеток на ацетилхолин, а централизация заменяется децентрализацией кровообращения.

Характерным симптомом ответной реакции организма на действие КР выступает пучеглазие,

гиперемия конъюнктивы и ушных раковин. Гиперемии конъюнктивы глазного яблока и ушных раковин вполне уместно связать с децентрализацией кровообращения, а пучеглазие – с высокой проницаемостью капиллярного русла с последующим увеличением ретробульбарной ткани, обусловленным отеком и венозным застоном.

NO на воздухе окисляется с образованием ядовитого NO₂, особенно интенсивно в течение первого часа эксперимента (см. таблицу 1). Затем, по неизвестным нам причинам, его концентрация начинает постепенно снижаться, но к исходному уровню не возвращается. Аналогичную динамику имеет и концентрация SO₂. Напротив, концентрация HCN, по мере удлинения срока эксперимента, нарастает. Все эти газы, несомненно, вносят свою лепту в ремоделирование МЦР и МГЦ, детали которого требуют дальнейшего выяснения. Тем не менее, по этому поводу можно выдвинуть ряд предположений.

Гиподинамия, пассивность, синюшность слизистых оболочек, явление отека в легких вполне могут быть связаны с действием NO₂, а признаки тканевой гипоксии – с HCN.

В зоне коронного разряда резко возрастает концентрация легких и тяжелых АИ обоих знаков. Известно, что заряд иона равен заряду электрона и равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ кулона. Нормальными или легкими АИ принято считать молекулярные комплексы (10–15 молекул) с одним элементарным зарядом, размером 10^{-8} см и подвижностью 1–2 см/сек. В электрическом поле напряжением 1 В на см. Само собой разумеется, что электрическое поле в зоне КР намного выше и подвижность легких АИ резко нарастает. Это создает условия для относительно частого столкновения легких АИ с более крупными частицами с оседанием на них и образованием средних (10^{-6} см) и тяжелых (10^{-5} см) АИ. Поэтому концентрация тяжелых АИ в зоне КР превалирует над таковой легких АИ независимо от их знака.

Мы не смогли дифференцировать последствия воздействия на организм АИ от таковых других факторов газо-воздушной среды в зоне КР. Поэтому в качестве обсуждения прибегли к данным, полученным у больных с патологией легких, и крыс со стенозом трахеи в условиях высокогорной спелеолечебницы [5].

Важную роль в саногенезе бронхиальной астмы играют и отрицательно заряженные ионы, которые в организме играют регуляторную функцию. Этих АИ в помещении спелеолечебницы значительно больше (до 10000 АИ/см³), чем в Бишкеке (до 500 АИ/см³) и наземном стационаре в селе Чолпон (2100 м над ур. м., до 5000 АИ/см³). Отрицательно заряженные ионы кислорода частично

оседают на мокроте в просвете бронхов, которые представляют собой коллоид. Усиливая отрицательный заряд элементов мокроты, АИ разжижают её и способствуют выделению из дыхательных путей. Тем самым интенсивность очищения просвета бронхиального дерева, усиленная хлоридом натрия, нарастает. АИ раздражают рецепторы слизистой оболочки, благотворно действуют на дыхательный центр, за которым следует уменьшение частоты (одышка) и углубление дыхания.

Под действием микрочастиц хлорида натрия, стенки бронхов очищаются от погибших клеток слизистой оболочки и приставших к ней обсемененных примесей мокроты. На этом фоне АИ стимулируют регенерацию базальных клеток и способствуют восстановлению слизистой дыхательных путей [5, 6].

30–50 % АИ достигают альвеол, где они оказывают не только местное, но и резорбтивное действие из-за особенностей структурной организации и функциональной специализации альвеолярно-капиллярной мембраны (АКМ). Как известно, в составе межальвеолярных перегородок «...преобладают соединительно-тканые элементы и эндотелиоциты кровеносных капилляров» [7]. Здесь «...сосудистая стенка – это не один из равнозначных компонентов соединительной ткани, обеспечивающий только ее кровоснабжение и обменные процессы, а центральная ее структура, вокруг которой как вокруг стержня разворачиваются разнообразные по своей клеточной и тканевой дифференцировки регенераторные и гиперпластические процессы» [8]. В итоге «функциональная единица легкого состоит из альвеолярного капилляра и его связей с легочными артериолой и венулой, соответствующими нервными волокнами и эпителием. Таким образом, альвеолы не являются функциональной единицей легких» [9].

