

АВИАКОСМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

AVIAKOSMICHESKAYA I EKOLOGICHESKAYA MEDITSINA

НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC PERIODIC JOURNAL

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ушаков И.Б., д.м.н., профессор, академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ардашев В.Н., д.м.н., профессор
Баранов В.М., д.м.н., профессор, академик РАН
Буравкова Л.Б., д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН
Бухтияров И.В., д.м.н., профессор
Виноградова О.Л., д.м.н., профессор
Давыдов Б.И., д.м.н., профессор
Денисов С.Л., к.м.н. – заведующий издательством
Иванов И.В., д.м.н., профессор
Ильин Е.А., д.м.н., профессор – заместитель главного редактора
Котов О.В., к.м.н.
Меденков А.А., к.психол.н., д.м.н., профессор
Носков В.Б., д.м.н.
Орлов О.И., д.м.н., член-корреспондент РАН
Синяк Ю.Е., к.м.н., д.т.н., профессор
Усов В.М., д.м.н., профессор
Хоменко М.Н., д.м.н., профессор
Шипов А.А., д.б.н. – ответственный секретарь
Родионова Н.В., д.б.н., профессор (Украина)
Mukai Ch., M.D., Ph.D. (Japan)
Sutton J., M.D., Ph.D. (USA)
Suchet L.G., Ph.D. (France)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Григорьев А.И., д.м.н., профессор, академик РАН – **председатель**
Благинин А.А., д.м.н., д.психол.н., профессор
Гальченко В.Ф., д.б.н., профессор, член-корреспондент РАН
Жданько И.М., д.м.н.
Козловская И.Б., д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН
Котовская А.Р., д.м.н., профессор
Никольский Е.Е., д.м.н., профессор, академик РАН
Островский М.А., д.б.н., профессор, академик РАН
Розанов А.Ю., д.г.-м.н., профессор, академик РАН
Рубин А.Б., д.б.н., профессор, член-корреспондент РАН
Залуцкий И.В., д.б.н., профессор, член-корреспондент НАНБ (Беларусь)
Крышталь О.А., д.б.н., профессор, академик НАНУ (Украина)
Gerzer R., M.D., Ph.D., professor (Germany)
Gharib C., Ph.D., professor (France)
Yinghui Li, M.D., Ph.D., professor (China)

2014 Т. 48 № 5

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1967 ГОДУ

С 1967 по 1974 г. назывался «Космическая биология и медицина»,
с 1974 по 1991 г. – «Космическая биология и авиакосмическая медицина»

ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ ВЕДУЩИХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ
ВЫСШЕЙ АТТЕСТАЦИОННОЙ КОМИССИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт медико-биологических проблем
Российской академии наук»

**Журнал зарегистрирован в Государственном комитете РФ по печати 28.02.1995,
рег. № 01072, лицензия ИД № 05859 от 18.09.2001 г.**

© Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, 2014
© State Research Center RF – Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, 2014

Все права зарегистрированы. Никакая часть журнала не может быть воспроизведена
каким-либо способом без письменного разрешения Издателя
All rights reserved. Articles and information contained in this publication may not be reproduced
in any form or translated without the written of the Editorial Board

**Метаданные статей, опубликованных в журнале, доступны в базе данных РИНЦ
(www.elibrary.ru) и на сайте журнала journal.imbp.ru**

Выпускающий редактор О.Г. Сорокин
Редакторы: С.О. Николаев, С.М. Плаксина
Корректор М.Е. Козлова
Перевод Л.М. Смирновой
Компьютерная верстка Е.В. Рзаевой

Адрес: 123007, Москва, Хорошевское шоссе, д. 76а, метро «Полежаевская»,
Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем РАН
(редакция) тел.: 8 (499) 195-68-74, факс: 8 (499) 195-22-53, эл. почта: library@imbp.ru
(отв. секретарь) тел.: 8 (499) 195-20-93, эл. почта: shipov3838@mail.ru

Сдано в набор 25.09.2014.
Подписано в печать 26.10.2014.
Формат 60 × 84 1/8.
Гарнитура Таhoma.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,9.
Тираж 250 экз.
Заказ № 398.

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга».
Адрес: 394030, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 116.

Содержание

Contents

Обзоры

Reviews

Кабицкая О.Е., Оганов В.С., Гордиенко К.В., Бакулин А.В. Изменение структуры костной ткани в невесомости по материалам исследований на биоспутниках серии «Космос»

5

Kabitskaya O.E., Oganov V.S., Gordienko K.V., Bakulin A.V. Changes in bone structure according to the results of investigations on biosatellites of the «Bion» series

Экспериментальные и общетеоретические исследования

Experimental and Theoretical Investigations

Солдатов П.Э., Медникова О.А., Гурьева Т.С., Дадашева О.А., Смоленская Т.С., Орлова В.С. Сравнительная оценка воздействия гипоксических газовых смесей с различной концентрацией кислорода на эмбриогенез японского перепела

9

Soldatov P.E., Mednikova O.A., Gurieva T.S., Dadasheva O.A., Smolenskaya T.S., Orlova V.S. Comparative evaluation of the effects of hypoxic gaseous mixtures varying in oxygen concentration on Japanese quail embryogenesis

Мухамедиева Л.Н., Оганесян М.В., Татаркин С.В., Баранцева М.Ю., Шафиркин А.В. Морфологические изменения трахеи, бронхов и легких у мышей после длительного комбинированного радиационного и ингаляционного химического воздействий

13

Mukhamedieva L.N., Oganessian M.V., Tatarkin S.V., Barantseva M.Yu., Shafirkin A.V. Morphologic changes in mice trachea, bronchi and lungs after prolonged combined radiation and inhaled chemical exposure

Восканян К.Ш., Ворожцова С.В., Абросимова А.Н., Мицын Г.В., Гаевский В.Н., Молоканов А.Г. Снижение радиационного поражения мышей при остром и пролонгированном γ -облучениях с помощью лазерного устройства

21

Voskanyan K.Sh., Vorozhtsova S.V., Abrosimova A.N., Mitsyn G.V., Gaevskiy V.N., Molokanov A.G. Mitigation of mice radiation damage after acute and prolonged γ -irradiation by a laser device

Водолажская М.Г., Водолажский Г.И. Половые различия метеочувствительности здоровых взрослых людей, регистрируемые на реоэнцефалограмме и электроэнцефалограмме

27

Vodolazhskaya M.G., Vodolazhskiy G.I. Gender differences in weather sensitivity of normal adult people registered on the rheoencephalogram and electroencephalogram

Тихомирова Н.А., Ушакова С.А., Куденко Ю.А., Анищенко О.В., Тихомиров А.А. Использование ионообменного субстрата для оптимизации условий минерального питания растений в биолого-технической системе жизнеобеспечения с высокой степенью замкнутости

33

Tikhomirova N.A., Ushakova S.A., Kudenko Yu.A., Anishchenko O.V., Tikhomirov A.A. Use of the ion-exchange substrate to optimize mineral nutrition of plants within a bio-engineering life support system with a high level of closure

Подольский И.Г., Стругов О.М., Бингхем Г.Е. (Bingham G.E.) Эксплуатационные характеристики датчиков влагосодержания и водного потенциала корнеобитаемых сред для оранжерей в условиях длительных космических полетов

39

Podolskiy I.G., Strugov O.M., Bingham G.E. Performance characteristics of root zone moisture and water potential sensors for greenhouses in the conditions of extended space flight

Моисеев Ю.Б. Механизмы изменений позвоночника человека при воздействии статических и динамических продольных механических нагрузок

46

Moiseev Yu.B. Mechanisms of changes in the human spinal column in response to static and dynamic axial mechanic loading

Чумаченко Е.Н., Логашина И.В. Расчет напряженно-деформированного состояния двигательного сегмента позвоночника при нагрузках

51

Chumachenko E.N., Logashina I.V. Calculation of the strain-deformation condition of the spinal motor segment during loading

Клинические исследования

Clinical Investigations

Игошина Т.В., Котровская Т.И., Бубеев Ю.А., Счастливец Д.В., Потапов А.В. Применение ингаляции субнаркологических доз ксенона в санаторном лечении посттравматических стрессовых расстройств

58

Igoshina T.V., Kotrovskaya T.I., Bubeev Yu.A., Schastlivtseva D.V., Potapov A.V. Practicing subnarcotic xenon dose inhalation in spa treatment of posttraumatic stress-induced disorders

Краткие сообщения

Brief Communications

Лазарев А.О. Топографические особенности электродермальной активности человека

64

Lazarev A.O. Topographic characteristics of the human electrodermal activity

ОБЗОРЫ

УДК 612.085.4

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОСТНОЙ ТКАНИ В НЕВЕСОМОСТИ ПО МАТЕРИАЛАМ ИССЛЕДОВАНИЙ НА БИОСПУТНИКАХ СЕРИИ «КОСМОС»

Кабицкая О.Е., Оганов В.С., Гордиенко К.В., Бакулин А.В.

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

E-mail: kabitskaya@mail.ru

Неинвазивные методы исследования костной системы, которые в основном затрагивают узловые точки (зоны) скелета, недостаточны для того, чтобы «взглянуть» на внутреннее устройство кости *in situ*. Вместе с тем существуют данные, полученные инвазивными методами в экспериментах на биоспутниках. В предлагаемом обзоре проводится анализ и сопоставление результатов исследования изменений органического и минерального матриксов костной ткани в условиях невесомости. Предполагается, что данные изменения являются результатом формирования организмом системной реакции в костной ткани и скелете в целом.

Ключевые слова: невесомость, биоспутники, костная ткань.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 5–8.

Межклеточное вещество костной ткани составляет около 90 % ее массы, и его условно разделяют на органический и минеральный матриксы [1]. Необходимо подчеркнуть, что при отсутствии в нем клеток как таковых костный матрикс – это ткань, которая может длительное время выполнять как опорные, так и метаболические (локальные и организменные) функции. Таким образом, условия, необходимые для функционирования органических и минеральных структур матрикса, сохраняются в нем и при отсутствии сосудов и клеток [2].

На фоне высокой метаболической активности матрикса и медленно протекающих метаболических процессов его нарушения могут воспроизводиться [3].

Внутренние или внешние воздействия физической или гуморальной природы способны вызвать заметные изменения его структуры [4].

Невесомость можно отнести к достаточно сильным факторам внешнего воздействия на организм. Так, было обнаружено, что уже в первые 3 нед полета происходят изменения, свидетельствующие о разобщении коллагенового и минерального матриксов (связи «коллаген – кристалл»), когда удается установить достоверное снижение предела прочности плечевой и бедренной костей крыс при

отсутствии достоверных изменений их минеральной насыщенности, рассчитываемой как отношение массы минералов (зольного остатка) к объему образца кости (г/см^3) [5] (рис.). Было обнаружено также уменьшение несущей способности целой плечевой кости и тел поясничных позвонков без заметных изменений количества и состава минерального компонента [6].

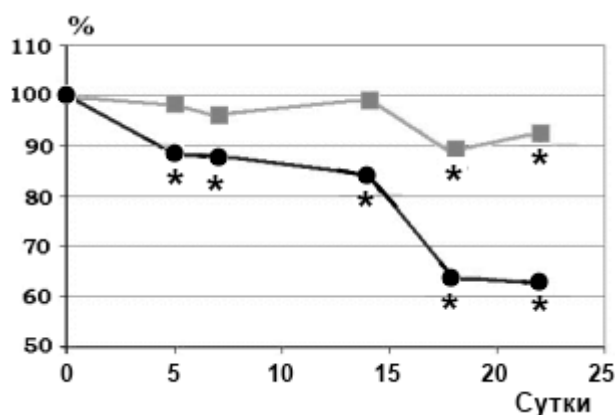


Рисунок. Изменения минеральной плотности (квадраты) и прочности (круги) в головке бедренной или плечевой костей крыс после полетов на биоспутниках «Космос-1514, -1667, -2044, -782 и -605» [5, 9, 10]

* – достоверные отличия от виварного контроля, $p < 0,05$

К аналогичному выводу приводят и данные модельных опытов с применением электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [7].

Большинство авторов полагают, что пусковым моментом деградации костной ткани является резкий переход от механического напряжения скелета к невесомости, что сопровождается существенной перестройкой метаболизма остеоцитарного (или околоosteоцитарного) матрикса с активацией большой группы нейросенсоров и нейромодуляторов [2].

Это положение хорошо согласуется с анализом, проведенным И.Б. Красновым [8], в котором показано, что проявление перилакунарной дегенерации, стимулируемой каскадом нейросенсоров и нейротрансмиттеров, сопровождается диссоциацией минералокомпозиционного матрикса остеоцитов. Подобные изменения могут приводить к дегенерации кости (остеопорозу) и даже к апоптозу остеоцитов.

Изменения в коллагеновом и минеральном матриксах начинаются в первые дни пребывания животных в невесомости и в первую очередь касаются лабильности тканевого кальция и его выхода из остеоцитарных лакун.

Анализ результатов исследований позволил выявить важную особенность: на протяжении первых 2 нед экспозиции в невесомости достоверное снижение прочности костей еще не сопровождается столь же значимыми изменениями их минеральной насыщенности [5, 9].

Такие же результаты были получены в наземных модельных экспериментах, что способствовало пониманию пусковых механизмов изменений костной ткани в невесомости. Как полагают Г.П. Ступаков и А.И. Воложин [10], при выходе на околоземную орбиту ступенчато теряется предварительно напряженное состояние костей, заданное земной гравитационной нагрузкой. При этом могут измениться физико-химические связи между органической и минеральной составляющими костной ткани, что приведет к снижению прочностных свойств костей.

Гипотеза подтверждается исследованиями физико-химических характеристик минералоорганического композита костей крыс в условиях 28-суточного вывешивания [7]. Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) выявлено достоверное снижение содержания свободных радикалов CO_2^- в бедренных костях крыс, что может указывать на ослабление связи коллагеновой матрицы с кристаллизованными минералами.

В целом в полетах продолжительностью до 2 нед, а также в наземных модельных экспериментах [5, 11] изменения механических свойств костной ткани в условиях невесомости имеют характерные особенности. Наблюдаются снижение предела прочности и предела пропорциональности напряжения, изменение модуля упругости. На более поздних сроках полета отмечены также снижение предела пропорциональности относительной деформации и снижение величины разрушающей деформации. Можно предположить, что наблюдаемое при относительно длительной адаптации к невесомости повышение хрупкости кости связано уже с изменением соотношения костных структур по степени их минерализации и, в частности, с накоплением избыточно минерализованных микроструктур [12].

В опытах на животных была выявлена высокая избирательность, или «зоноспецифичность»,

изменений. Изменения сильно различаются не только в зависимости от весовой нагруженности разных сегментов скелета, но и в пределах одной и той же кости. Это касается изменений и разных структур кости, и композиции минерального компонента и матрикса, и биомеханических свойств [10]. Впервые такой материал, полученный в опытах с животными в космосе, систематизировали Morey-Holton, Arnaud [13]. Но к этому времени накопилось достаточно данных (в основном в модельных экспериментах), свидетельствовавших о различии в реакциях разных зон и структур диафиза большеберцовой кости на изменения механической нагрузки [14].

