

УДК 612;612.8;591.1

ИССЛЕДОВАНИЕ СОМНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ОСТРОЙ АДАПТАЦИИ ЧЕЛОВЕКА К ВЫСОКОГОРЬЮ

© 2014 г. В. В. Войнов^{1,2}, Е. В. Вербицкий¹

¹ФГБУН Институт аридных зон Южного научного центра РАН,

²Азовский филиал Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН

E-mail: voinov@ssc-ras.ru

Поступила в редакцию 22.05.2013 г.

Основной причиной изменения электрогенеза неокортекса в условиях адаптации к высокогорью на высотах 3000–5600 м над уровнем моря, судя по характеристикам ЭЭГ ночного сна и бодрствования, является некомпенсированная поверхностная гипоксия мозга. Ночью ситуация усугубляется за счет эффектов апноэ/гипопноэ сна, возникающих из-за мышечной атонии во время резких провалов в глубокий медленный сон. Компенсация указанных расстройств за счет гипертензивных и кардиореспираторных реакций определяется общими механизмами и индивидуальными стратегиями.

Ключевые слова: цикл сон–бодрствование, высокогорье, адаптация, кардио-респираторная регуляция, электрокардиограмма, электроэнцефалограмма.

DOI: 10.7868/S013116461405018X

Актуальность исследования процессов влияния условий высокогорья на человека определяется значительной востребованностью объективных данных о механизмах адаптации человека к экстремальным факторам различной природы. Принципиальным является внимание к сомнологическим аспектам индивидуальной адаптации для прогноза пределов устойчивости человека.

Одной из центральных проблем исследований адаптации человека к высокогорью является оценка влияния на организм сниженного парциального давления кислорода воздуха и описание значимости формирующихся эффектов гипоксии [1, 2]. Горную (гипоксическую) гипоксию определяет пониженное парциальное давление кислорода, а не изменение концентрации кислорода в воздухе, которое до высоты 20000 м сохраняется на уровне 20.96% [2].

Кроме достаточно известного и широко исследованного явления гипоксии в горах наблюдаются эффекты снижения в организме углекислого газа – гипокапнии. Однако эффект гипокапнии при подъеме в горы может быть вторичным из-за “вымывания” углекислого газа на фоне роста вентиляции легких, вызванного гипоксией [2]. Гипокапния усугубляет неблагоприятное влияние гипоксии, негативно сказываясь на общей работоспособности человека [3–5]. Помимо этого низкая эффективность адаптационных процес-

сов в условиях высокогорной гипоксии связана с “плохим сном на высоте” [6, 7].

Исследования, проведенные еще в XIX веке (Stokes, Bert, Tyndall, 1860 – цит. по [5]), показали, что одним из признаков острой адаптации человека к высоте (не менее 4000 м над уровнем моря) является нарушение ритма дыхания частыми поверхностными дыхательными движениями, прерывающимися произвольными продолжительными дыхательными паузами – апноэ. Оказалось, что в высокогорье нарушение ритмичности дыхания – явление весьма характерное, причем не только в бодрствовании, но и во сне. У человека, спящего в горах, отмечается аperiodическое удлинение дыхательного цикла за счет формирования продолжительных апноэ, что приводит к артериальной гипоксемии [5]. Несмотря на то, что высокогорье формирует целый спектр сложных адаптационных перестроек, а напряжение механизмов адаптации может привести к срыву и развитию опасных для жизни человека патологий, исследования этих эффектов с использованием современных психо- и нейрофизиологических методов остаются единичными, а сомнологические – практически отсутствуют.

Цель настоящей работы – исследование сомнологических аспектов, физиологических феноменов групповой и индивидуальной адаптации человека к условиям высокогорья.

МЕТОДИКА

В работе представлены результаты четырех 10–12-суточных экспедиций (июнь–июль, 2008–2011 г.) в горах Кавказа с восхождением на западную вершину г. Эльбрус (5642 м, Центральный Кавказ). Руководитель экспедиций – С.Н. Литвиненко. Всего обследовано 27 человек с разным уровнем высокогорной подготовки. В ходе ежедневного опроса уточнялись физическое, психологическое состояния, оценивались самочувствие и субъективное качество ночного сна. В процессе акклиматизации и восхождения на вершину Эльбруса регистрировали: частоту сердечных сокращений (ЧСС) покоя в положении сидя и после 20 приседаний в быстром темпе; параметры вариационной кардиоинтервалометрии при помощи прибора “Психофизиолог” (Медиком МТД, г. Таганрог), в положении сидя 3 мин; временные и амплитудные параметры электрокардиограммы (Холтеровский кардиомонитор “Schiller”, Швейцария); время задержки дыхания на выдохе (проба Генчи).

У четверых добровольцев регистрировали суммарную биоэлектрическую активность мозга (ЭЭГ) в спокойном бодрствовании и полисомнограмму ночного сна [8] (“Энцефалан-ЭЭГР-19/26” модификация “Мини”, Медиком МТД, г. Таганрог) в восьми отведениях ($F_3, F_4, C_3, C_4, P_3, P_4, O_1, O_2$). Для учета нагрузки обследуемых использовали разработанные оценки $N1$ и $N2$ (рис. 1).

Большую часть обследований проводили в вечернее время после работ по обустройству лагеря и приема пищи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все обследуемые, особенно в первые 3–4 дня экспедиции, отмечали высокую утомляемость и нарастание тревожности. Субъективно у 66.7% обследованных наибольшее ухудшение самочувствия, снижение активности, физической и психологической работоспособности отмечали в день приезда в Баксанскую долину (высота 1800 м), после акклиматизационного подъема на высоту 2800 м (второй день пребывания в горах), у 11.1% – после подъема на высоту 4400 м (четвертый день), у 18.5% – после работы на высоте 4670 м и спуска до 1800 м (пятый день). Значительное ухудшение состояния отмечали все участники экспедиции, совершившие восхождение на Эльбрус, особенно остро – вечером после спуска на высоту базового лагеря на высоте 4400 м (9 человек, десятый день).

В первый день приезда (высота 1800 м) 37.5% участников экспедиции жаловались на низкую эффективность сна с нарушениями засыпания

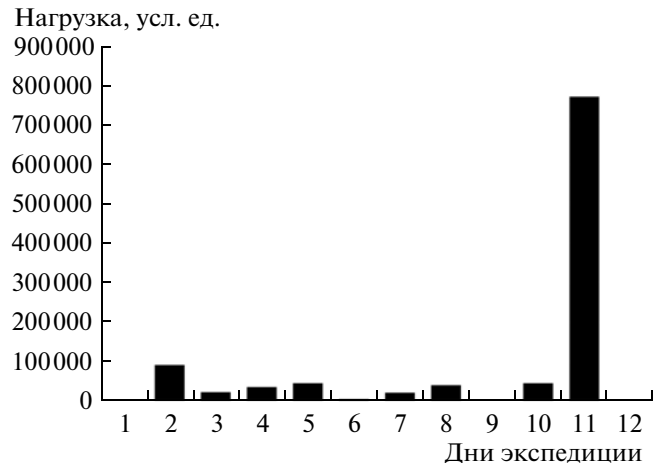


Рис. 1. Динамика усредненной по группе условной нагрузки, связанной с выполнением человеком работы по подъему в горы и спуску. Максимальная нагрузка – одиннадцатый день, пятнадцатичасовая работа по подъему от высоты 4400 м до 5642 м и спуск обратно.