Альвеолярно-капиллярная мембрана с обеих сторон покрыта электростатическим коллоидом – сурфактантом на альвеолярной и гликокаликсом – на люминальной поверхностях. В противогликановом слое сурфактанта легких происходит биокаталитическая вспышка отрицательного заряда при энергообмене между каталитически вырабатываемыми здесь отрицательными и положительными зарядами, которые приносятся в легкие кровью с углекислым газом и водой. По такому же типу вспышки происходят на другой стороне АКМ, покрытой гликокаликсом. В результате на уровне АКМ совершается не только обмен газов, но и аэроионами – электрообмен.

Поступившие в кровь отрицательные аэроионы увеличивают число отрицательных зарядов элементов крови и белков плазмы [10, 11]. Это устраняет агрегацию и сладж-феномен формен-

ных элементов крови, отмечаемые у больных бронхиальной астмой до начала высокогорной спелеотерапии. В результате улучшается микрогемодиализация и обмен веществ между кровью и тканями. Непрерывный обмен электрическими зарядами в альвеолах обеспечивает ими клетки органов. В свою очередь, клетки отдают свои отработанные аэроионы и электрические заряды венозной крови, а те выделяют их в легкие при дыхании. В итоге на уровне АКМ отмечается обратный поток аэроионов и электрических зарядов.

Кровь, обогащенная отрицательными аэроионами, увеличивает отрицательный заряд клеток и поддерживает золеобразное состояние их цитоплазмы и оптимальный обмен веществ. Постоянная подзарядка клеток электроионами сохраняет их энергосбалансированность, предотвращает электроразрядку, а следовательно, коагуляцию с переходом в гель.

Особое значение имеет в условиях высокогорной гипоксии свойство отрицательно ионизированного воздуха стимулировать утилизацию кислорода клетками различных органов и предотвращает их повреждение из-за недостатка кислорода.

Таким образом, изменения газо-воздушной среды в зоне коронного разряда оказывают сложное воздействие на организм, сочетающий в себе одновременно пато- и саногенетические механизмы.

Литература

1. Денисенко Е. Кыргызстан активизирует участие в международной борьбе с наркотиками // *Вечерний Бишкек*. 2015. 27 апреля. № 46. С. 11.
2. Шидаков Ю.Х.-М. О сочетанном воздействии факторов высокогорья на микрогемодиализационную систему / Ю.Х.-М. Шидаков, Н.В. Тимушкина, В.И. Фроленко и др. // *Здравоохранение Кыргызстана*. 1990. № 6. С. 29–32.
3. Лупинская З.А. Эндотелий. Функция и дисфункция / З.А. Лупинская, А.Г. Зарифьян, Т.Ц. Гурович и др. Бишкек, 2008. 54 с.
4. Furchgott R.F. et al. The obligatory role of endothelial cells in the relaxation of arterial smooth muscle by acetylcholine // *Nature*. 1980. № 288. P. 373–378.
5. Абдумаликова И.А. Горный климат и спелеотерапия / И.А. Абдумаликова. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2010. 298 с.
6. Шидаков Ю.Х.-М. Высокогорная спелеотерапия / Ю.Х.-М. Шидаков, И.А. Абдумаликова. Бишкек, 2009. 276 с.
7. Романова Л.К. Дыхательная система / Л.К. Романова // *Структурные основы адаптации и компенсации нарушенных функций / под ред. Д.С. Саркисова*. М., 1987. С. 263–283.

8. Саркисов Д.С. Структурные основы адаптации и компенсации нарушенных функций / Д.С. Саркисов. М.: Медицина, 1987. 446 с.
9. Чернух А.А. Микроциркуляция / А.А. Чернух, Н.Н. Александров, О.В. Алексеев. 2-е изд., стереотип. М.: Медицина, 1984. 429 с.
10. Минх А.А. Современное состояние вопроса о биологическом действии и гигиеническом значении ионизации атмосферы / А.А. Минх // Атмосферное электричество. Л., 1976. С. 285–292.
11. Чижевский А.Л. Аэроионы и жизнь. Беседы с Циолковским / А.Л. Чижевский. М.: Мысль, 1999. 716 с.