Уже после недельного полета была выявлена активация резорбции в первичной спонгиозе только проксимального диафиза большеберцовой кости [15], а после 9-суточного полета («Спейслэб-1») — только во вторичной спонгиозе той же зоны [16]. После 2-недельного полета («Космос-1887») было установлено снижение содержания коллагенсвязывающих белково-углеродных комплексов (cross-link) в проксимальном диафизе бедра, но не в дистальном конце. Напротив, снижение содержания кальция, фосфора и остеокальцина было обнаружено только в дистальном диафизе бедренной кости [13].

В том же эксперименте, когда у крыс исследовали с помощью микрофотографии целые бедренные кости и химический состав их фрагментов, было показано, что, во-первых, обе методики дали принципиально сходные результаты и, во-вторых, выявили продольный градиент снижения минерализации в диафизах бедра у крыс полетной группы [17]. Эти результаты свидетельствуют, что заметная потеря минералов может происходить за время 12-суточного полета и что различные участки одной кости не в равной степени затрагиваются этим процессом. Кроме того, наличие нарушений минерализации было показано при исследовании градиента плотности [18].

В целом такая гетеротопность изменений после полета объясняется тем, что формирование трубчатых костей в условиях земного тяготения происходит за счет генетически детерминированного неравномерного ремоделирования в трабекулярных зонах эпифизов, благодаря чему и обеспечивается рост костей в длину. Формирование кортикальных структур костей в зонах периоста и эндоста также имеет разные скорости, и благодаря этому увеличиваются внешний диаметр и площадь поперечного сечения диафиза и соответственно возрастают механические свойства костей [19]. Таковы проявления функциональной адаптации костной ткани в процессе роста и увеличения массы и размеров тела в условиях земной силы тяжести.

В условиях космического полета («Космос-1887») были выявлены также изменения процесса трансформации остеопрогениторных клеток в

преостеобласты в верхнечелюстной периодонтальной связке, которые трактуются как быстрое восстановление остеобластического гистогенеза после его угнетения [20]. Здесь требуется пояснение. Дело в том, что ранее, после 3-недельного полета на биоспутнике «Космос-1129» (1979), в периодонтальной связке верхней челюсти крыс было обнаружено увеличение содержания клеток-предшественников (прекурсоров и коммитирующих остеопрогениторов с объемом ядер 40–80 мкм³) и достоверное снижение количества преостеобластов (с объемом ядер 80–120 мкм³) в пуле дифференцирующихся остеобластов [21]. Эти данные трактуются как торможение в условиях невесомости процесса дифференцировки остеобластов на стадии остеопрогениторные клетки — преостеобласты.

В рассматриваемом эксперименте («Космос-1887») в связи с тем, что некропсия биоматериала была проведена после 48–55 ч реадаптации животных в условиях 1 g, картина соотношения субпопуляций дифференцирующихся остеобластов была обратной: достоверно увеличено количество преостеобластов и снижено количество остеопрогениторных клеток по сравнению с синхронным контрольным экспериментом. Это обстоятельство и дало основание для подтверждения гипотезы Roberts W.E. et al. [21], заключающейся в том, что «возвращение» после невесомости механической нагрузки в течение 2 сут достаточно для стимуляции дифференциации остеобластов на указанной выше стадии [20].

Это предположение частично подтверждается результатами другого эксперимента аналогичной продолжительности («Космос-2044»), в котором забой животных проводили через 6–11 ч после приземления. Не было установлено изменений остеометрических показателей анатомии костей, биохимических параметров органического матрикса костной ткани и ее прочностных свойств [22]. Не было выявлено также заметных изменений в пуле остеогенетических клеток периодонтальной связки, обнаруженных в предыдущем эксперименте, что свидетельствовало о сохранности их остеогенетического потенциала в течение 2 нед полета [23]. Не удалось обнаружить также изменений ультраструктурной организации коллагена [24], аналогичных тем, которые наблюдались при полете биоспутника «Космос-1887», хотя в то же время были описаны признаки структурной дезорганизации коллагеновой фибриллярной сети в сухожилиях [25].

Выводы

Совокупность изложенного материала показывает, что невесомость оказывает действие на организм на уровне и вызывает системную реакцию в костной ткани и скелете в целом.

Список литературы

1. Buckwalter J.A., Glimcher M.J., Cooper R.R., Recker R. Bone biology (Part I. Structure, blood supply, cells, matrix, and mineralization) // J. Bone Jt. Surgery. 1995. V. 77-A. № 8. P. 1276–1289.
2. Корнилов Н.В., Аврунин А.С. Адаптационные процессы в органах скелета. СПб., 2001.
3. Корнилов Н.В., Аврунин А.С. Adaptational processes in bone tissue. St.-Petersburg, 2001.
4. Аврунин А.С., Корнилов Н.В., Суханов А.В. Позиционные регуляторы костной ткани — основа ауторегуляторного механизма развития и воспроизведения остеопороза // Морфология. 1998. № 4. С. 7–12.
5. Аврунин А.С., Корнилов Н.В., Суханов А.В. Positional regulators of bone are the basis of autoregulatory mechanism for the development and reproduction of osteoporosis // Morfologiya. 1998. № 4. P. 7–12.
6. Аврунин А.С., Корнилов Н.В., Смирнов А.М. Динамика процессов репаративной регенерации при диафизарных переломах длинных трубчатых костей (экспериментальное исследование) // Травматол. и ортопед. России. 1994. № 2. С. 111–121.
7. Аврунин А.С., Корнилов Н.В., Смирнов А.М. Dynamic of reparative regeneration in diaphyseal fractures of the long bones (experimental research) // Travmatologiya i ortopediya Rossii. 1994. № 2. P. 111–121.
8. Бакулин А.В., Оганов В.С., Фельдеш И. Исследование функциональной адаптации кости при отсутствии механической нагрузки // Биоспутники «Космос»: Междунар. симп. (Ленинград, 12–15 августа 1991 г.). М., 1991. С. 14–15.
9. Бакулин А.В., Оганов В.С., Фельдеш И. Investigation of functional adaptation of bone in the absence of mechanical stress // Biosatellites «Cosmos»: International Symposium (Leningrad, 12–15 August 1991). Moscow, 1991. P. 14–15.
10. Вайлас А.С., Зернике Р.Ф., Гринделанд Р.Е. et al. Spaceflight effects on rat cortical bone geometry, biomechanics and biochemistry // FASEB J. 1990. V. 4. № 1. P. 47–54.
11. Оганов В.С., Брик А.Б., Щербина О.И. и др. Влияние дефицита опорной нагрузки на взаимосвязь «коллаген — кристалл» в костной ткани крыс по данным ЭПР // XII конф. по косм. биологии и авиакосм. медицине: Матер. конф. М., 2002. С. 255–256.
12. Оганов В.С., Брик А.Б., Щербина О.И. et al. Bearing deficit influence on the relationship «collagen — crystal» in the bone tissue of rats according to the EPR // XII Conference of Space Biology and Aerospace Medicine: Proceedings. Moscow, 2002. P. 255–256.
13. Краснов И.Б. Нейромедиаторы и нейротрансмиттеры в ремоделировании костной ткани // Авиакосм. и экол. мед. 2012. Т. 46. № 2. С. 3–8.
14. Краснов И.Б. Neuromediators and neurotransmitters in the bone tissue remodeling // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2012. V. 46. № 2. P. 3–8.

9. Bakulin A.V., Ilyin E.A., Oganov V.S., Lebedev V.I. The state of bones of pregnant rats during an acute state of adaptation to weightlessness // Proc. of the 2nd Intern. conf. on space physiology (Toulouse, France, 20–22 Nov. 1985). Paris, 1985. P. 225–228.

10. Ступаков Г.П., Воложин А.И. Костная система и невесомость // Проблемы космической биологии. Т. 63. М., 1989.

Stupakov G.P., Volozhin A.I. Skeletal system and weightlessness // Problemy kosmicheskoy biologii. V. 63. Moscow, 1989.

11. Оганов В.С., Бакулин А.В., Ильин Е.А. и др. Структура и механические свойства костной ткани // Онтогенез млекопитающих в невесомости. М., 1988. С. 56–60.

Oganov V.S., Bakulin A.V., Ilyin E.A. et al. The structure and mechanical properties of bone tissue // Ontogenez mlekopitayushchikh v nevesomosti. Moscow, 1988. P. 56–60.

12. Eurell J.A., Kazarian L.E. Quantitative histochemistry of rat lumbar vertebrae following space flight // Am. J. Physiol. 1983. V. 244. P. 315–318.

13. Morey-Holton E.R., Arnaud S.B. Skeletal responses to weightlessness: Advances in space biology and medicine / S.L. Bonting, ed. JAI Press Inc. 1991. V. 1. P. 37–69.

14. Li J., Jee W.S.S. Adaptation of diaphyseal structure to aging and decreased mechanical loading in the adult rat: A densitometric and histomorphometric study // Anat. Res. 1991. V. 229. P. 291–297.

15. Капланский А.С., Дурнова Г.Н., Сахарова З.Ф. и др. Гистоморфометрический анализ костей крыс, находившихся на борту биоспутника «Космос-1667» // Авиакосм. и экол. мед. 1987. Т. 21. № 2. С. 5–31.

Kaplansky A.S., Durnova G.N., Sakharov Z.F. et al. Histomorphometric analysis bones of rats aboard biosatellite «Cosmos-1667» // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 1987. V. 21. № 2. P. 5–31.

16. Дурнова Г.Н., Ильина-Какуева Е.И., Морей-Холтон Э., Капланский А.С. Гистоморфометрический анализ костей крыс после 9-суточного полета на борту космической лаборатории «Спейслэб-1» // Там же. 1994. Т. 28. № 1. С. 18–21.

Durnova G.N., Ilyina-Kakueva E.I., Morey-Holton E., Kaplansky A.S. Histomorphometric analysis of rats bones after 9-day flight on board the space lab «Spacelab-1» // Ibid. 1994. V. 28. № 1. P. 18–21.

17. Mechanic G.L., Arnaud S.B., Boyde A. et al. Regional distribution of mineral and matrix in the femurs of rats flown on Cosmos-1887 biosatellite // FASEB J. 1990. V. 4. № 1. P. 3–40.

18. Simmons D.J., Russel J.E., Grynbas M.D., Rosenberg G.D. Bone maturation and quality of bone mineral in rats flown in the Space Shuttle «Spacelab-3 Mission» // Bone and Mineral. 1986. V. 1. P. 485–493.

19. Frost H.M. Vital biomechanics: proposed general concepts for skeletal adaptations to mechanical usage // Calcif. Tissue Int. 1988. V. 442. P. 145–156.

20. Garetto L.P., Gonsalves M.R., Morey E.R. et al. Preosteoblast production 55 hours after a 12.5 day spaceflight

(Cosmos-1887) // FASEB J. 1990. V. 4. № 1. P. 24–28.

21. Roberts W.E., Mozsary P.G., Morey E.R. Suppression of osteoblast differentiation during weightlessness // Physiologist. 1981. V. 24 (Suppl.). P. S75–S76.

22. Vailas A.C., Vanderby R.J.R., Martinez D.A. et al. Adaptation of young and adult rat cortical bone to 14 days of spaceflight // J. Appl. Physiol. 1992. V. 73. № 2 (Suppl.). P. 4S–9S.

23. Garetto L.P., Morey E.R., Durnova G.N. et al. Preosteoblast production in Cosmos-2044 rats: Short term recovery of osteogenetic potential // Ibid. P. 14S–18S.

24. Montufar-Solis D., Duke P.J., Durnova G.N. Space flight and age affect tibial epiphyseal growth-plate histomorphometry // Ibid. P. 19S–25S.

25. Doty S.B., Morey-Holton E.R., Durnova G.N., Kaplansky A.S. Morphological studies of bone and tendon // Ibid. P. 10S–13S.

Поступила 24.06.2014

CHANGES IN BONE STRUCTURE ACCORDING TO THE RESULTS OF INVESTIGATIONS ON BIOSATELLITES OF THE «BION» SERIES

Kabitskaya O.E., Oganov V.S., Gordienko K.V.,
Bakulin A.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia).
2014. V. 48. № 5. P. 5–8

Noninvasive technologies of bone investigations measure largely the main skeletal sites and are not quite suitable to have a look at the bone internal organization in situ. However, there are data obtained noninvasively in experiments on board the space biosatellites. The review is dedicated to analysis and comparison of the evidence for the bone organic and mineral matrix restructuring due to microgravity. These changes have presumably evolved in the course of the system reaction of bone tissue and the whole skeleton.

Key words: microgravity, biosatellites, bone tissue.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 591.392:612.273.3+639.122(520)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИПОКСИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ КИСЛОРОДА НА ЭМБРИОГЕНЕЗ ЯПОНСКОГО ПЕРЕПЕЛА

Солдатов П.Э.¹, Медникова О.А.^{1,2}, Гурьева Т.С.¹, Дадашева О.А.¹, Смоленская Т.С.¹, Орлова В.С.²

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

²Российский университет дружбы народов, Москва
E-mail: soldatov@imbp.ru

Представлены сравнительные характеристики воздействия низких концентраций кислорода ($10 \pm 0,5$ и $14,5 \pm 0,5$ %) на развивающийся организм. В качестве объекта исследования были выбраны 4-суточные эмбрионы японского перепела (*Coturnix coturnix japonica*), развитие которых на этой стадии характеризуется периодом формирования органов и систем. Полученные результаты показали, что острая гипоксия ($10 \pm 0,5$ % кислорода) вызывает 100 %-ную гибель эмбрионов на 4-е сутки развития и приводит к серьезным аномалиям развития глаз, мозга и эктопии. Эмбрионы японского перепела, развившиеся в среде с пониженной концентрацией кислорода ($14,5 \pm 0,5$ %), не имели таких многочисленных морфологических аномалий, но скорость их развития значительно отставала от нормы.

Причины подобных аномалий при острой гипоксии связываются с нарушениями развития внезародышевых оболочек, особенно амниона, десинхронизации морфогенетических процессов и движения пластов тканей самого эмбриона.

Ключевые слова: гипоксия, газовый состав, эмбриогенез, японский перепел.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 9–12.

Эмбриональное развитие птиц представляет большой интерес для экспериментальной биологии как удобный тест-объект при изучении влияния различных измененных факторов среды. Это связано с тем, что эмбрионы птиц, развивающиеся вне организма матери, весьма чувствительны ко всяким изменениям во внешней среде.