Пояснения:

Нагрузка – условная суммарная нагрузка, выполненная за сутки, измеряется в условных единицах:

$N1$ (нагрузка при подъеме в гору) = Время в пути (часы) × Число шагов × Перепад высот за измеряемый период (км) × Высота пункта прибытия (км) и(или) $N2$ (нагрузка при спуске) = $0.3 \times$ (Время в пути (часы) × Число шагов × Перепад высот за измеряемый период (км) × Высота пункта прибытия (км)).

(11.1%), частыми ночными пробуждениями (50.0%), тяжелым утренним пробуждением (76.4%). Схожие расстройства сна наблюдались на 3, 6, 8 дни, после подъема и спуска, а также после второго подъема на высоту 4400 м от третьей станции канатной (кресельной) дороги (3780 м) и последующего штурма Эльбруса (11 день). Как показано на рис. 1, физическая нагрузка в этот день существенно превышала нагрузку в другие дни экспедиции.

Напряженные климатические условия (несмотря на июнь, на высоте более 3000 м – 5–7 градусов мороза, сильный ветер), ощущаемая “нехватка воздуха”, сложный рельеф местности (лед и снег под ногами) провоцировали не только физическое, но и существенное эмоциональное напряжение, что способствовало росту тревожности у участников экспедиции.

Анализ результатов мониторинга пульса позволил отметить, что частота сердечных сокращений в покое при нахождении в базовом лагере (первый день, 1800 м над уровнем моря) у большинства участников экспедиции соответствовала брадикардии при относительно высоком межличудивидуальном разнообразии (табл. 1). Однако при росте нагрузки и повышении значимости фактора гипоксии, в частности после выполне-

Таблица 1. Индивидуальные особенности частоты сердечных сокращений (ЧСС, уд/мин) в состоянии покоя в динамике адаптации к условиям высокогорья

Обследуемые	ЧСС			Процент изменения четвертого дня по отношению к первому	Процент изменения пятого дня по отношению к первому
	первый день в горах, базовый	четвертый день в горах	пятый день		
	1	2	3	$((2-1)/1) \times 100$	$((3-1)/1) \times 100$
К.А.	72	92	127	27.78	76.39
В.В.	68	90	125	32.35	83.82
Ва.В.	70	95	120	35.71	71.43
Ф.Г.	76	105	130	38.16	71.05
Д.К.	52	84	126	61.54	142.31
К.О.	60	104	137	73.33	128.33
Т.А.	56	92	121	64.29	116.07
Л.С.	54	94	130	74.07	140.74
О.С.	76	96	132	26.32	73.68
Средние	64.89	94.67	125.56	48.17	100.43
Ошибка среднего	3.16	2.19	1.79	6.61	10.32

ния значительной работы по подъему на высоту 4400 м (четвертый день) ЧСС существенно возрастала (в среднем по группе на $48.17 \pm 12.1\%$; достоверно по критерию Вилкоксона – $Z = 2.67$; $P = 0.008$) при выраженной тенденции к сглаживанию межиндивидуальных различий (уменьшение дисперсии на $52.0 \pm 8.12\%$). Та же тенденция сохранилась и при анализе перенесения нагрузки в пятый день экспедиции (кратковременный выход от базового лагеря (4400 м) к скалам Пастухова (4670 м). Данные, приведенные в табл. 1, позволяют ранжировать участников экспедиции по выраженности перестройки сердечно-сосудистой системы в ответ на нагрузку (см. колонки “процент изменений”), отмечая общую тенденцию – снижение межиндивидуальной вариабельности исследуемого параметра.

При анализе индивидуальных данных во всех парах сравнения основной механизм перестройки деятельности сердечно-сосудистой системы – тахикардия при значительном снижении вариабельности частоты сердечных сокращений, ритм сердечных сокращений становится все в большей степени ригидным при снятии эффектов аритмии (достоверно по критерию Вилкоксона – $Z = 2.20$; $P = 0.028$; уменьшение дисперсии на $83.7 \pm 14.8\%$).

При восхождении на вершину Эльбруса проводили мониторинг электрокардиограммы в трех отведениях в течение 16 ч 38 мин (обследуемый ДК). В исходном состоянии (базовый ла-

герь – 1800 м, спокойное состояние, положение – сидя) ЧСС составляла 52 уд/мин (рис. 2). На пике нагрузки, на подходе к вершине, ЧСС достигала максимальных значений – до 150 уд/мин при смещении *ST*-сегмента относительно фонового состояния на 2.8 мВ; через 4 ч после возвращения в базовый лагерь, на фоне сна ЧСС снизилась до 50 уд/мин, *ST* = 1.2 мВ. Кроме того, на фоне пиковой нагрузки регистрировалась депрессия амплитуды и *R*-, и *T*-зубцов кардиокомплекса, что при учете значительного смещения *ST*-сегмента позволяет говорить о существенном снижении электрогенеза и процессов реполяризации в миокарде, что, вероятно, свидетельствует о снижении коронарного кровообращения и сердечного выброса.

В качестве обобщающего критерия, позволяющего оценить уровень напряженности регуляции системы кислородообеспечения, была использована проба Генчи (время произвольной задержки дыхания на выдохе). Проведенные исследования позволяют отметить, что дни с относительно большой физической нагрузкой характеризуются наименьшими значениями данного показателя. У всех обследованных время задержки дыхания на выдохе снижалось на 11–60%, демонстрируя линейную зависимость от суммарной работы, выполненной в течение соответствующего дня (коэффициент корреляции = 0.87). Очевидно, что ухудшение показателя обусловлено нарастанием напряжения системы регуляции кислородообес-

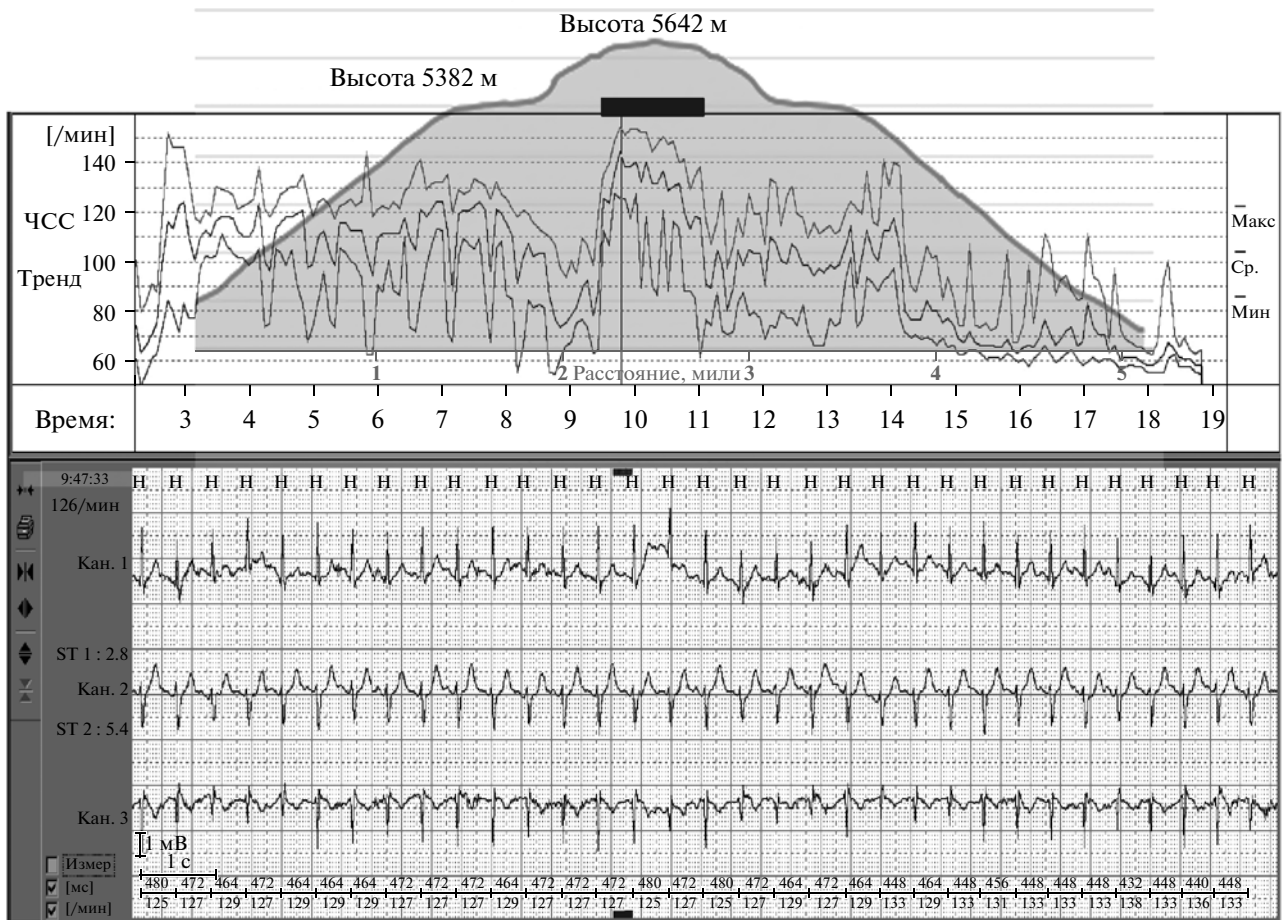


Рис. 2. Электрокардиографический мониторинг при восхождении на западную вершину Эльбруса (обследуемый ДК). Отмечен фрагмент максимального напряжения вблизи вершины.

печения человека на фоне увеличения усталости. Особо выражены изменения в системе дыхания, проявляющиеся в первые часы пребывания на высоте 4400 м (при первом и втором подъемах). У большинства членов экспедиции поверхностные ритмичные вдохи–выдохи непроизвольно прерывались попыткой глубокого вдоха на фоне ощущения “нехватки кислорода”. Через 2–3 ч дыхание становилось ритмичным, хотя ощущение дефицита кислорода сохранялось, а “срыв” ритма дыхания провоцировался физической нагрузкой. Отмеченный факт нарушения ритма дыхания достаточно хорошо известен из литературы, по форме проявления, а возможно, и по механизмам он аналогичен дыханию Чейна–Стокса – клиническому маркеру поражений стволовых образований головного мозга [5, 7, 9, 10]. Вероятно, наблюдаемые реакции объясняются не только высотной гипоксией, но и снижением в крови участников восхождения концентрации углекислого газа при интенсивном поверхностном дыхании и, как следствие, угнетением состояния цен-

тральных хеморецепторов и центрально-мозговых регуляторов [7, 9, 11].

Анализ биоэлектрической активности мозга участников экспедиции в положении сидя на высотах 75 м (место проживания г. Ростов-на-Дону), 2300 м, 4400 м, 5000 м показал динамичность перестроек колебаний ЭЭГ-диапазона 8.0–13.0 Гц в спокойном бодрствовании с открытыми и закрытыми глазами. Как известно, открывание и закрывание глаз отражает изменение уровня активации неокортекса и позволяет количественно оценить тонус больших полушарий мозга [12]. Выяснилось, что если на высоте 75 м прирост выраженности α -ритма при закрывании глаз отмечается преимущественно в теменно-затылочном регионе неокортекса, то на высотах более 4000 м у обследованных фокус перестроек смещался преимущественно в центральные области (рис. 3). На высотах 4400 м и 5500 м снижение тонуса больших полушарий при закрывании глаз и при попытке расслабиться сопровождалось перестройками не только в выраженности α -ритма, но и за-