Для нормального развития зародыша птицы необходимо наличие достаточного количества кислорода. На начальных этапах эмбриогенеза выводковых птиц, в первые 2-е суток развитие зародыша может происходить в бескислородной среде. В этот период зародыш дышит кислородом желтка, но затем данный тип дыхания переходит на более высокий уровень и требует присутствия кислорода

в атмосфере инкубирования. Благодаря большому количеству пор в скорлупе, сетчатой микроструктуре подскорлупных мембран, особенно расположению бластодиска, который находится на минимальном расстоянии от стенки яйца, а также наличию воздушной камеры, зародыш начинает дышать атмосферным воздухом [1]. Еще в 30-х годах XX в. А.Л. Романов доказал наличие прямого и косвенного влияния состава воздуха в инкубаторе на развитие эмбриона курицы. Изменение концентрации основных газов в составе воздуха влияло на рост, выводимость и проявление патологий развития эмбриона. При пониженной концентрации кислорода в воздухе инкубатора наблюдалось замедление роста эмбриона [2]. Снижение концентрации кислорода в газовой смеси до 5 % в первые 48 ч вызывало гибель куриных эмбрионов, а при ее увеличении до 10–15 % продолжительность их развития увеличивалась до 72 ч [3]. Исследования воздействия измененных факторов газовой среды на эмбриогенез птиц в литературе встречаются часто, и все они основываются на физиологических особенностях развивающегося организма птиц. Онтогенез птиц состоит из небольшого числа морфологических этапов, в течение которых закладка того или иного органа становится особенно чувствительной к нарушениям во внешней и внутренней среде. В эмбриогенезе японского перепела имеется 4 критических периода, которые приходятся на 4, 7, 10 и 15–16-е сутки развития и которые отличаются не только анатомическими и морфометрическими данными, но и особыми формами обмена [1]. Для оценки влияния исследуемых газовых смесей были выбраны 4-е сутки развития, которые характеризуются периодом формирования органов и систем.

Целью данной работы является сравнительная экспериментальная оценка воздействия газовых смесей с пониженным содержанием кислорода ($10 \pm 0,5$ и $14,5 \pm 0,5$ %) на эмбриогенез японского перепела (*Coturnix coturnix japonica*).

Параметры газовой среды при инкубировании перепелиных яиц

Группа	Параметры газовой среды			
	Кислород, %	Азот, %	Отн. влажность, в инкубаторе, %	t инкубации, °C
Подопытная группа 1	10 ± 0,5	90	54–64	37,5 ± 0,5
Подопытная группа 2	14,5 ± 0,5	86,2–85	54–64	37,5 ± 0,5
Лабораторный контроль	Воздух		54–64	37,5 ± 0,5

Методика

Объектом исследований являлись 4-суточные эмбрионы японского перепела, полученные в результате инкубирования яиц в различных гипоксических дыхательных смесях с различной концентрацией кислорода. Яйца, собранные в течение 3–4 сут от одного поголовья птиц, отобранные по форме, окрасу и размеру, предварительно овоскопированные на предмет наличия механических повреждений, были разделены на 3 группы: подопытная группа 1 (O_2 10 ± 0,5 %), подопытная группа 2 (O_2 14,5 ± 0,5 %) и лабораторный контроль (ЛК) с использованием атмосферного воздуха в нормоксических условиях. В табл. приведены режим и состав исследуемых газовых смесей и режим инкубации яиц.

Эксперименты по изучению особенностей эмбрионального развития японского перепела в ранний период эмбриогенеза проводили на специально сконструированном лабораторном стенде (рис. 1). Основой стенда является герметичная камера объемом 120 л, оборудованная герморубками и шлюзами, что позволяет проводить манипуляции внутри камеры без ее разгерметизации. В камере имеется вентилятор для постоянного перемешивания газовой смеси. Отличительной особенностью стенда является возможность формирования и поддержания заданного состава газовой дыхательной смеси. Контроль содержания газов внутри камеры осуществлялся на газовом хроматографе. Для проведения инкубирования перепелиных яиц внутри камеры устанавливали инкубатор с автономной системой поддержания температурно-влажностного режима (температура +37,5 ± 0,5 °C и влажность от 54 до 64 %). Для оценки воздействия гипоксической газовой среды с различной концентрацией кислорода на живой организм было проведено по 1 эксперименту. Длительность каждого эксперимента ограничивалась 4 сут. Количество заложенных в инкубатор яиц для каждого эксперимента составляло 24.

По окончании эксперимента яйца вынимали из инкубатора, взвешивали и проводили обработку по

следующей схеме: осторожно вскрывалась скорлупа яйца в области тупого конца, а содержимое яйца переносили в чашку Петри. Визуальный осмотр содержимого яйца и самого эмбриона перепела проводили с помощью увеличительной лампы. При изучении содержимого яйца определяли состояние желтка, белковых оболочек, сосудистого поля и стадию развития эмбрионов. Затем эмбрион осторожно освобождали от оболочек и проводили морфометрические исследования [4].



Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда для кратковременных исследований на животных в газовой среде произвольного состава

Результаты и обсуждение

Известно, что эмбриональное развитие – это сложный процесс, включающий 2 взаимосвязанные характеристики: рост и дифференциация. За счет роста происходит увеличение массы тела зародыша путем увеличения в размерах и размножения клеток, а дифференциация, как качественная основа процесса развития, отвечает за специализацию клеток и тканей. При нормальном развитии для 4-суточных эмбрионов японского перепела характерна прогрессивная дифференцировка всех структур: сосудистое

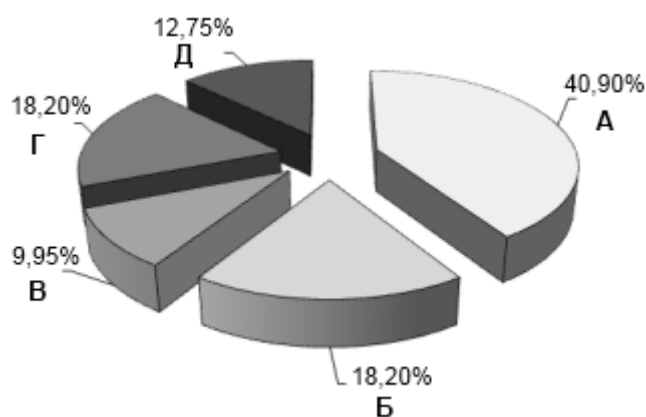


Рис. 2. Аномалии развития эмбрионов японского перепела при концентрации кислорода $10 \pm 0,5$ %:

А – аномалии в развитии глаз; Б – эктопия; В – другие аномалии; Г – аномалии в развитии мозга; Д – погибли на 1-е сутки развития

поле занимает 2/3 стенки желточного мешка, амнион полностью закрывает тело зародыша, у эмбриона хорошо видны головной, шейный и туловищные изгибы, глаза отчетливо пигментированы, хотя пигмент еще имеет серый оттенок. Питание и дыхание эмбриона осуществляются через сосудистую систему желточного мешка [5].

Анализ результатов экспериментов показал, что инкубирование яиц японского перепела в газовой среде с концентрацией O_2 10 % (подопытная группа 1) привело к 100 % гибели зародышей тогда, как в подопытной группе 2, где концентрация O_2 была в пределах $14,5 \pm 0,5$ %, были живыми 80 % эмбрионов. Однако исследование полученного эмбриологического материала выявило существенные отклонения морфологического развития эмбрионов, которые развивались в измененной газовой среде. Так, количество эмбрионов с аномалиями в развитии в 1-й подопытной группе составило 72,7 % от всех оплодотворенных яиц, а у 2-й группы – 41,7 %. Причем у эмбрионов из 1-й группы количество случаев этих аномалий превышает количество подопытных эмбрионов (у 16 эмбрионов 22 случая). Повреждения зародышей не носят случайный характер, и обусловлены они тем, что повреждающий фактор вызывает определенные уродства и затрагивает практически все системы, поэтому они имеют сочетанный характер. Наиболее чувствительными ко всем неблагоприятным условиям внешней среды, в том числе и к гипоксии, являются глаза [6]. В данном эксперименте нарушения в развитии глаз для 1-й группы составляют 40,9 % (анофтальмия, микрофтальмия) от общего числа аномалий. Среди других морфологических нарушений выявлены эктопия (незарращение) грудной или

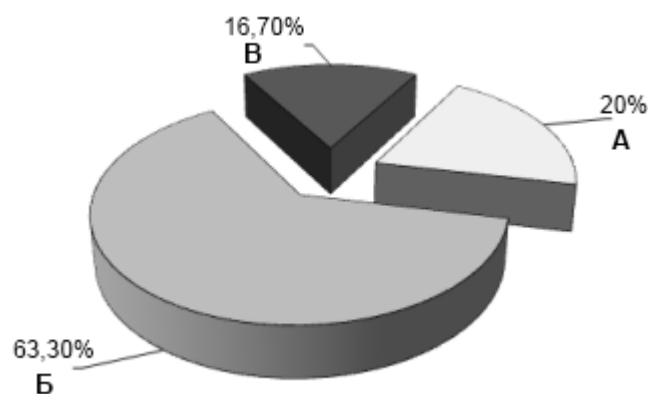


Рис. 3. Аномалии развития эмбрионов японского перепела при концентрации кислорода $14,5 \pm 0,5$ %:

А – погибли к 4-м суткам; Б – соответствует 2–3-м суткам развития; В – соответствует 3,5 суткам развития

брюшной полости (18,2 %) и нарушения развития мозга (18,2 %). Остальные аномалии затрагивали нервную систему (микроцефалия, отсутствие эпифизарного выроста), строение клюва (аномалии челюстного отростка) и недоразвитие хвостовой части тела зародыша (рис. 2).

Результаты воздействия газовой среды с концентрацией O_2 $14,5 \pm 0,5$ % на эмбриональное развитие перепела приведены на рис. 3. Анализ экспериментального материала показал, что 80 % эмбрионов были живыми, причем 63,3 % зародышей по анатомическим и морфологическим показателям соответствовали только 2–3-м суткам развития, и остальные 16,7 % достигли 3,5 сут. Оставшиеся 20 % зародышей погибли в 1-е сутки развития, дальнейшее исследование которых было затруднено из-за наличия лизиса. Замедление в развитии затрагивало строение тела (поворот не завершен, брюшная стенка не закрыта), выражалось в отсутствии пигментации глаз, а также в степени развития внезародышевых оболочек (диаметр сосудистого поля был меньше, чем в норме). Анализ экспериментального материала также показал, что из 24 исследованных эмбрионов, развившихся в подопытной группе 2, у 14 (58,3 %) зародышей отмечены аномалии в строении тела. Наблюдался S-образный изгиб тела, когда хвостовая пластинка обращена в противоположную от головы сторону. Такие патологии тела у зародыша могут приводить в дальнейшем к аномалиям в развитии конечностей, а именно к нарушению дифференцировки сегментов крыла и ног или к проявлению несоответствия календарному возрасту по морфогенезу.

Выводы

Таким образом, полученные результаты показали, что газовая среда с концентрацией кислорода 10 % вызывает гибель эмбрионов и серьезные нарушения организма в раннем развитии. Эмбрионы японского перепела, развившиеся в среде, где содержание кислорода составляло $14,5 \pm 0,5$ %, не имели таких многочисленных морфологических аномалий, но скорость их развития значительно отставала от нормы.

Причины подобных аномалий следует искать в нарушении развития внезародышевых оболочек, особенно амниона, десинхронизации морфогенетических процессов и движения пластов тканей самого эмбриона. Действительно, при исследовании подопытных эмбрионов были отмечены нарушения в развитии амниона: амниотическая оболочка эмбрионов не закрывала каудальную часть, давая только до почек нижних конечностей.

Список литературы

1. Рольник В.В. Биология эмбрионального развития птиц. Л., 1968.
Rolnik V.V. Biology of embryonic development of birds. Leningrad, 1968.
2. Romanoff A.L. Morphological study of differentiation of sex in chicks // *Poultry Sci.* 1933. V. 12. № 2. P. 305.
3. Wesselkin N.W. Über den Einfluss des Sauerstoffmangels auf das Wachstum und die Entwicklung von Hühnerembryonen // *Zentralbl. D. Allgem. Pathol. Anat.* 1943. № 24. P. 874.
4. Солдатов П.Э., Гурьева Т.С., Дадашева О.А. и др. Влияние гипоксических газовых смесей на эмбриогенез японского перепела // *Авиакосм. и экол. мед.* 2007. Т. 41. № 1. С. 24–28.
Soldatov P.E., Gurieva T.S., Dadasheva O.A. et al. Impact of hypoxic gas mixtures on embryogenesis of the Japanese quail // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2007. V. 41. № 1. P. 24–28.
5. Отрыганьев Г.К., Отраганьева А.Ф. Технология инкубации. М., 1989.
Otryganiev G.K., Otraganieva A.F. Incubation technology. Moscow, 1989.
6. Строева О.Г. Морфогенез и врожденные аномалии глаза млекопитающих. М., 1971.
Stroeva O.G. Animal eye's morphogenesis and congenital anomalies. Moscow, 1971.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECTS OF HYPOXIC GASEOUS MIXTURES VARYING IN OXYGEN CONCENTRATION ON JAPANESE QUAIL EMBRYOGENESIS

Soldatov P.E., Mednikova O.A., Gurieva T.S., Dadasheva O.A., Smolenskaya T.S., Orlova V.S.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 10–12

*The paper presents the results of comparative characterization of the effects of low oxygen levels (10 ± 0.5 and 14.5 ± 0.5 %) on developing organism. Four-day old embryos of the Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*) were chosen for the object of investigation as this is the age when avians acquire their organs and systems. Acute hypoxia (10 ± 0.5 % oxygen) caused a general death of the embryos, and serious abnormalities of the eye and brain, and ectopy. Embryos that developed in the low-oxygen atmosphere (14.5 ± 0.5 %) did not exhibit many of these morphological abnormalities and yet their growth was retarded apparently.*

Such abnormalities in acute hypoxia are ascribed to disturbance in development of extra-embryonic membranes, amnion in particular; desynchronization of morphogenetic processes and movement of embryo's tissue layers.

Key words: hypoxia, gaseous composition, embryogenesis, Japanese quail.

Поступила 27.02.2014

УДК 613.693.+001.891:599.3234.+591.423/591.424.+52-731+615.835.5.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТРАХЕИ, БРОНХОВ И ЛЕГКИХ У МЫШЕЙ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО РАДИАЦИОННОГО И ИНГАЛЯЦИОННОГО ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ

Мухамедиева Л.Н.¹, Оганесян М.В.², Татаркин С.В.¹, Баранцева М.Ю.¹, Шафиркин А.В.¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

²Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова
E-mail: moukhamedieva@imbp.ru

Проведены морфологические и морфометрические исследования органов дыхания (трахея, бронхи, легкие) и иммуногенеза у животных (мыши) после комбинированного последовательного воздействия фракционированного внешнего γ -облучения в суммарной дозе 350 сГр и смеси химических веществ: ацетона, этанола и ацетальдегида в концентрациях ПДК_{ПКА} моделирующих прогнозируемые условия среды обитания в пилотируемых космических аппаратах при осуществлении межпланетных экспедиций. Морфологические изменения в органах дыхания животных после полетов свидетельствовали об активации иммуногенеза и развитии «структурного следа» в виде хронического воспалительного процесса с увеличением фиброзной соединительной ткани в стенках трахеи, бронхов и в легких, а также объемной доли желез и сосудов на фоне уменьшения рыхлой волокнистой соединительной ткани. Развитие фиброзной соединительной ткани наблюдалось в большей степени в респираторных отделах органов дыхания животных, свидетельствуя о повышении риска неблагоприятных отдаленных последствий.