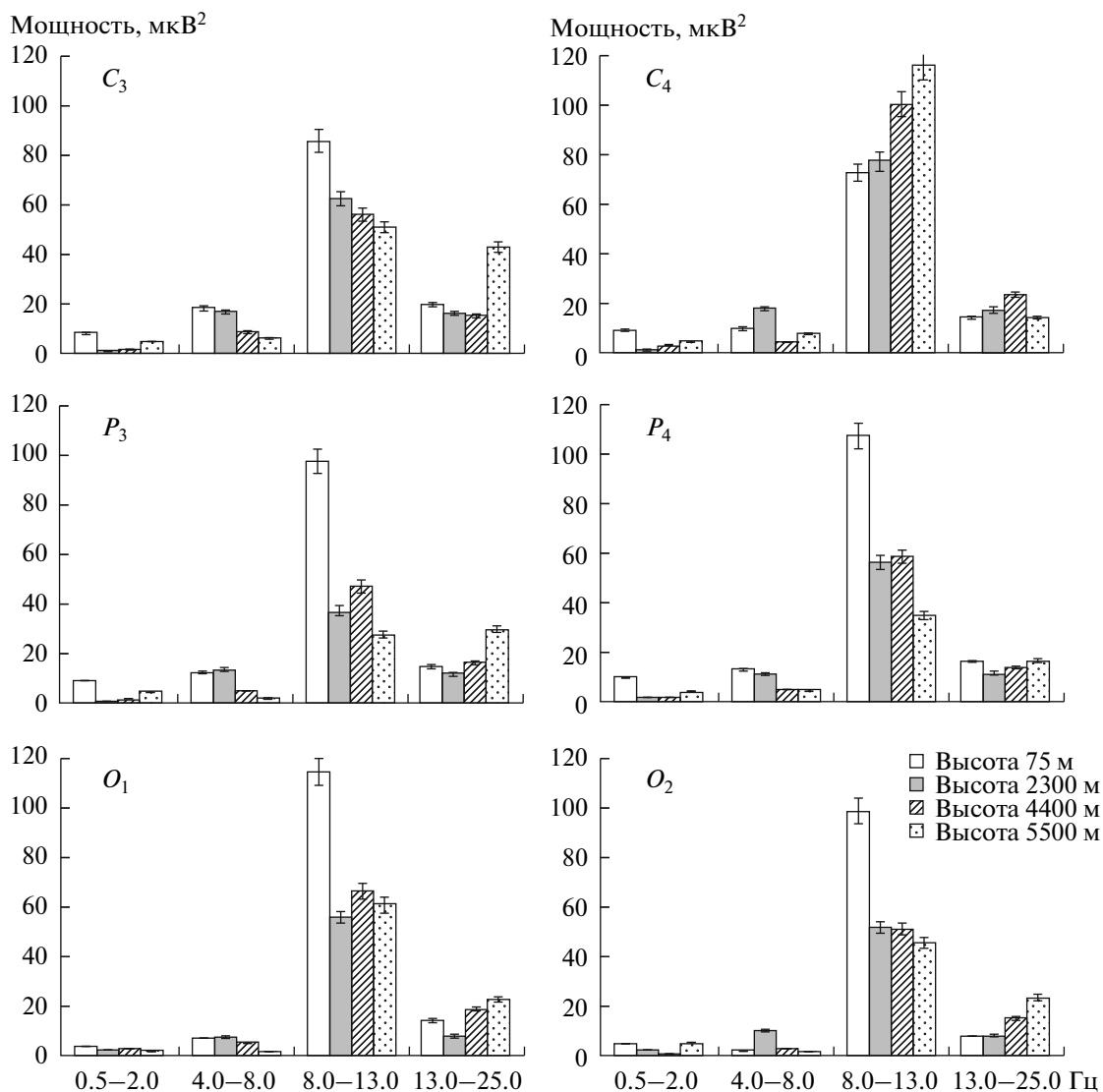


Рис. 3. Обобщенная динамика изменений спектра мощности ЭЭГ в спокойном бодрствовании с закрытыми глазами на высоте 75 м, 2300 м, 4400 м, 5500 м. Усреднение спектров мощности трех обследуемых, рассчитанных по восьми 10-секундным фрагментам ЭЭГ.

хватывало высокочастотную часть спектра ЭЭГ (13.0–25.0 Гц).

Таким образом, проведенный анализ различных параметров состояния систем организма участников экспедиции позволил констатировать высокий уровень напряжения систем кислородообеспечения, центральной нервной системы, не снижающийся уровень ощущения напряжения и тревожности. Это находило отражение и в особенностях организации цикла сон–бодрствование. Так, в частности, по субъективным отчетам у 67% обследуемых выявлено прогрессирующее ухудшение самочувствия после утреннего пробуждения и в последующем бодрствовании после двух и более ночевок на высотах выше 2000 м над уровнем моря. Большинство участников отмеча-

ли: тяжесть в голове, утренние головные боли, дневную сонливость, а также отсутствие чувства отдыха сразу после пробуждения. Объективный контроль выявлял учащение ЧСС, высокое диастолическое давление крови утром по сравнению с серединой дня. Психологическое тестирование показало нарастание ситуативной тревожности по шкале Спилбергера–Ханина в среднем на 14 единиц. Манифестация указанных проявлений наблюдалась у альпинистов, совершивших подъем на вершину г. Эльбрус и спустившихся в базовый лагерь, выполнив физическую работу почти в 5 раз большую по отношению к предыдущим дням экспедиции (рис. 1). На покорителей вершины оказывали также негативное влияние

Таблица 2. Индивидуальные особенности развития глубокого медленноволнового ночного сна в домашних условиях и на высоте 4400 м

Обследуемые	Средняя мощность колебаний ЭЭГ в Δ -диапазоне (мкВ ² ; отведения C ₃ -C ₄)		Процент высоких (≥ 0.6) корреляционных связей между отведениями ЭЭГ (15 пар)	
	сон в домашних условиях	сон на высоте 4400 м	сон в домашних условиях	сон на высоте 4400 м
К.А.	591.9 ± 19.4	459.5 ± 27.2*	66.9 ± 7.7	43.1 ± 11.7
В.В.	652.4 ± 29.6	351.1 ± 35.8*	79.4 ± 4.4	36.1 ± 8.5*
Д.К.	646.2 ± 20.3	474.0 ± 37.6*	67.4 ± 7.8	45.8 ± 6.5*
Л.С.	458.6 ± 8.9	430.4 ± 44.9	59.4 ± 6.2	29.0 ± 9.8*

Примечания: * – уровень значимости ≤ 0.05 – *T*-критерия Стьюдента для зависимых выборок; для расчета показателей анализировались 12 семисекундных отрезков ЭЭГ сна; корреляция – значение кросскорреляционной функции электрограмм при нулевом временном сдвиге.

погодные факторы: ветер до 18 м/с, низкая температура воздуха (-10°C) и снежные заряды.

Проведение полисомнографического обследования показало (табл. 2), что сон на высоте отличается от ночного сна в привычных условиях меньшей амплитудой Δ -волн в ЭЭГ, нарушением их генерализации, а также значительной вариабельностью амплитудных характеристик основных диапазонов ЭЭГ-колебаний.

У всех участвующих в исследовании полиграфическая картина сна, зафиксированная в привычных условиях проживания (75 м над уровнем моря), соответствовала типичному развитию ночного сна без нарушений дыхания (пример на рис. 4) [8, 13]. Это проявлялось в увеличении выраженности колебаний θ -диапазона (4.0–8.0 Гц) в начале засыпания, с последующим (при развитии медленноволновой фазы глубокого сна) доминированием колебаний Δ -диапазона (0.5–4.0 Гц). Начало парадоксальной фазы сна характеризовалось снижением представленности и мощности колебаний в Δ -диапазоне и увеличением колебаний ЭЭГ в θ - и α -диапазонах (от 4.0 до 13.0 Гц). Сопоставление первых трех циклов сна показало, что наибольшая изменчивость характерна для колебаний Δ -диапазона, которая снижается от первого к третьему циклу сна, тогда как изменения величины спектральной плотности колебаний более высокой части спектра ЭЭГ – в диапазоне 4.0–25.0 Гц, как правило, не достоверны.