Ключевые слова: морфология, межпланетный полет, фиброз, хроническое воспаление.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 13–20.

Верхние дыхательные пути и легкие человека при сочетанном воздействии химических агентов окружающей среды и ионизирующих излучений являются одними из наиболее чувствительных и критических органов [1–4]. Известно, что респираторная система относится к первичным защитным барьерам организма. Она непосредственно реагирует на ингаляционное действие химических веществ, обеспечивая инактивацию вредных веществ и детоксикацию организма [5]. Кроме того, лимфоидные образования легких и дыхательных путей играют немаловажную роль в формировании иммунного ответа организма на воздействие факторов среды. При воздействии низких доз радиации запускаются 2 основных механизма: первый – повреждение тканей-мишеней, развитие окислительного стресса,

второй – запуск общих компенсаторных процессов и механизмов восстановления, приводящих к формированию типовых реакций интегративных систем [6]. Однако предвидеть ответ биологической системы на комбинированное воздействие, основываясь на эффектах изолированного действия факторов, затруднительно вследствие возможного формирования нелинейного отклика (от антагонизма до синергизма), который определяется уровнем сохранности адаптационных возможностей организма [7, 8].

Представленные ранее изменения в системе кроветворения и биохимическом статусе эритроцитов у мышей при длительном фракционированном γ -облучении в суммарной дозе 350 сГр и последующем ингаляционном воздействии химических веществ: ацетона, этанола и ацетальдегида в концентрациях на уровне ПДК_{ПКА} [7, 8] свидетельствовали о наличии активной адаптации, сопровождаемой значительным напряжением регуляторных систем организма при раздельном действии радиационного и химического факторов. При сочетанном последовательном действии факторов продемонстрировано более выраженное напряжение регуляторных механизмов и наличие синергического эффекта. Отмечали факты более сильного снижения концентрации кардиоцитов, ретикулоцитов и особенно числа лейкоцитов в периферической крови, что обусловило более значительное компенсаторное увеличение продукции клеток костного мозга для восстановления показателей кроветворения. Напряженный характер адаптационных процессов наблюдался и в отношении поддержания биохимического статуса эритроцитов как по показателям энергообразования, так и показателям антиоксидантной активности: содержанию Г-6-ФДГ и восстановленного глутатиона.

Известно, что при воздействии ионизирующих излучений в процессе длительных межпланетных полетов имеет место целый ряд необратимых изменений, свидетельствующих о снижении суммарного объема функциональных резервов, что определяет увеличение риска смертности в течение жизни

космонавтов и возможное снижение продолжительности их жизни [9, 10].

Как показано в работах [11, 12], длительное напряжение регуляторных процессов при хроническом стрессорном воздействии ионизирующих излучений, электромагнитных полей, химическом загрязнении воздушного бассейна, при длительном социальном стрессе и особенно при комплексном действии факторов среды и социальных факторов с неизбежностью приводит к снижению суммарного объема функциональных резервов организма, к снижению скорости уменьшения возникающих нарушений, увеличению риска заболеваемости и смертности в отдаленный период. В проведенном эксперименте [7, 8] также обнаружено снижение скорости восстановления рассматриваемых показателей. Восстановление не было завершено в течение 90 сут после окончания действия факторов. Биологическое последствие факторов характеризовалось также сохранением активности свободно-радикальных процессов в эритроцитах, инициацией мембраноповреждающего эффекта и морфологическими изменениями в селезенке, свидетельствующими о «неполной регенерации» органа к 90-м суткам восстановительного периода. Это может отчасти свидетельствовать о снижении резервов организма и об увеличении риска отдаленных неблагоприятных последствий для здоровья космонавтов.

Руководствуясь задачей сохранения здоровья и работоспособности космонавтов после завершения их карьеры, для обоснования допустимых предельных доз воздействия ионизирующих излучений для космонавтов и предельных значений $\text{ПДК}_{\text{ПКА}}$ внутри пилотируемых космических аппаратов важно оценить возможные неблагоприятные отдаленные последствия. Необходимость решения гигиенических проблем нормирования факторов среды с учетом прогнозирования отдаленных последствий, и разработки профилактических мероприятий для сохранения здоровья экипажа при осуществлении межпланетных полетов, предопределила актуальность проведения также углубленных морфологических и морфометрических исследований органов дыхания при комбинированном воздействии внешнего γ -облучения и ингаляционного химического воздействия.

Целью данной работы являлось исследование морфологических и морфометрических изменений органов дыхания мышей для прогнозирования отдаленных последствий комбинированного воздействия радиационного и химического факторов, моделирующих условия среды обитания при реализации пилотируемых межпланетных экспедиций.

Методика

Морфологические исследования органов дыхания в восстановительный период проводили у 48

половозрелых мышей F1(CBA*С57BL6) массой 20–23 г. Животные содержались на стандартном пищевом рационе с учетом норм и правил биомедицинской этики. Периоду восстановления предшествовали эксперименты, моделирующие комбинированное воздействие внешнего (10-кратного еженедельного) фракционированного γ -облучения в течение 63 сут в суммарной дозе 350 сГр ($\text{Дэф} = 70 \text{ сГр}$) и ингаляционное воздействие смеси химических веществ: ацетона, этанола и ацетальдегида в концентрациях на уровне $\text{ПДК}_{\text{ПКА}}$ в течение 70 сут.

С учетом коэффициента экстраполяции радиочувствительности мышей суммарная эффективная доза γ -облучения 350 сГр соответствовала дозе для человека около 120 сГр. Доза согласуется с расчетным уровнем суммарных среднетканевых эквивалентных доз для космонавтов при осуществлении межпланетного полета на Марс [8, 10, 11]. Эксперименты проводили на стендовых базах ГНЦ РФ – ИМБП РАН с использованием γ -облучателя биологических объектов «ГОВО-60» с источником излучения ^{137}Cs и испытательного стенда для санитарно-химических и токсикологических исследований УМБИ-1, оснащенного автономными системами жизнеобеспечения и динамической системой поддержания заданных концентраций ацетона, ацетальдегида и этанола на уровне $\text{ПДК}_{\text{ПКА}}$ в пределах 0,67–1,4; 0,86–1,75; 3,78–9,91 мг/м³ соответственно. В восстановительный период эвтаназию животных экспериментальных и контрольных групп проводили одновременно методом декапитации. Группа контроля содержалась в условиях стандартного вивария.

Морфологические исследования трахеи, бронхов, легких проводили в динамике на 27-е и 90-е сутки восстановительного периода. Трахею, бронхи и легкие фиксировали в растворе иммунофикс (Bio-Optica), затем осуществляли проводку по спиртам возрастающей концентрации и заливали в парафин. Для изучения микрофотографии, морфологических изменений эпителия, желез и лимфоидных образований в стенках трахеи, бронхов и в легких срезы толщиной 5–7 мкм окрашивали гематоксилином и эозином.

Морфометрическую оценку структурных компонентов трахеи, бронхов и легких проводили методом точечного счета. Полученную выборку проверяли на нормальность распределения по критерию Колмогорова – Смирнова, после чего были применены методы параметрической (t-критерий Стьюдента) статистики.

Результаты и обсуждение

У мышей контрольных групп трахея и главные бронхи были высланы многорядным призматическим эпителием с тонкой базальной мембраной. В

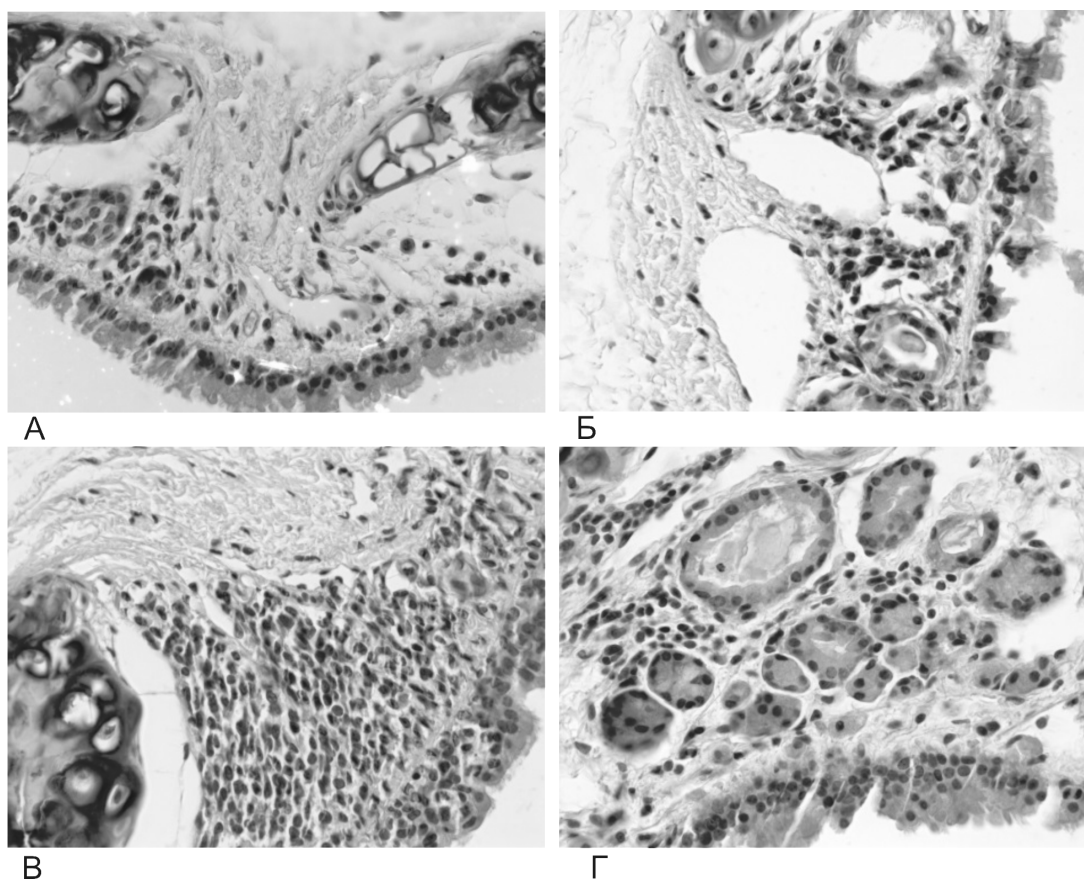


Рис. 1. Стенка трахеи мышей

Здесь и на рис. 2: А – контрольная группа, восстановительный период после радиационно-химического воздействия; Б – 27-е сутки; В, Г – 90-е сутки. Окраска гематоксилином и эозином. Ув. 160

собственной пластинке слизистой оболочки и в подслизистой основе выявлялась рыхлая волокнистая соединительная ткань с единичными диффузно рассеянными лимфоцитами и макрофагами (рис. 1, А). Железы трахеи и их ацинусы, единичные в препаратах, располагались между пластинами гиалинового хряща. Выводные протоки слизистых желез были выстланы кубическим однорядным эпителием, вокруг них выявлялись скопления лимфоидных элементов.

По данным морфологического исследования респираторных отделов органов дыхания животных после прекращения хронического радиационно-химического воздействия как на 27-е, так и 90-е сутки восстановительного периода в органах дыхания наблюдали активацию иммуногенеза на фоне признаков хронического воспалительного процесса. Эпителий слизистой оболочки трахеи и главных бронхов был кубический, базальная мембрана под эпителием очагово утолщенной. В собственной пластинке слизистой оболочки выявляли небольшие очаги фиброза, рассеянные диффузно, а также в виде очаговых скоплений лимфоцитов, гистиоцитов и плазмочитов. В хрящевых пластинках трахеи

и главных бронхов отмечали очаговую базофилию межтерриториального матрикса, в части лакун хондроциты отсутствовали. Эпителий ацинусов желез, расположенных в собственной пластинке слизистой оболочки, был представлен преимущественно серозными клетками, в выводных протоках которых выявляли эозинофильные массы слизи и единичные нейтрофилы. Вокруг желез определяли очаговые скопления лимфоцитов (рис. 1, Б, В). Увеличение количества желез трахеи и бронхов и секрета в них можно объяснить раздражающим действием химической смеси на парасимпатическую систему бронхиального дерева [13].

Активация иммунной системы организма проявлялась на 27-е сутки восстановительного периода в виде увеличения ($p < 0,001$) объемной доли лимфоидной ткани в стенке трахеи во внелегочных отделах главных бронхов и увеличения доли иммунокомпетентных клеток (лимфоциты, макрофаги, плазмочиты) по сравнению с контрольной группой. Развитие хронического воспалительного процесса характеризовалось достоверным увеличением объемной доли желез (в 4,8 раза), фиброзной ткани вокруг хрящей, сосудов, желез (в 1,5 раза), количества сосудов в

Таблица 1

Морфометрические показатели структурных компонентов трахеи, бронхов и легких мышей-самцов контрольной и подопытной групп на 27-е сутки восстановительного периода после радиационно-химического воздействия, об. %

Органы	Структурные компоненты, Р/р	Контрольная группа	Подопытная группа	Стат. значимость, р
Трахея, бронхи	Эпителий	12,63 ± 0,47	13,1 ± 0,5	отсутствует
	Рыхлая волокнистая соединительная ткань	10,25 ± 0,49	8,5 ± 0,39	0,005
	Хрящи	10,41 ± 0,5	9,4 ± 0,56	отсутствует
	Сосуды	1,25 ± 0,15	1,6 ± 0,15	0,163
	Железы	1,1 ± 0,21	5,3 ± 0,45	0,001
	Фиброзная соединительная ткань	7,71 ± 0,54	11,8 ± 0,49	0,002
	Иммунокомпетентные клетки	4,2 ± 0,48	12,5 ± 0,56	0,001
Легкие	Лимфоидные узелки в легких	5,0 ± 0,42	14,4 ± 0,75	0,001

Таблица 2

Морфометрические показатели структурных компонентов трахеи, бронхов и легких мышей-самцов контрольной и подопытной групп на 90-е сутки восстановительного периода после радиационно-химического воздействия, об. %

Органы	Структурные компоненты, Р/р	Контрольная группа	Подопытная группа	Стат. значимость, р
Трахея, бронхи	Эпителий	11,7 ± 0,39	14,3 ± 0,52	0,0001
	Рыхлая волокнистая соединительная ткань	13,8 ± 0,45	8,1 ± 0,47	0,0001
	Хрящи	12,6 ± 0,61	11,2 ± 0,93	0,233
	Сосуды	1,4 ± 0,18	2,7 ± 0,29	0,0006
	Железы	1,0 ± 0,14	8,7 ± 0,29	0,0004
	Фиброзная соединительная ткань	6,9 ± 0,45	18,6 ± 0,72	0,0001
	Иммунокомпетентные клетки	2,5 ± 0,18	15,8 ± 2,07	0,0003
Легкие	Лимфоидные узелки в легких	2,2 ± 0,26	16,1 ± 1,03	0,0001

стенке трахеи и бронхов (в 1,3 раза) на фоне уменьшения доли рыхлой волокнистой соединительной ткани, а также активацией иммунной системы с увеличением доли иммунокомпетентных клеток по сравнению с контрольной группой (табл. 1).