Пульсоксиметрия во время сна на высоте показала, что типичными являются проявления ночной гипоксемии, не компенсируемой вышеуказанными изменениями в деятельности сердечно-сосудистой системы. Средние значения сату-

рации артериальной крови в течение ночи у всех обследуемых были ниже клинической нормы (94%). При анализе полисомнограммы ночного сна пяти человек в условиях высокогорья было отмечено большее количество эпизодов десатурации крови (10 с и более) – от 15 до 48 случаев при среднем уровне сатурации $86.4 \pm 6.1\%$. У большинства участников также был зафиксирован храп до 82 дБ в положении тела на спине и на боку, осложненный в 84.2% случаев возникновением нарушений дыхания по типу обструктивных апноэ и гипопноэ сна легкой и средней степени тяжести. Указанные расстройства дыхания сопровождались многочисленными активациями в ЭЭГ, несинхронными по регионам неокортекса, что проявлялось в снижении корреляционных связей ЭЭГ-показателей. В частности, наблюдалось уменьшение корреляционных связей всей ЭЭГ (значение кросс-корреляционной функции электрограмм при нулевом временном сдвиге) и в диапазоне Δ -колебаний (значение когерентности) по 15 парам отведений. Причем в ряде случаев во время сна на высоте в отличие от привычной генерализованной Δ -активности регистрировались “переливы” фокусов Δ -волн, чаще в центральной или париетальной областях мозга. В примере на рис. 5 показаны: общее снижение генерализованного характера глубокого медленноволнового сна на высоте, увеличение фрагментарности выраженности основного ритма (рост дисперсии показателей мощности последовательных эпизодов сна). Фрагменты экзальтированной Δ -активности сменялись характерной “рябью” θ -колебаний, отражающей, по-видимому, эпизоды парадоксального сна с характерной биоэлектрической активностью гиппокампа-

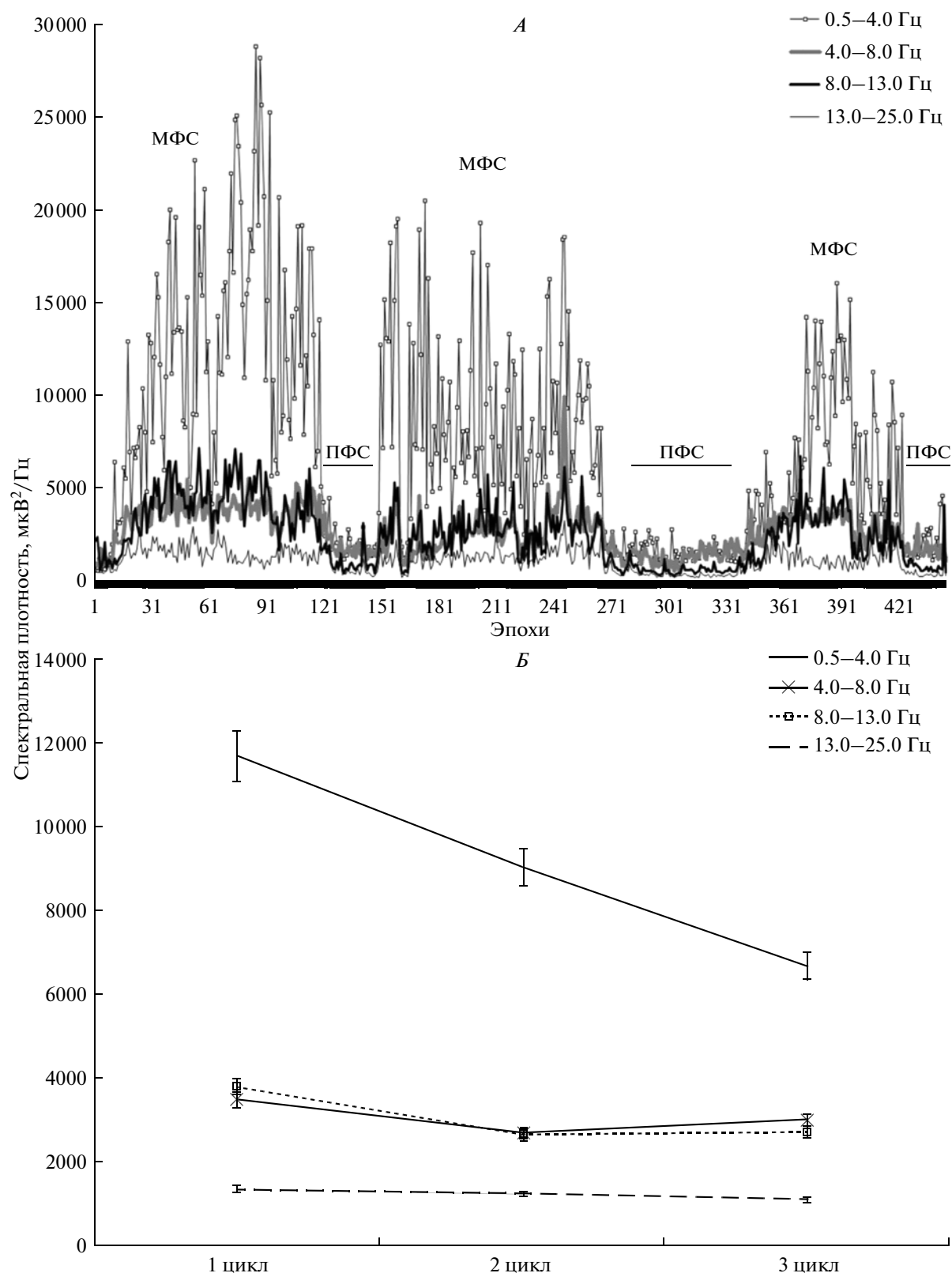


Рис. 4. Спектральная плотность ЭЭГ ночного сна в условиях постоянного проживания (высота над уровнем моря — 75 м, до высокогорной экспедиции) с чередованием медленноволнового и парадоксального сна. Обследуемый Л.С. *А* — изменение средней величины спектральной плотности в частотных диапазонах 0.5–25.0 Гц в медленноволновой (МФС) и парадоксальной (ПФС) фазах сна в течение первых трех циклов сна; *Б* — первые три цикла сна.