К 90-м суткам восстановительного периода морфологические изменения в дыхательных путях (трахее и бронхах) характеризовались усилением признаков хронического воспалительного процесса, что выражалось увеличением фиброзной ткани ($p < 0,001$) и желез ($p < 0,001$) в стенках трахеи и бронхов по сравнению с морфологической картиной, наблюдаемой на 27-е сутки восстановительного периода. Строма стенок трахеи и бронхов была представлена в большей степени фиброзной соединительной тканью (увеличение в 2,8 раза по сравнению с контрольной группой) на фоне более выраженного уменьшения рыхлой волокнистой

соединительной ткани. Очаги фиброза выявляли и в межхрящевых промежутках, вокруг желез, их выводных протоков, вокруг сосудов. Количество желез по сравнению с контрольной группой увеличилось статистически значимо в 8,7 раза, объемной доли лимфоидной ткани в стенке трахеи и во внелегочных отделах главных бронхов увеличивалась в 6,3 раза по сравнению с контрольной группой. Увеличение количества желез (см. табл. 2) к 90-м суткам восстановительного периода после прекращения воздействия рассматриваемых факторов ($p < 0,001$) сочеталось с увеличением количества лимфоидной ткани ($p < 0,001$).

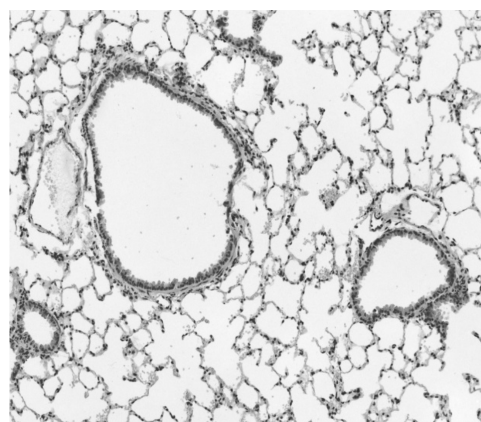
На 90-е сутки восстановительного периода объемная доля иммунокомпетентных клеток в собственной пластинке слизистой оболочки увеличилась в 1,3 раза по сравнению с 27-ми сутками

восстановления, а с контрольной группой – в 6,3 раза. Прогрессирование морфологических изменений в дыхательных путях (трахее и бронхах) животных в восстановительный период проявлялось развитием хронического воспалительного процесса (увеличение объемной доли сосудов и лимфоидной ткани в стенке трахеи и во внелегочных отделах главных бронхов), с увеличением фиброзной соединительной ткани в стенках трахеи и бронхов на фоне активации иммунной системы ($p < 0,001$).

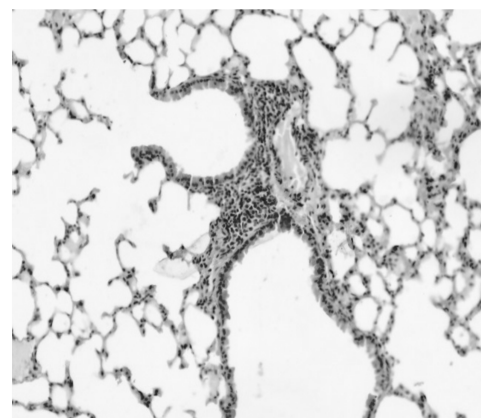
При морфологическом исследовании легких у мышей контрольной и подопытной групп респираторный отдел легких был равномерно воздушный, альвеолы с тонкими межальвеолярными перегородками. Эпителий главных и долевых бронхов однорядный кубический. Вокруг отдельных легочных вен выявляли небольшие скопления (1–2-го ряда) лимфоидных элементов. В стенках бронхов 2–3-го порядка деления и в респираторных бронхиолах выявляли диффузно рассеянные лимфоидные элементы. Вокруг легочных вен определяли лимфоидные скопления из 1–5-го рядов лимфоцитов (рис. 2, А).

По данным морфометрического исследования в легких экспериментальных животных по мере увеличения длительности восстановительного периода наблюдалось увеличение активности иммунной системы организма в ответ на развитие хронического воспалительного процесса с достоверным увеличением объемной доли лимфоидной ткани ($p < 0,001$) по сравнению с контрольной группой. Морфологическая перестройка в легких после длительного ингаляционного воздействия химических веществ в концентрациях на уровне $\text{ПДК}_{\text{ТКА}}$ на фоне пострadiационных репаративных процессов в органе характеризовалась признаками хронического воспаления, важными составляющими компонентами которого являлись увеличение объемной доли лимфоидной ткани, повреждение эпителиальной выстилки, разрастание фиброзной соединительной ткани.

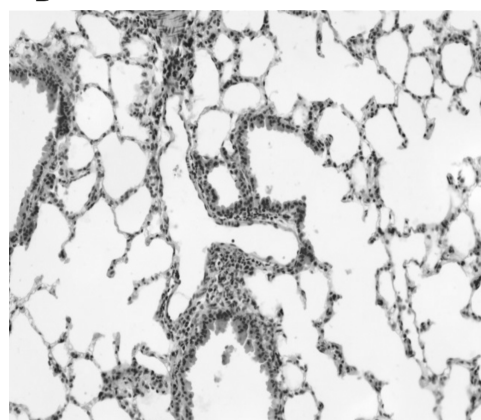
По-видимому, длительное химическое ингаляционное воздействие парами ацетона, этанола и ацетальдегида на уровне $\text{ПДК}_{\text{ТКА}}$ на фоне пострadiационных репаративных процессов, повреждая эпителиальную выстилку, вызывает высвобождение потенциальных маркеров воспаления. Дыхательный эпителий, являясь «интерфейсом» между внешней и внутренней средой, служит первой мишенью для вдыхаемых веществ, секретируя большое количество медиаторов, которые сигнализируют клеткам иммунной системы и подлежащим тканям [14]. Воспалительные реакции вызывают миграцию иммунокомпетентных клеток, экспрессирующих цитокины, хемокины, которые активируют фибробласты: макрофаг-воспалительный протеин-1 α , -1 β , фактор некроза опухоли- α , фибронектин, интерлейкин-1, трансформирующий фактор роста β – и вызывают развитие



А



Б



В

Рис. 2. Легкие мышей

фиброза [4, 15]. К фиброзу и воспалению приводит дисрегуляция баланса продукции хемокинов, цитокинов и факторов роста.

Увеличение плотности лимфоидной ткани и разрастание фиброзной соединительной ткани в стенках трахеи, бронхов и в легких в отдаленные сроки (90-е сутки) восстановительного периода после прекращения радиационно-химического воздействия может быть связано с циклическими «волнами» экспрессии провоспалительных цитокинов в облученной ткани. Эти «волны» появляются

в момент повреждения и приводят к ремоделированию стенки воздухопроводящих органов с развитием фиброза. Так называемый вечный каскад цитокинов был выдвинут в качестве гипотезы как решающий фактор в прогрессировании развития в ткани легких структурных изменений [16]. Выброс цитокинов с развитием воспаления в легких наблюдали авторы работы [3] при исследовании поздних эффектов радиации у мышей C57BL/6J после облучения в дозах 0,5–10 Гр на протяжении 6–18 мес.

Экспериментальное подтверждение наличия воспалительных процессов в легких после однократных и фракционированных облучений описано в работах [17, 18]. Так, утолщение межальвеолярных перегородок и развитие пострадиационной пневмонии у мышей C57BL/6J наблюдали через 8 нед после воздействия радиации в дозе 2 Гр. Высокая экспрессия провоспалительных цитокинов TNF-альфа, интерлейкина (IL) -1 α/β , интерферона наблюдалась в легких после воздействия радиации в дозе 1 Гр у мышей C57BL/6J и C3H/HeN [17]. При этом показано, что пусковым фактором, который оказывает фиброгенное действие при воздействии радиации, является трансформирующий фактор роста β , который высвобождают эпителиальные клетки в трахее, бронхах и легких [18].

Образование лимфоидных инфильтратов, пролиферативные изменения альвеолярного эпителия и интерстициальный фиброз в легких (мыши, крысы, хомяки) после хронического вдыхания аэрозольных частиц ультрадисперсного диоксида титана на уровне ПДК (0,5; 2 и 10 мг/м³) при воздействии по 6 ч в день в течение 13 нед экспериментально подтверждены в работе [19]. Признаки хронического воспалительного процесса со склерозированием стенок бронхов и последующим прогрессированием процесса при удлинении экспозиции до 90 сут описаны при ингаляционном воздействии диоксида азота (в эксперименте на 120 крысах-самцах) уже на 60-е сутки воздействия [20]. Инфильтративная реакция в легких с развитием фиброзной соединительной ткани наблюдалась после воздействия в течение 4 нед аэрозолями текстильных красок на крыс (10 мг/кг массы тела) по 6 ч 5 дней в неделю [4]. Основываясь на полученных в работе [21] результатах морфологических исследований респираторных отделов легких (5 тыс. биоптатов более чем 1,5 тыс. пациентов) после ингаляционного воздействия промышленных аэрозолей (кварцосодержащего, каменноугольного, сварочного и т.д.), также можно отметить развитие в легких хронического воспаления, которое можно охарактеризовать как диффузный пневмонит, за которым следует период продуктивно-склеротических изменений.

Таким образом, экспериментально показано, что длительное комбинированное воздействие

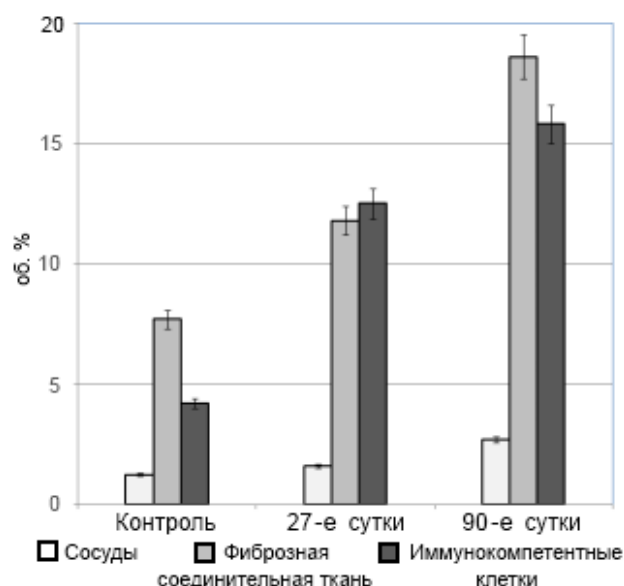


Рис. 3. Динамика развития показателей хронического воспаления в органах дыхания

внешнего γ -облучения в суммарной дозе 350 сГр и последующее (на фоне пострadiационных репаративных процессов) ингаляционное воздействие смеси химических веществ в концентрациях на уровне ПДК_{ПКАГ} вызывает морфологические и морфометрические изменения в органах дыхания животных (рис. 3), свидетельствующие о развитии хронического воспаления, составляющими компонентами которого являются увеличение объемной доли лимфоидной ткани, сосудов, желез, с преимущественным повреждением респираторных отделов. Активация иммунной системы к 90-м суткам восстановительного периода также свидетельствует о развитии активной адаптации с напряжением компенсаторных резервов организма [5, 7, 8]. Наблюдаемое, по мере увеличения длительности восстановительного периода, прогрессирующее ($p < 0,001$) разрастание фиброзной соединительной ткани на фоне уменьшения рыхлой волокнистой соединительной ткани ($p < 0,001$) свидетельствует о формировании необратимых повреждений и повышении риска неблагоприятных отдаленных последствий.

Выводы

1. Морфологические и морфометрические исследования органов дыхания у животных (трахея, бронхи, легкие) после хронического ингаляционного воздействия смеси химических веществ на фоне пострadiационных репаративных процессов (фракционированного внешнего γ -облучения в суммарной эффективной дозе 350 сГр), показали развитие структурных изменений в стенках

трахеи и внелегочных отделах главных бронхов. Наблюдала разрастание фиброзной соединительной ткани и увеличение объемной доли желез на фоне выраженного уменьшения рыхлой волокнистой соединительной ткани. Очаги фиброза выявляли и в межхрящевых промежутках, вокруг желез, их выводных протоков и сосудов. Развитие соединительной ткани наблюдали в большей степени в респираторных отделах органов дыхания животных, которое прогрессировало к 90-м суткам восстановительного периода.

2. Морфологические изменения в трахее и внелегочных отделах главных бронхов животных сопровождались активацией иммунных структур по мере увеличения длительности восстановительного периода и характеризовались увеличением объемной доли лимфоидной ткани и иммунокомпетентных клеток (лимфоциты, макрофаги, плазмоциты) в собственной пластинке слизистой оболочки.

3. Прогрессирующее к 90-м суткам восстановительного периода увеличение объемной доли сосудов, желез, фиброзной ткани, в хрящевых пластинках трахеи и главных бронхах и очаговая базофилия межтерриториального матрикса на фоне уменьшения рыхлой волокнистой соединительной ткани и активации иммунной системы, могут быть расценены как признаки развития в органах дыхания животных хронического воспалительного процесса. По-видимому, длительное химическое ингаляционное воздействие смеси химических веществ на фоне пострadiационных репаративных процессов, повреждая эпителиальную выстилку, вызывает высвобождение потенциальных маркеров воспаления.

4. Наличие признаков хронического воспалительного процесса в стенках трахеи и бронхов, сопровождающееся активацией иммуногенеза в восстановительный период, свидетельствует о снижении устойчивости организма к возможным дополнительным повреждающим факторам и повышении риска неблагоприятных отдаленных последствий.

Работа выполнена в рамках темы РАН 01201053691.

Список литературы

1. Саноцкий И.В., Фоменко В.Н. Отдаленные последствия влияния химических соединений на организм. М., 1979.

Sanotskiy I.V., Fomenko V.N. Long-term effects of exposure to chemicals on the body. Moscow, 1979.

2. Жербин Е.А., Новоселова Г.С., Комар В.Е. Комбинированное действие излучения и химических факторов. 1982.

Zherbin E.A., Novoselova G.S., Komar V.E. Combined effects of radiation and chemical factors. 1982.

3. Johnston C.J., Manning C., Hernady E. Effect of total body irradiation on late lung effects: hidden dangers // Int. J. Radiat. Biol. 2011. V. 87. № 8. P. 902–913.