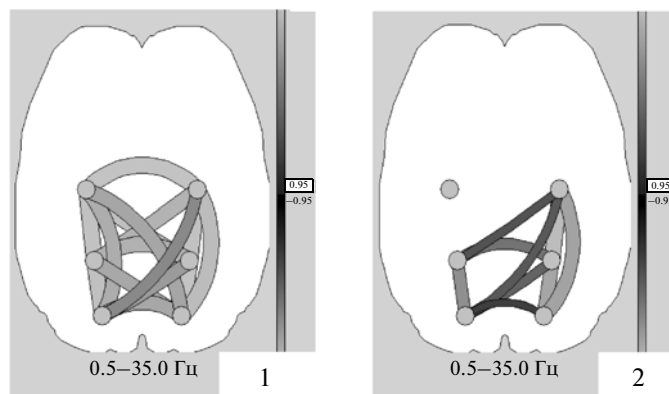
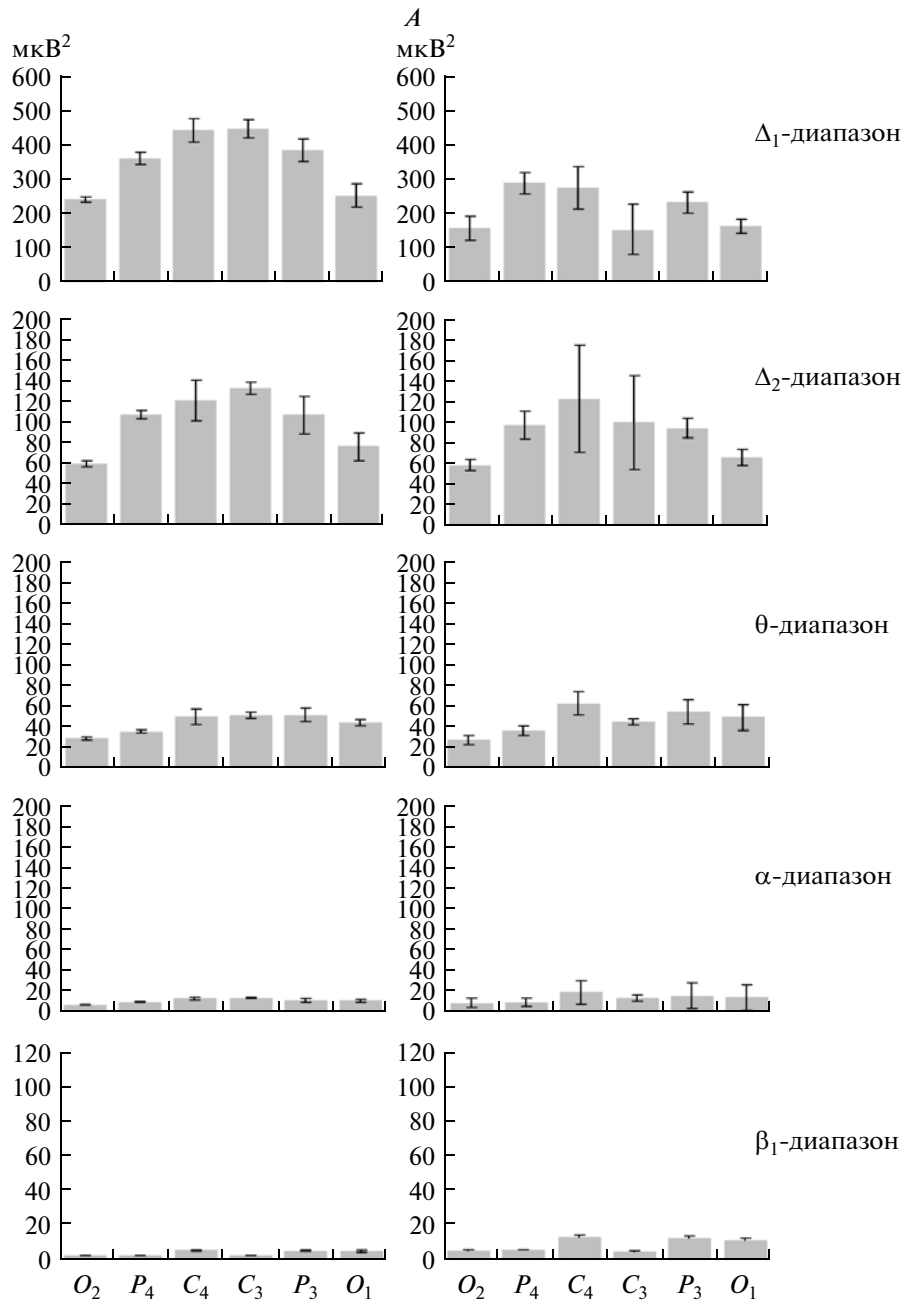


Рис. 5. Спектральные характеристики ритмических диапазонов (А) и схема функции кросскорреляции (Б) ЭЭГ глубокого медленноволнового ночного сна обследуемого В.В. в привычных условиях проживания (А1, Б1) и на высоте 2733 м над уровнем моря (А2, Б2).

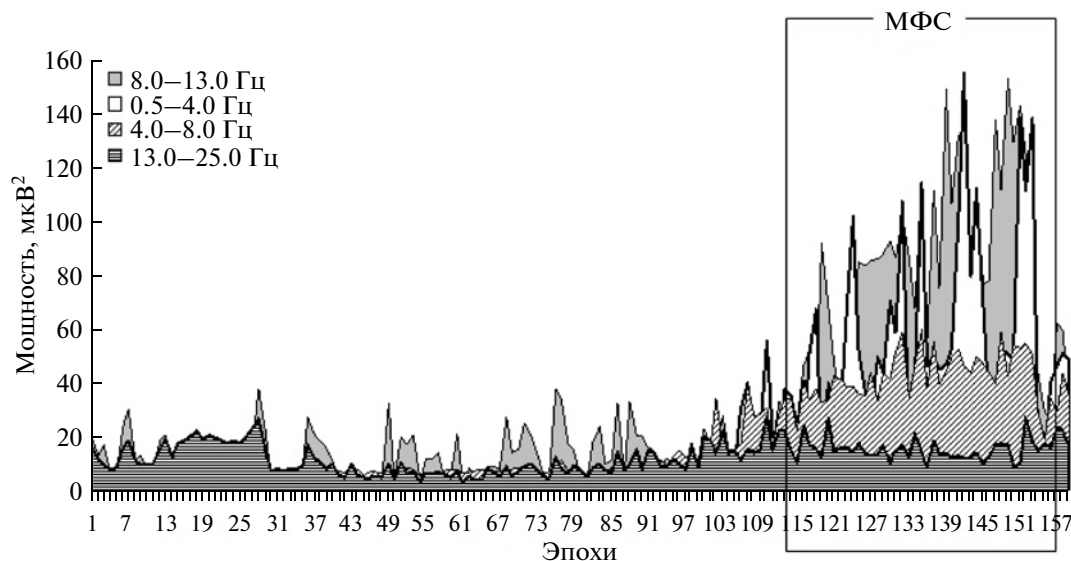


Рис. 6. Спектральная плотность ЭЭГ монотонного развития ночного сна без чередования медленноволнового (МФС — медленноволновая фаза сна) и парадоксального сна в условиях высокогорья (высота над уровнем моря — 4500 м). Обследуемый Л.С.