4. Toshinori Y. Pulmonary fibrosis in response to environmental cues and molecular targets involved in its pathogenesis // J. Toxicol. Pathol. 2011. V. 24. № 1. P. 9–24.

5. Сапин М.Р., Никитюк Д.Б. Иммунная система, стресс и иммунодефицит. М., 2000.

Sapin M.R., Nikityuk D.B. The immune system, stress and immunodeficiency. Moscow, 2000.

6. Ушаков И.Б., Сорокин О.Г. Механизмы работы организма как целостной системы // Технологии живых систем. 2010. № 5. С. 14–22.

Ushakov I.B., Sorokin O.G. Mechanisms of the body as an integrated system // Tekhnologii zhivyykh sistem. 2010. № 5. P. 14–22.

7. Баранцева М.Ю., Татаркин С.В., Мухамедиева Л.Н. и др. Изменения в системе кроветворения и энергообмене эритроцитов при длительном воздействии на мышей химических веществ (ацетона, этанола, ацетальдегида) и радиации в дозах и концентрациях, моделирующих условия длительных орбитальных полетов // Авиакосм. и экол. мед. 2012. Т. 46. № 2. С. 21–28.

Barantseva M.Yu., Tatarkin S.V., Mukhamedieva L.N. et al. Shifts in the mice blood-forming system and energy exchange of erythrocytes due to chronic exposure to chemical agents (acetone, ethanol, acetaldehyde) and radiation in concentrations and doses modeling the conditions in extended orbital missions // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2012. V. 46. № 2. P. 21–28.

8. Татаркин С.В. Гемопоз и метаболический статус эритроцитов мышей при длительном комбинированном воздействии ионизирующей радиации и химических веществ, моделирующих условия межпланетных полетов: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 2013.

Tatarkin S.V. Hematopoiesis and metabolic status of erythrocytes of mice under long-term combined exposure to ionizing radiation and chemicals that simulate the conditions of interplanetary flight: Avtoreferat dissertatsii ... kandidata biologicheskikh nauk. Moscow, 2013.

9. Григорьев Ю.Г., Попов В.И., Шафиркин А.В., Антипенко Ж.Б. Соматические эффекты хронического гамма-облучения. М., 1986.

Grigoriev Yu.G., Popov V.I., Shafirkin A.V., Antipenko Zh.B. Systemic effects of chronic gamma irradiation. Moscow, 1986.

10. Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г. Межпланетные и орбитальные полеты. Радиационный риск для космонавтов (Радиобиологическое обоснование). М., 2009.

Shafirkin A.V., Grigoriev Yu.G. Interplanetary and orbital space flights. The radiation risk to astronauts. (Radiobiological basis). Moscow, 2009.

11. Шафиркин А.В., Штемберг А.С., Есауленко И.Э., Попов В.И. Экология, социальный стресс, здоровье населения и демографические проблемы России. Воронеж, 2009.

Shafirkin A.V., Shtemberg A.S., Esaulenko I.E., Popov V.I. Ecology, social stress, health and demographic problems of Russia. Voronezh, 2009.

12. Ушаков И.Б. Экология человека опасных профессий. М. – Воронеж, 2000.

Ushakov I.B. Human ecology of hazardous occupations. M. – Voronezh, 2000.

13. Бабанов С.А., Аверина О.М. Диагностика, лечение и профилактика профессиональных заболеваний легких // Рус. мед. журн. 2012. Т. 20. № 6. С. 306–312.

Babanov S.A., Averina O.M. Diagnosis, treatment and prevention of occupational lung diseases // Russkiy meditsinskiy zhurnal. 2012. V. 20. № 6. P. 306–312.

14. Knight D.A., Holgate S.T. The airway epithelium: structural and functional properties in health and disease // Respirol. 2003. № 8. P. 432–446.

15. Strieter R.M., Gomperts B.N., Keane M.P. The role of CXC chemokins in pulmonary fibrosis // J. Clin. Invest. 2007. V. 111. P. 549–556.

16. Rubin P., Johnston C.J., Williams J.P., McDonald S. et al. A perpetual cascade of cytokines post-irradiation lead to pulmonary fibrosis // Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys. 1995. V. 33. P. 99.

17. Hong J.H., Chiang C.S., Tsao C.Y. et al. Rapid induction of cytokine gene expression in the lung after single and fractionated doses of radiation // Int. J. Radiat. Biol. 1999. V. 75. P. 1421–1427.

18. Eunhee S.Yi., Bedoya A. et al. Radiation-induced lung injury in vivo: Expression of transforming growth factor β precedes fibrosis // Inflammation. 1996. V. 20. № 4. P. 339–352.

19. Bermudez E. Pulmonary responses of mice, rats and hamsters to subchronic inhalation of ultrafine titanium dioxide particles // Toxicol. Sci. 2004. V. 77. № 2. P. 347–357.

20. Moyron-Quiroz J.E., Rangel-Moreno J., Kusser K. et al. Role of inducible bronchus associated lymphoid tissue (iBALT) in respiratory immunity // Nat. Med. 2004. V. 10. P. 927–934.

21. Лощилов Ю.А. Патологическая анатомия пневмокониоза // Пульмонология. 2007. № 2. С. 117–119.

Loshchilov Yu.A. Pathological anatomy of pneumoconiosis // Pulmonologiya. 2007. № 2. P. 117–119.

MORPHOLOGIC CHANGES IN MICE TRACHEA, BRONCHI AND LUNGS AFTER PROLONGED COMBINED RADIATION AND INHALED CHEMICAL EXPOSURE

Mukhamedieva L.N., Oganesyanyan M.V., Tatarkin S.V., Barantseva M.Yu., Shafirkin A.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 13–20

Investigations of morphology and morphometry of the breathing organs (trachea, bronchi and lungs) and immunogenesis of mice subject to a combined sequential exposure to fractionated external γ -irradiation by the total dose of 350 cGy and a mix of acetone, ethanol and acetaldehyde in MPCs for piloted spacecrafts simulating the estimated levels in crewed exploration missions were conducted. Morphologic changes in the breathing organs of animals after space missions point to immunogenesis activation and appearance of a «structural trace» as a chronic inflammation with the growth of fibrous connective tissue in tracheal, bronchial and lung walls, increase in volume fractions of glands and vessels and reduction in loose fibrous connective tissue. Formation of the fibrous connective tissue was particularly noticeable in respiratory parts of the breathing organs suggesting a high risk of long-term adverse effects.

Key words: morphology, space exploration mission, fibrosis, chronic inflammation.

Поступила 28.03.2014

УДК 57 042

СНИЖЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ МЫШЕЙ ПРИ ОСТРОМ И ПРОЛОНГИРОВАННОМ γ -ОБЛУЧЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО УСТРОЙСТВА

Восканян К.Ш.^{1, 2}, Ворожцова С.В.², Абросимова А.Н.², Мицын Г.В.¹, Гаевский В.Н.¹, Молоканов А.Г.¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

²Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

E-mail: voskan@jinr.ru

Исследовали действие γ -лучей ^{60}Co в дозе 7 Гр (острое и пролонгированное облучения), а также комбинированного действия лазерного излучения с длиной волны 650 нм и γ -лучей на выживаемость, параметры периферической крови, количество кариоцитов и митотический индекс клеток костного мозга молодых мышей линии C57BL/6.

После острого облучения (мощность дозы 1,14 Гр/мин) мышей только γ -лучами в течение 5 дней погибли все животные, а в случае комбинированного облучения мыши погибли в течение 11 дней. При пролонгированном облучении (мощность дозы 0,027 Гр/мин) 30 %-ная выживаемость мышей наблюдалась на 19-е сутки после облучения γ -лучами и на 38-е сутки после комбинированного облучения. Параметры периферической крови при остром и пролонгированном облучениях существенно не отличались, однако через 24 ч после острого облучения γ -лучами у мышей наблюдалась гиперхромемия. Подсчет числа митозов на 1000 ядродержащих костно-мозговых клеток через 72 ч после облучения показал, что костный мозг мышей, подвергшихся острому облучению γ -лучами, практически опустошен. Показано, что радиационная защита мышей с помощью лазерного излучения возможна при воздействии ионизирующего излучения в широком интервале доз и способна снизить неблагоприятные последствия как острого, так и пролонгированного радиационного воздействий.

Ключевые слова: радиационная защита, острое и пролонгированное облучения, лазерное излучение.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 21–26.

Поиск радиозащитных средств, эффективных при разных ситуациях радиационного поражения биологических объектов, все еще является одной из актуальных задач радиационной и космической биологии и медицины.

С позиций вероятных сценариев избыточного воздействия ионизирующей радиации на человека наиболее актуальными представляются поиск средств экстренного применения для лечения

острых радиационных поражений, а также профилактических средств, снижающих неблагоприятные последствия пролонгированного радиационного воздействия с низкой мощностью дозы [1]. Кроме этого, особое внимание следует уделять разработке защищающих от радиации агентов, которые имеют низкую токсичность, практичный режим управления, длительный срок хранения и широкое окно защиты [2].

Проведенные ранее эксперименты по действию лазерного излучения с длиной волны 650 нм и комбинированного облучения мышей линии C57BL/6 лазерным излучением и γ -лучами ^{60}Co (3 Гр) показали, что лазерное излучение красной спектральной области можно использовать для улучшения восстановления кроветворения после воздействия ионизирующего излучения [3]. Проводили также эксперименты по изучению действия γ -лучей ^{60}Co (5 Гр) и комбинированного действия лазерного излучения и γ -лучей на выживаемость, массу тела, кожный покров и митотический индекс клеток костного мозга мышей. Оказалось, что лазерное облучение способствует повышению выживаемости мышей, предотвращает повреждения кожного покрова, улучшает восстановление кроветворения после воздействия ионизирующего излучения и повышает митотическую активность клеток костного мозга [4]. В рассмотренных экспериментах были использованы дозы ионизирующего излучения, приводящие к костномозговой клинической форме острой лучевой болезни (ОЛБ). В связи с этим необходимо проверить радиозащитное воздействие лазерного излучения на мышей при дозах, приводящих к другой клинической форме ОЛБ [5]. Кроме этого, важно исследовать возможность использования лазерного излучения в качестве средства снижающего неблагоприятные последствия пролонгированного радиационного воздействия. С этой целью были проведены эксперименты по воздействию острого и пролонгированного γ -излучения в дозе 7 Гр (переходная форма ОЛБ), а также

комбинированному воздействию γ -лучами и лазерным излучением на мышей C57BL/6.

Методика

Опыты были проведены на молодых мышах-самцах линии C57BL/6 массой 12–17 г в соответствии с биоэтическими правилами проведения исследований на животных [6].

Животные получали стандартный брикетированный корм и питьевую воду из поилок. Перед забоем мышей взвешивали, затем забивали методом цервикальной дислокации. Из хвоста животных брали кровь для подсчета количества лейкоцитов периферической крови, а также для определения содержания гемоглобина в крови. Для анализа количества кариоцитов очищенную от мышц бедренную кость животного помещали в химический стаканчик емкостью 50 мл и измельчали в 6 мл 3 %-ного раствора уксусной кислоты.

Для определения митотического индекса из очищенной бедренной кости с помощью шприца извлекали костный мозг, который суспензировали в гипотоническом растворе цитрата натрия с последующим приготовлением мазков на предметных стеклах. Мазок костного мозга фиксировали в абсолютном метиловом спирте, а затем окрашивали по методу Романовского – Гимзы [7].

Содержание гемоглобина в крови определяли с помощью гемоглобинометра Мини-Гем 540 («ТЕХНОМЕДИКА» НПП, ЗАО, Россия). Количество лейкоцитов крови и кариоцитов подсчитывали с помощью камеры Горяева по общепринятой методике [7].

Облучение. Облучение мышей проводили в медико-техническом комплексе Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований [8].

Для облучения мышей γ -лучами использовали γ -терапевтический аппарат «Рокус-М» фирмы «Равенство» с источником ^{60}Co . Измерения мощности дозы γ -источника проводили дозиметром RTW UNIDOS-E (фирмы RTW-Freiburg, Германия) с ионизационной камерой ТМ30013-03378 при полностью открытом коллиматоре (размеры коллиматора 26 x 22 см). Облучение мышей проводили в 2 точках: точка 1 – на расстоянии 750 мм от источника (изоцентр), точка 2 – на расстоянии 1870 мм от источника. Для уменьшения мощности дозы на пути пучка был установлен дополнительный фильтр из свинца толщиной 30 мм, который понижал мощность дозы пучка γ -излучения в 6,95 раза. При остром облучении клетка с мышами устанавливалась в точке 1 (мощность дозы – 1,14 Гр/мин, время облучения при дозе 7 Гр – 6,14 мин), для пролонгированного облучения клетку устанавливали в точке 2 (мощность дозы – 0,027 Гр/мин, время облучения при дозе 7 Гр – 259,2 мин).

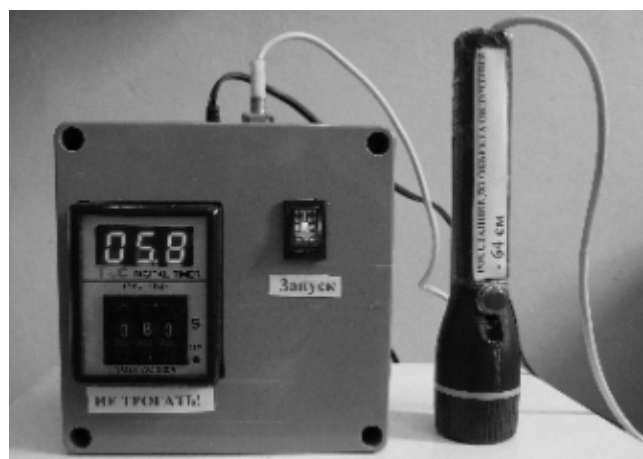


Рис. 1. Лазерное устройство для радиационной защиты биологических объектов в эксперименте

В качестве источника лазерного излучения использовали созданное нами устройство для радиационной защиты биологических объектов в эксперименте (рис. 1, патент на изобретение RU 2 428 228 C2). Длина волны лазерного излучения 650 нм. Диаметр лазерного пучка в точке облучения составлял 2,6 см.

При облучении мышей лазерным излучением их по одной особи помещали в специальные станки. В случае комбинированного облучения временной интервал между 2 облучениями не превышал 30 мин. Сначала мышей подвергали тотальному воздействию γ -излучения, затем облучали лазером. Лазерным излучением (в дозе 1 мДж/см²) облучали не все тело мышей, а только волосатую спинку. Площадь расширенного пучка в точке облучения составляла $\approx 5,3 \text{ см}^2$ (примерно 1/3 поверхности спины).