ной природы. Такая организация ЭЭГ-активности ближе к локальному сну (фрагментарному, парциальному), чем к ортодоксальному глубокому медленноволновому сну с генерализованными Δ -волнами, которые охватывают большую часть головного мозга.

Анализ полисомнографии в условиях высокогорья показал, что на высоте 2300 м сон еще имел сходство с развитием сна в привычных условиях. А на высоте более 4000 м сон развивался как монотонный тренд без закономерного чередования фаз. Как правило, сон начинался продолжительной дремотой (первая стадия сна) с доминированием частот β -, α -диапазона ЭЭГ, а затем наблюдалось постепенное ее замещение неглубоким медленноволновым сном с веретенообразной активностью в ЭЭГ (рис. 6). Сходные результаты уже описывались в 1975 г. авторами работы [6], которые указывали на снижение доли глубокого медленноволнового сна на высоте. В нашем случае углубление медленноволнового сна характеризовалось повышением индекса θ -колебаний и увеличением встречаемости Δ -волн. Необходимо отметить, что амплитуда всей медленночастотной активности была снижена, в частности, амплитуда θ -колебаний была сопоставима с амплитудой α -колебаний. То есть помимо отсутствия чередования фаз медленного и парадоксального сна развитие медленноволнового сна у всех обследованных в условиях высокогорья характеризовалось сниженной амплитудой основного ритма ЭЭГ,

существенной сегментацией сна и включением в медленный сон фрагментов колебаний θ - и α -диапазонов. Парадоксальный сон также был сегментирован и характеризовался большим количеством фрагментов колебаний θ -диапазона, общая его представленность была ниже (у ряда обследуемых до 30%) по сравнению со сном в обычных условиях.

Близкие результаты были получены при сопоставлении полисомнограмм ночного сна здоровых добровольцев в горах с результатами исследования сна в привычных условиях пациентов, страдающих нарушениями сна по типу обструктивного апноэ сна средней и тяжелой степени [14]. Структура сна и, как следствие, качество сна последних существенным образом страдают от множественных активаций центральной нервной системы, возникающих в качестве защитного механизма от глубоких случаев апноэ обструктивного генеза. Нередки случаи, когда индекс апноэ/гипноэ в среднем за ночь достигает 70–95 эпизодов в час, при сатурации 80–85%.

Анализ развития ночного сна после возвращения домой (седьмые сутки после спуска, в условиях постоянного проживания — 75 м над уровнем моря) показал, что также, как и во время сна до подъема в горы, структура сна вновь характеризуется чередованием его фаз. В медленноволновом глубоком сне у всех обследованных регистрировалась генерализованная Δ -активность, что отражалось в увеличении спектральной плотности коле-

баний Δ -диапазона. При развитии парадоксального сна фиксировалось снижение спектральной плотности основного ритма при увеличении колебаний θ -диапазона и высокочастотных составляющих. Наблюдалось также восстановление тенденции уменьшения амплитуды и представленности колебаний Δ -диапазона ЭЭГ от первого к третьему циклу ночного сна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокогорная экспедиция спортивного характера включает периоды акклиматизации и решения целевых задач, в нашем случае – покорение западной вершины г. Эльбрус (5642 м над уровнем моря, Центральный Кавказ). Стратегия акклиматизации и ее продолжительность определяются руководителем экспедиции, она необходима для повышения адаптационных возможностей человека в условиях дефицита кислорода во вдыхаемом воздухе, определяемом высотой над уровнем моря, при необходимости выполнять физическую работу, связанную с подъемом на значительную высоту, со спуском с нее и с переносом определенного количества груза.

Кроме того, ситуация осложняется метеорологическими условиями, высоким уровнем психического напряжения, значительным эмоциональным фоном положительного и отрицательного знака и т.д.

Было показано, что в течение 10–12 сут у большинства обследованных при наличии опыта высокогорных экспедиций субъективные ощущения тревожности и дискомфорта не исчезают в бодрствовании, а также негативно влияют на ночной сон, способствуя удлинению засыпаний и увеличению беспокоящих сновидений. На всех этапах экспедиции отмечается рост напряжения в регуляции физиологических функций, что проявляется, в частности, в изменении паттернов сердечных сокращений и дыхания, в эффектах локальной десинхронизации и депрессии суммарной биоэлектрической активности мозга в бодрствовании, нехарактерных для аналогичных состояний в привычных для обследуемых условиях. Кроме того, изменяется “рисунок” ритмических характеристик ЭЭГ ночного сна, включая нарушения формирования генерализованной Δ -волновой активности и формирование специфических паттернов, что позволяет говорить об эпизодах так называемого локального сна, который возникает на фоне множественной сегментации фаз сна. В ночном сне деформировано переключение фаз сна, что негативно сказывается на цикличности развития ночного сна, а расстройства дыхания во сне напоминают нарушение дыхания по типу Чейн-Стокса.

Указанное ухудшение ночного сна проявляется в снижении адаптации человека к высокогорью. Причина кроется в деформации параметров гомеостаза цикла сон–бодрствование [15], в частности: нарушение смены фаз и усиление фрагментации сна, низкая представленность медленноволнового сна, рост активаций и движений, что негативно влияет на эффективность сна, способствуя накоплению усталости и снижению качества бодрствования. Полученные эмпирические данные позволяют утверждать, что в период острой адаптации к высокогорью формирующееся гипоксическое состояние ухудшает ночной сон, негативно сказываясь на механизмах адаптации и компенсации. Сходные результаты были получены ранее в работах [7, 9, 10, 15]. Отсутствие столь ярко выраженных нарушений ночного сна и параметров кардиореспираторной системы, показанное в отношении лиц, участвующих в высокогорной экспедиции в Гималаях [16], позволяет говорить о значимости типологических свойств устойчивости к гипоксии, о высокой тренированности людей. В модельных исследованиях на животных было показано, что острая гипоксия, усугубляющаяся гипокапнией, формирующейся из-за гипервентиляции легких при гиперпноэ, ведет к значительным нарушениям в системе регуляции сна, проявляющимся в значительной редукции глубокого медленноволнового и парадоксального сна [17, 18].

Нами детализирован процесс сокращения в высокогорье глубокого медленноволнового сна, когда амплитуда Δ -волн снижается до уровня θ - и α -колебаний ЭЭГ, а представленность генерализованной Δ -активности резко снижена. Ночью преобладает преимущественно неглубокий медленноволновый сон, что нарушает выработку необходимых для бодрствования гормонов и метаболитов, ухудшая за счет некомпенсированной гипоксии и истощения функциональных резервов самочувствие и работоспособность организма [9]. Однако затянута картина засыпания и продолжительные фрагменты неглубокого медленноволнового сна могут прерываться кратковременными провалами в глубокий сон, что является результатом накопившегося высокого давления сна. Глубокий медленный сон при этом провоцирует резкую атонию и расстройства дыхания по типу обструктивного апноэ/гипопноэ сна. Указанные расстройства инициируют многочисленные активации мозга, что в свою очередь усиливает нарушение естественного чередования фаз сна и затрудняет восстановление в течение ночи баланса гормонов и метаболитов, необходимых в последующем бодрствовании для успешной адаптации человека к высокогорью.