Для обработки полученных данных использовали пакет общепринятых методов статистической обработки, вложенных в компьютерную программу Microsoft Excel-2010.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены значения параметров периферической крови и кариоцитов костного мозга интактных мышей, а также значения тех же параметров мышей, подвергшихся острому облучению γ -лучами или комбинированному облучению (γ -лучи и лазерное излучение) в разные сроки после облучения. Видно, что через 24 ч после облучения γ -лучами наблюдаются лейкопения (снижение количества лейкоцитов в крови) и гиперхромия (увеличение содержания гемоглобина) [9]. Однако у комбинированно облученных мышей гиперхромия не наблюдается. Через 72 ч после облучения количество лейкоцитов крови, а также кариоцитов костного мозга ниже, чем через 24 ч. В этот срок гемоглобин на уровне нормы.

Таблица 1

Значения параметров периферической крови и кариоцитов костного мозга мышей, облученных γ -лучами в дозе 7 Гр (острое облучение), а также комбинированно облученных γ -лучами и лазерным излучением в дозе 1 мДж/см²

Количество мышей	Масса тела, г	Гемоглобин, г/л	Лейкоциты, 10 ³ мкл	Кариоциты, 10 ³ мкл
Интактные мыши				
11	15 ± 3	134,3 ± 15	6,8 ± 2,3	152,5 ± 6
Через 24 ч после облучения γ -лучами				
10	12 ± 1,9	199 ± 7,7*	2,3 ± 0,5*	40,3 ± 7*
Через 24 ч после облучения γ -лучами и лазером				
10	13,8 ± 2,4	123 ± 17,6**	1,53 ± 0,3*	43,4 ± 5,5*
Через 72 ч после облучения γ -лучами				
10	12,5 ± 2	132,6 ± 12,6	0,4 ± 0,01*; **	23,5 ± 5,4*, **
Через 72 ч после облучения γ -лучами и лазером				
10	12 ± 2,2	121 ± 17	0,44 ± 0,08*	33 ± 4,7*

Примечание. Здесь и в табл. 2: *– значения достоверно отличаются от значений параметров интактных мышей; ** – значения достоверно отличаются от значений параметров мышей, облученных γ -лучами в дозе 7 Гр через 24 ч после облучения

Таблица 2

Значения параметров периферической крови и кариоцитов костного мозга мышей, облученных γ -лучами (пролонгированное облучение) в дозе 7 Гр, а также комбинированно облученных γ -лучами и лазерным излучением дозе 1 мДж/см²

Количество мышей	Масса тела, г	Гемоглобин, г/л	Лейкоциты, 10 ³ мкл	Кариоциты, 10 ³ мкл
Через 24 ч после облучения γ -лучами				
10	15 ± 3	153 ± 32	1 ± 0,3*	61,8 ± 8*
Через 24 ч после облучения γ -лучами и лазером				
10	15 ± 2,3	122 ± 36	1,5 ± 0,9*	61 ± 11*
Через 72 ч после облучения γ -лучами				
10	16,4 ± 2	132 ± 30	0,62 ± 0,2*	33 ± 4*, **
Через 72 ч после облучения γ -лучами и лазером				
10	16,6 ± 1,3	113 ± 20	0,53 ± 0,1*	39 ± 4,7*

Таблица 3

Число митозов на 1000 ядросодержащих костномозговых клеток в разные сроки после облучения γ -лучами (острое и пролонгированное облучения), а также при комбинированном облучении γ -лучами и лазерным излучением

Количество мышей	Доза и вид излучения	Острое облучение, ч		Пролонгированное облучение, ч	
		24	72	24	72
11	Необлученный контроль	18,6 $\pm$ 1,95			
10	γ -лучи, 7 Гр	10,5 $\pm$ 1,5*	***	12,27 $\pm$ 1,3*	8,4 $\pm$ 0,7*. **
10	γ -лучи, 7 Гр + лазерное изл., 1 мДж/см ²	10,1 $\pm$ 1,7*	***	10,8 $\pm$ 1,7*	9,3 $\pm$ 1*

Примечание. * – достоверно ниже значения необлученного контроля; ** – достоверно ниже значения при облучении γ -лучами в срок 24 ч после пролонгированного облучения; *** – значения отсутствуют по причине сильного опустошения костного мозга

В табл. 2 приведены значения параметров периферической крови и кариоцитов костного мозга мышей, подвергшихся пролонгированному облучению γ -лучами или комбинированному γ -облучению и лазерному излучениям в разные сроки после облучения. В этом случае изменений значения гемоглобина не наблюдается. Уровень лейкоцитов со временем снижается, а количество кариоцитов, как и в случае острого облучения, снижается через 72 ч после облучения.

Результаты облучения только ионизирующим излучением по сравнению с комбинированными облучениями отличаются проявлением гиперхромии в срок через 24 ч после острого облучения γ -лучами (см. табл. 1, 2). Известно, что гиперхромия может наблюдаться при сгущении крови (вследствие диареи, образования экссудатов, транссудатов, уремии, сердечно-легочной недостаточности, непроходимости кишечника и др.). Такие ситуации в условиях проведенного эксперимента вполне допустимы. Поскольку через 72 ч после острого облучения мышей γ -лучами гиперхромия не наблюдается, то вероятно, что организм мышей и без вмешательства со временем справлялся с этой проблемой.

Обращает на себя внимание тот факт, что в обоих вариантах облучения мышей (острое и пролонгированное) при комбинированных облучениях в сроки через 72 ч после облучения количество кариоцитов костного мозга достоверно не отличаются от их числа при облучении только γ -лучами. Однако оно достоверно не ниже количества кариоцитов в сроки через 24 ч после облучения ионизирующим излучением.

В табл. 3 приведено число митозов на 1000 ядросодержащих костно-мозговых клеток (общий митотический индекс клеток костного мозга) в разные сроки после облучения γ -лучами (острое и пролонгированное), а также при комбинированном облучении γ -лучами и лазерным излучением. Результаты эксперимента показывают, что при остром облучении мышей γ -лучами через 72 ч после облучения наблюдается сильное опустошение костного мозга, не позволяющее определить число митозов. При пролонгированном облучении ионизирующим излучением, число митотических клеток со временем уменьшается, а в случае комбинированного облучения остается на том же уровне благодаря воздействию лазерного облучения.

На рис. 2, А представлена динамика гибели мышей после острого облучения γ -лучами, а также после комбинированного облучения γ - и лазерным излучениями. Видно, что в обеих группах существовали радиочувствительные особи, которые погибли в течение первых 2 сут после облучения. Затем у мышей, облученных только ионизирующим излучением, наблюдается резкий спад выживаемости, приводящий к 100 %-ной гибели через 5 сут после облучения. Мыши, подвергшиеся также лазерному воздействию, погибали постепенно; 100 %-ная гибель наступила на 11-е сутки после облучения.

К сожалению, продолжительность жизни часто бывает единственным результатом наблюдений, который можно использовать для характеристики общей картины клинического ответа на лучевое воздействие и форм гибели. Обычно в случаях работы с мелкими лабораторными животными причиной

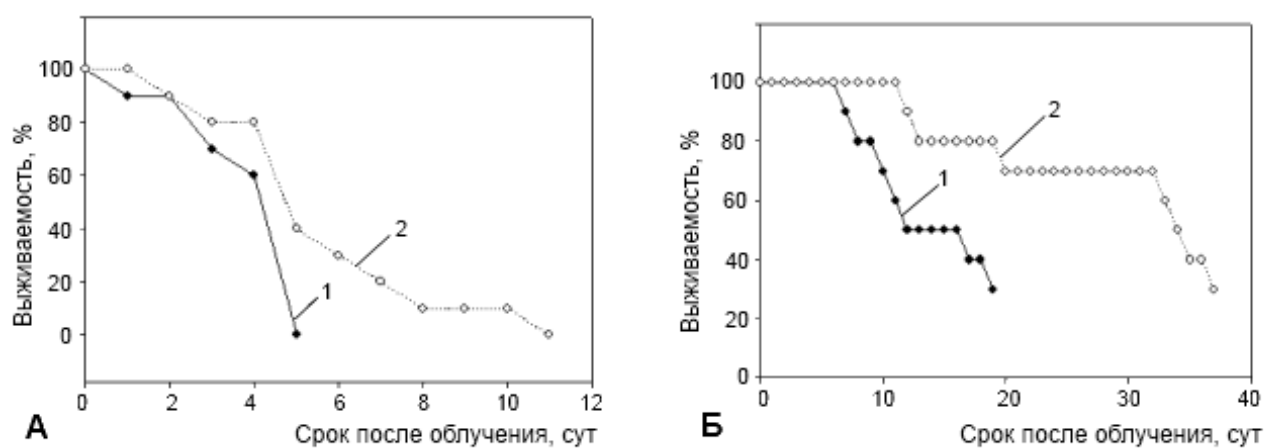


Рис. 2. Динамика гибели мышей: А – после острого облучения γ -лучами в дозе 7 Гр (1) и после комбинированного облучения γ -лучами и лазерным излучением в дозе 1 мДж/см² (2); Б – после пролонгированного облучения γ -лучами в дозе 7 Гр (1) и после комбинированного облучения γ -лучами (7 Гр) и лазерным излучением в дозе 1 мДж/см² (2)

гибели считают кишечный или костно-мозговой синдромы только на основании времени гибели [10]. В переходной области доз облучения выбирается предельное время, соответствующее 5-м или 8-м суткам, которое отражает тенденцию смертности вокруг 2 иногда перекрывающихся мод, одна из которых меньше вышеприведенных сроков. Этому сроку соответствуют клиническое течение болезни с симптомами кишечного синдрома, преобладающими при небольших сроках выживания, и костно-мозгового синдрома при более продолжительных сроках выживания. Если придерживаться такого подхода, то можно сказать, что в условиях проведенного эксперимента при остром облучении γ -излучением причиной гибели является кишечный синдром, поскольку 0 %-ная выживаемость наблюдается через 5 сут после облучения. В этот срок выживаемость комбинированно облученных мышей 40 %, а 100 %-ная гибель наблюдается на 11-е сутки после облучения. Сделать заключение, по какой причине погибают мыши после 5-х суток, затруднительно. Это может быть результатом как раннего костно-мозгового синдрома, так и позднего кишечного синдрома при комбинации 2 синдромов или в результате иных причин. С точки зрения задачи эксперимента главное, – что при дозе острого облучения 7 Гр, лазерное излучение способно снижать радиационное поражение мышей.

На рис. 2, Б представлена динамика гибели мышей после пролонгированного облучения γ -лучами, а также после комбинированного действия ионизирующим и лазерным излучениями. В этом случае наблюдается другая картина гибели мышей – в обоих вариантах облучения кривые имеют ступенчатый характер, но с существенным сдвигом во времени. В результате последнего 30 %-ная выживаемость мышей наблюдается на 19-е сутки после

облучения γ -лучами и на 38-е сутки после комбинированного облучения. Очевидно, что пролонгированное облучение привело к значительному снижению радиационного поражения мышей по сравнению с острым облучением.

Известно, что фактор времени в прогнозе возможных последствий облучения занимает важное место в связи с развивающимися после лучевого повреждения в тканях и органах процессами восстановления. По данным большинства радиобиологических исследований снижение мощности дозы излучения (при одной и той же поглощенной дозе) уменьшает биологический эффект, причем для каждого из критериев, которые положены в основу оценки этой закономерности, существуют свои строго определенные диапазоны мощности доз, при которых указанная закономерность справедлива [11]. В результате воздействия на организм ионизирующего излучения малой мощности и наличием одновременно процессов постлучевого восстановления тканей клиническая картина имеет ряд отличий по сравнению с кратковременным облучением. При пролонгированном воздействии возникают те же формы лучевой болезни, как и при кратковременном облучении, зависимость тяжести от дозы сохраняется, однако начало первичной реакции может быть отсрочено. Полученные результаты, приведенные на рис. 1 и 2, наглядно демонстрируют этот эффект. Однако в проведенной работе нас интересовал вопрос возможности снижения радиационного поражения мышей с помощью лазерного излучения. Представленная на рис. 2, Б кривая гибели мышей при комбинированном облучении свидетельствует о том, что лазерное облучение приводит к существенному изменению срока выживаемости при пролонгированном облучении мышей.

Выводы

На основании результатов, приведенных выше и полученных ранее, можно заключить, что радиационная защита мышей с помощью лазерного излучения возможна при воздействии ионизирующего излучения в широком интервале доз. Кроме того, лазерное облучение снижает неблагоприятные последствия как острого так и пролонгированного радиационного воздействия. Полученный результат очень важен для радиационной защиты, поскольку, как известно [12], в случае пролонгированного облучения организма ионизирующим излучением радиопротекторы короткого типа действия неэффективны, в ряде случаев возможен и отрицательный эффект. Хочется также обратить внимание на то, что созданные лазерные устройства для радиационной защиты биологических объектов в эксперименте имеют практичный режим управления и позволяют быстро и безошибочно облучить биологические объекты в нужной для радиозащиты дозе.

Список литературы

1. Рождественский Л.М. Актуальные вопросы поиска и исследования противолучевых средств // Тез. докл. Рос. конф. «Острые проблемы разработки противолучевых средств: консерватизм или модернизация» (Москва, 13–14 ноября 2012 г.). С. 8.
Rozhdestvensky L.M. Urgent issues of search and study of radioprotective means // Theses of reports of the Russian Conference «Urgent Problems of Work-Out of Radioprotective Means: Conservatism or Upgrading» (Moscow, 13–14 November, 2012). P. 8.
2. Maisin J.R. Chemical radioprotection: past, present, and future prospects // *Int. J. Radiat. Biol.* 1998. V. 73. № 4. P. 443–450.
3. Voskanyan K., Vorozhtsova S., Abrosimova A. et al. Laser light induced modification of the mice peripheral bloods parameters and the number of bone marrow karyocytes after the action of ionizing radiation // *J. of Phys. Science and Application.* 2012. V. 2. № 2. P. 7–10.
4. Voskanyan K., Vorozhtsova S., Abrosimova A. et al. Laser device for the protection of biological objects from the damaging action of ionizing radiation // *Ibid.* № 6. P. 152–157.
5. Куценко С.А. Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита. СПб., 2004.
Kutsenko S.A. Military toxicology, radiobiology and medical protection. St.-Petersburg, 2004.
6. Генин А.М., Ильин Е.А., Капланский А.С. и др. Биоэтические правила проведения исследований на человеке и животных в авиационной, космической и морской медицине // *Авиакосм. и экол. мед.* 2001. Т. 35. № 4. С. 14–20.
Genin A.M., Ilyin E.A., Kaplansky A.S. et al. Bioethical regulations of conducting research on man and animals in aviation, space and naval medicine // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2001. V. 35. № 4. P. 14–20.

7. Коблов Л.Ф. Методы и приборы для клинических и лабораторных исследований. М., 1979.

Koblov L.F. Methods and devices for clinical and laboratory research. Moscow, 1979.

8. Savchenko O.V. Status and prospects of new clinical methods of cancer diagnostics and treatment based on particle and ion beams available at JINR // *Communication of the Joint Institute for Nuclear Research.* Dubna, 1996. E18-96-124.