Таким образом, основной причиной снижения электрогенеза неокортекса в условиях адаптации

к высокогорью и при покорении вершин, судя по параметрам ЭЭГ как ночного сна, так и бодрствования, по-видимому, является некомпенсированная поверхностная гипоксия внутренней среды организма и мозга в частности. Показано, что формируемые состояния в зависимости от индивидуальной устойчивости к гипоксии, врожденной или тренированной, могут сопровождаться или не сопровождаться феноменами нарушения дыхания по типу Чейн-Стокса. Тем не менее, именно гипоксия является основной причиной запуска механизмов гипоксии мозга, которая негативно влияет на синаптическую пластичность и поляризацию мембран нервных клеток [19]. Исследование ЭЭГ бодрствования при открывании–закрывании глаз выявляет наряду с ростом мощности α -ритма также нарастание низкоамплитудных высокочастотных гармоник ЭЭГ, что, как и в ранее описанном случае [6], обращает внимание на высокий уровень напряжения активирующих систем центральной нервной системы, нехарактерный для жизнедеятельности организма человека в обычных условиях. Тем не менее высокие нагрузки в высокогорье становятся возможными при включении сложных механизмов компенсации, проявляющихся в смене ритмичного характера деятельности кардиореспираторной системы с широкими амплитудно-частотными модуляциями: ригидной тахикардией со сглаженной дыхательной аритмией или выраженным неритмичным паттерном, связанным с нарушением дыхания по типу Чейн-Стокса. Важным признаком субэкстремального характера испытываемых нагрузок является типизация, снижение межиндивидуального разнообразия исследуемых параметров функционирования систем организма человека, в частности, частоты сердечных сокращений [20]. Высокий уровень напряжения регуляции физиологических функций, формируемый факторами высокогорного восхождения, сужает диапазоны изменения параметров внутренней среды организма, включая регуляцию сна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айдаралиев А.А., Максимов А.Л. Адаптация человека к экстремальным условиям. Л.: Наука, 1988. 286 с.
2. Бреслав И.С., Иванов А.С. Дыхание и работоспособность человека в горных условиях. Алма-Ата: Гылым, 1990. 256 с.
3. Бернштейн А.Д. Человек в условиях среднегорья. Алма-Ата: Казахстан, 1967. 244 с.
4. Шук Л.Л., Канаев Н.Н. Руководство по клинической физиологии дыхания. Л.: Наука, 1980. 324 с.
5. West J.B., Milledge J.S., Schoene R.B. The High Altitude Medicine and Physiology / 4th ed. Great Britain: CPI Bath, 2007. 499 p.
6. Reite M., Jackson D., Cahoon R.L. et al. Sleep physiology at high altitude // EEG and Clin. Neurophysiol. 1975. V. 38. P. 463.
7. Wickramasinghe H., Anholm J.D. Sleep and Breathing at High Altitude // Sleep and Breathing. 1999. V. 3. № 3. P. 89.
8. Rechtschaffen A., Kales A. A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stage of human subjects. Bethesda: Maryland, 1968. 364 p.
9. Zielinski J., Koziej M., Manrkowski M. et al. The quality of sleep and periodic breathing in healthy subjects at an altitude of 3200 metres: sleep at high altitude // High Alt. Med. Biol. 2000. № 1. P. 331.
10. Ильин Е.А., Поггенволь В.С. Характеристика сна в условиях различной естественной светопериодичности суток, сенсорной депривации и гипоксии // Информ. Бюлл. Сов. Антаркт. Экспедиции. 1969. Т. 74. С. 83.
11. Weil J.V., White D.P. Sleep in High Altitude // The High Altitude Medicine and Physiology / Third ed. Great Britain: CPI Bath, 2000. P. 707.
12. Хомская Е.Д. Мозг и активация. М.: Изд-во МГУ, 1972. 384 с.
13. Алифанов В.Н. Специальная функциональная диагностика. М.: МЗ СССР, Центр. ин-т усовершенствования врачей, 1970. 59 с.
14. Вербицкий Е.В., Помухин Д.В., Войнов В.Б. Обструктивное апноэ сна: диагностика и лечение с учетом личностной тревожности // Сон и тревожность / Под ред. Вербицкого Е.В. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. С. 320.
15. Salvaggio A., Insalaco G., Marrone O. Effects of high-altitude periodic breathing on sleep and arterial oxygen saturation // Eur. Respir. 1998. № 2. P. 408.
16. Johnson P.L., Edwards N., Burgess K.R., Sullivan C.E. Sleep architecture changes during a trek from 1400 to 5000 m in the Nepal Himalaya // J. Sleep Research. 2010. V. 19. P. 148.
17. Berssenbrugge A., Dempsey J., Iber C. et al. Mechanisms of hypoxia-induced periodic breathing during sleep in humans // J. Physiol. (London). 1983. V. 343. P. 507.
18. Basnyat B., Sleggs J., Spinger M. Seizures and delirium in a trekker: the consequences of excessive water drinking? // Wild. Environ. Med. 2000. V. 11. P. 69.
19. Daleau P., Morgardo D.C., Iriartem C.A. et al. New epilepsy seizure at high altitude without signs of acute mountain sickness or high altitude cerebral edema // High Alt. Med. Biol. 2006. V. 7. P. 81.
20. Литвиненко С.Н., Войнов В.Б., Двадненко К.В. и др. Групповые и индивидуальные стратегии адаптации человека к условиям высокогорного восхождения // Теория и практика экстремальных и прикладных видов спорта. 2010. № 3. С. 68.

The Study of the Somnological Aspects of the Human Acute Adaptation to the High-Altitude

V. V. Voynov, E. V. Verbitsky

E-mail: voinov@ssc-ras.ru

The primary reason of neocortex electrogenesis alteration in high-altitude adaptation at the altitude 3000–5600 m above sea level according to the EEG parameters of the night sleep and wakefulness is brain noncompensated superficial hypoxia. The situation becomes worse at the night by reason of apnoe/hypopnoe effects which occur because of muscular atony during slow sleep fall. The compensation these disorders at the expense of hypertensive and cardiorespiratory responses are identified by general mechanisms and individual strategy.

Keywords: sleep-wakefulness cycle, high-altitude, adaptation, cardiorespirator regulation, electrocardiogram, electroencephalogram.