9. Руководство по гематологии / А.И. Воробьев, ред. М., 1985.

Guide to hematology / A.I. Vorobev, ed. Moscow, 1985.

10. Бычкова И.Б. Динамика пострadiационной гибели биологических объектов. М., 1970.

Bychkovskaya I.B. Postradiation lethality dynamics of biological objects. Moscow, 1970.

11. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена: Учеб. для вузов. М., 2010.

Ilyin L.A., Kirillov B.F., Korenkov I.P. Radiation hygiene: Textbook for universities. Moscow, 2010.

12. Головки А.И., Шипов В.В., Гребенюк А.Н. и др. Токсикологические проблемы медицины катастроф. СПб., 2000.

Golovko A.I., Shipov V.V., Grebenyuk A.N. et al. Disaster medicine toxicological problems. St.-Petersburg, 2000.

Поступила 04.06.2014

MITIGATION OF MICE RADIATION DAMAGE AFTER ACUTE AND PROLONGED γ -IRRADIATION BY A LASER DEVICE

Voskanyan K.Sh., Vorozhtsova S.V., Abrosimova A.N., Mitsyn G.V., Gaevskiy V.N., Molokanov A.G.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 21–26

Effects of 7 Gy ^{60}Co γ -radiation (acute and prolonged exposure), and combined exposure to 650 nm laser and γ -radiation on survival, peripheral blood, karyocyte count and mitotic index of bone marrow cells were studied in young C57BL/6 mice.

All mice died following acute γ -irradiation at the dose rate of 1.14 Gy/min for 5 days or combined exposure for 11 days. Thirty percent survival from prolonged exposure to the dose rate of 0.027 Gy/min was observed after 19-day γ - and 38-day combined irradiation. Peripheral blood parameters did not differ significantly after acute and prolonged exposure; however, hyperchromemia was observed in mice after 24 hours of acute γ -irradiation. The count of mitoses per 1000 nucleus-containing BM cells evidenced that BM was virtually collapsed after 72 hours since the acute γ -exposure. It was demonstrated that laser can manage protection from a broad range of ionizing radiation doses and mitigate the adverse effects of equally acute and prolonged radiation exposure.

Key words: radiation protection, acute and prolonged exposure, laser radiation.

УДК 613.16-055.1/.2+612.017

ПОЛОВЫЕ РАЗЛИЧИЯ МЕТЕОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗДОРОВЫХ ВЗРОСЛЫХ ЛЮДЕЙ, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ НА РЕОЭНЦЕФАЛОГРАММЕ И ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЕ

Водолажская М.Г.^{1, 2}, Водолажский Г.И.³

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²НИИ экспериментальной медицины, Санкт-Петербург

³Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

E-mail: domabiomed@yandex.ru

В обычных условиях субъективно неощущаемая реактивность компонентов реоэнцефалограммы (РЭГ) и электроэнцефалограммы (ЭЭГ) к ординарным геофизическим факторам (режиму ветра, атмосферному давлению, относительной влажности и температуре) имеет половые различия. Корреляции между величинами РЭГ, ЭЭГ и погодными флуктуациями регистрируются чаще и являются более выраженными у мужчин. Связи параметров ритмов ЭЭГ и метеофакторов усиливаются по мере учащения церебральной ритмики в ряду дельта – тета – альфа – бета. Данная закономерность у мужчин выражена более отчетливо, чем у женщин. Реактивность женских нейродинамических параметров РЭГ и ЭЭГ зависит от стадии овариально-менструального цикла. Почти все случаи церебральной метеочувствительности женщин были выявлены в постовуляторную фазу, тогда как на преовуляторной стадии замечены лишь единичные эпизоды метеочувствительности.

Ключевые слова: нормальная метеочувствительность, погода, реоэнцефалограмма, электроэнцефалограмма, половые различия, адаптация.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 27–32.

Неэкстремальная геофизическая обстановка, погодные условия способствуют развитию адаптивного свойства нормальной метеочувствительности [1-4]. В современной концепции здоровья «Космос – Земля» преимущественное значение в поддержании здоровья человека отводится регуляторным системам организма [1]. Известно, что феномен физиологической метеочувствительности связан с регуляторным влиянием центральной нервной системы у здоровых людей, что подтверждено изменениями нейродинамических показателей на реоэнцефалограмме (РЭГ) и электроэнцефалограмме (ЭЭГ), синхронными даже с небольшими погодными флуктуациями, едва заметными субъективно и не вызывающими метеопатию [4, 5]. Остается неясным, по-разному ли реагирует головной мозг женщин и мужчин на ординарные колебания геофизической обстановки? Каковы половые различия

метеочувствительности здоровых людей по данным РЭГ и ЭЭГ? В литературе заметно большее внимание уделяется изучению чувствительности к атмосферным факторам организма мужчин [6]. Между тем исследование феномена метеочувствительности приобрело особую практическую значимость для многих видов профессиональной деятельности лиц обоего пола [7, 8], включая авиакосмическую область, в которой проблема «женского космоса» остается открытой. Для земной медицины данное направление может служить стимулом к переходу от нозологического принципа оценки состояния здоровья к донозологическому [1]. Ведь известно, что нормальная метеочувствительность переходит в метеопатию вплоть до проявлений метеопатологии [9–11]. Эти неполадки могут возникнуть еще до перемены погоды как своего рода упреждающая сигнальная реакция. Так, например, замечено, что резкий рост числа вызовов «скорой помощи» (без установления половых различий) приходится как раз на неблагоприятные с точки зрения погодных условий дни [9, 10].

Целью исследования являлось определение половых особенностей физиологической метеочувствительности здоровых людей по РЭГ и ЭЭГ.

Методика

РЭГ- и ЭЭГ-обследования проводили у 348 здоровых взрослых добровольцев (96 мужчин и 252 женщины), не имеющих объективных неврологических нарушений и метеопатических жалоб, в возрасте от 18 до 45 лет. Критерием невключения в группу было наличие невропатологии и субъективные жалобы на метеопатию.

РЭГ и ЭЭГ регистрировали с помощью цифрового 6-канального реоэнцефалографа «Рео-спектр» и 21-канального электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-4/ВП» фирмы «Нейрософт» (г. Иваново). Фоновую запись РЭГ регистрировали в лобных и затылочных отведениях слева и справа. Кроме визуальной индивидуальной оценки 348 РЭГ у

каждого обследуемого определяли следующие реоэнцефалографические показатели, рассчитанные по усредненной волне с фильтрацией и распрямлением [12]: время распространения пульсовой волны от сердца до мозга (Q_x); время быстрого кровенаполнения крупных мозговых артерий (α_1); время медленного кровенаполнения мелких и средних мозговых артерий (α_2); время восходящей части волны (α); реографический индекс (РИ); коэффициент асимметрии РИ (КаРИ); максимальную скорость быстрого кровенаполнения ($V_{\max}$), среднюю скорость медленного кровенаполнения мелких и средних артерий ($V_{\text{ср}}$); дикротический индекс (ДИК); диастолический индекс (ДИА); отношение амплитуды венозной компоненты к амплитуде артериальной компоненты (Авен/Аарт); показатель венозного оттока (ПВО). Помимо этого, реоэнцефалограф синхронно регистрировал частоту сердечных сокращений (ЧСС) и базовое сопротивление тела ($Z_{\text{баз}}$). При регистрации ЭЭГ-электроды располагались по международной схеме «10–20» с поправкой на 21 отведение. Референтные электроды – на мочках ушей. В режиме фоновой записи (покой, глаза закрыты) регистрировали амплитудные, мощностные, частотные и периодометрические параметры ЭЭГ, оценивали индивидуальные нейрокарты [12]. В процессе обследования каждого испытуемого получены 272 нейродинамических показателя: амплитуда без учета отдельных ритмов – по отведениям (21 отведение, максимальная, средняя величины амплитуды), мкВ; амплитуда дельта-, тета-, альфа- и 2 бета-ритмов (низко- и высокочастотного) по каждому отведению (максимальная, средняя), мкВ; мощность спектра по отведениям (максимальная, средняя, полная), $\text{мкВ}^2/\text{с}^2$; мощность спектра дельта-, тета-, альфа- и 2 бета-ритмов (максимальная, средняя, полная), $\text{мкВ}^2/\text{с}^2$; частота спектра по отведениям (доминирующая, средняя), Гц; частота спектра дельта-, тета-, альфа- и 2 бета- (низко- и высокочастотного) ритмов (доминирующая, средняя), Гц; амплитуда спектров по отведениям (максимальная, средняя, полная), мкВ/с; амплитуда спектров дельта-, тета-, альфа- и 2 бета-ритмов (максимальная, средняя, полная), мкВ/с; индексы мощности спектра каждого ритма ЭЭГ (по результатам нейрокартирования); асимметрия (по результатам нейрокартирования), %; распределение амплитуды по 5 диапазонам в 21 отведении для оценки периода ритмов ЭЭГ, %.

Каждый параметр РЭГ и/или ЭЭГ всех обследуемых лиц представлял собой единый вариационный ряд, который сопоставлялся с помощью корреляционного анализа (расчет линейного коэффициента корреляции R) и метода наименьших квадратов (с расчетом коэффициента детерминированности R^2) поочередно с 5 вариационными рядами этих же испытуемых, состоящими из 5 метеорологических

показателей, совпадающих по времени с моментом регистрации каждой РЭГ и ЭЭГ. Учитывались следующие метеорологические параметры: направление ветра, в градусах; скорость ветра, м/с; температура окружающей среды, °С; относительная влажность воздуха, %; атмосферное давление, мБар. Всего было произведено 348 синхронных (каждые 30 мин, соответствующих моменту ЭЭГ-обследования каждого человека) замеров 5 погодных факторов, соразмерных общему числу испытуемых.

Таким образом, в каждом из 348 случаев оценены 348 естественные и неповторимые природой модели сочетания ординарных погодных факторов. Об их биотропности либо о церебральной метеочувствительности судили по уровню достоверности, степени и характеру связей (R и R^2) между метеорологическими величинами и абсолютными значениями исследуемого нейродинамического параметра [2, 3, 5]. Межполовое сравнение нейродинамических проявлений феномена нормальной метеочувствительности проводили с помощью статистического пакета анализа данных Microsoft Excel-2010. Нейродинамические показатели женщин и их взаимосвязь с метеорологическими показателями оценивали, учитывая стадии овариально-менструального цикла (ОМЦ).

Исследования проводились в соответствии с требованиями Конвенции Совета Европы «О правах человека и биомедицине» (1997) и дополнительным протоколом к Конвенции в части биомедицинских исследований (2005), а также на основе информированного согласия обследуемых. Степень риска при проведении исследований была минимальной.

Результаты и обсуждение

Выявлялись различия в абсолютных величинах РЭГ между представителями полов. Время медленного кровенаполнения в левом и правом затылочных отведениях у женщин было большим, чем у мужчин ($p < 0,05$). Разница ($p < 0,02$) во времени восходящей части волны реограммы в правом затылочном отведении составляла $0,05 \text{ с}$ ($0,19 \pm 0,003 \text{ с}$ у женщин и всего $0,14 \pm 0,009 \text{ с}$ у мужчин). В правом лобном отведении зарегистрирована большая ($p < 0,05$) величина реографического индекса у женщин ($1,86 \pm 0,123 \text{ у.е.}$) по сравнению с мужчинами ($1,54 \pm 0,101 \text{ у.е.}$). Следовательно, сопротивление кровотоку в венозном русле у представительниц женского пола несколько выше. И, наконец, базовое сопротивление тела в области головы имело отчетливое и статистически значимое ($p < 0,001$) отличие, проявившееся во всех 4 отведениях: у женщин данная величина явно превышала таковую у лиц мужского пола.

Вместе с тем, изменения РЭГ-показателей при обычных погодных условиях имели

Таблица 1

**Корреляции между параметрами РЭГ здоровых мужчин и женщин
и синхронной величиной атмосферного давления (мбар)**

Показатели	Мужчины				Женщины			
	Отведения							
	Fms	Fmd	Oms	Omd	Fms	Fmd	Oms	Omd
ЧСС, уд/мин.	0,07				-0,06			
Zбазовое, Ом	0,00	-0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,03	0,00
Q _x , с	-0,59*	-0,48*	-0,29*	-0,23*	-0,14*	-0,16*	-0,12	-0,15*
Альфа1, с	-0,40*	-0,39*	-0,63*	-0,67*	-0,06	-0,05	-0,10	-0,09
Альфа2, с	-0,22*	-0,29*	-0,35*	-0,36*	0,01	-0,01	-0,08	-0,02
Альфа, с	-0,39*	-0,24*	-0,56*	-0,27*	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01
РИ, у.е.	-0,70*	-0,62*	-0,22*	-0,43*	-0,02	-0,01	0,00	0,00
КаРИ, %	0,00	0,12	0,02	0,01	-0,01	0,00	-0,03	-0,02
V _{макс} , Ом/с	0,16	0,51*	0,11*	0,15*	0,10	0,09	0,08	0,09
V _{ср} , Ом/с	0,18	0,40*	0,45*	0,11*	0,14*	0,13	0,22*	0,14*
ДИК, %	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,02	0,00
ДИА, %	-0,01	-0,09	-0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Авен/Аарт, %	0,00	0,00	0,00	-0,09	-0,01	0,00	0,10	-0,07
ПВО, %	0,12*	0,20	0,69*	0,29*	0,10	0,09	0,08	0,08

Примечание. Здесь и в табл. 2: * – $p < 0,05$.

противоположную тенденцию. Так, у мужчин РЭГ-показатели коррелировали с метеофакторами чаще (29 эпизодов), чем у женщин (6 эпизодов), что соответствует стандартизированному соотношению: 54,7 : 11,3 %. Степень связей между параметрами РЭГ и погодой у лиц мужского пола была более выраженной, чем у женщин. В частности, только у мужчин время быстрого и медленного кровенаполнения, время восходящей части волны, величина реографического индекса, максимальная скорость быстрого кровенаполнения, показатель венозного оттока были связаны с направлением ветра, атмосферным давлением, относительной влажностью и температурой ($p < 0,05$). Так, например, судя по знакам R, у неврологически здоровых мужчин по мере поворота ветра по часовой стрелке, т.е. в соответствии с розой ветров в направлении «север - восток - юг - запад» тонус церебральных сосудов повышался, сопротивление кровотоку в венозном русле уменьшалось, амплитуда дифференциальной реограммы постепенно падала, венозный отток (в отведении Fms) несколько облегчался. Общей для обоих полов тенденцией характеризовались лишь 2 параметра: 1) время распространения пульсовой волны от сердца до мозга (оно явно сокращалось при подъеме атмосферного давления всего на 4–6 мм рт. ст.) и 2) средняя скорость медленного кровенаполнения, которая, наоборот,

увеличивалась в ответ на изменение атмосферного давления (табл. 1). Для представительниц женского пола специфичной была корреляция единственного показателя (коэффициента асимметрии реографического индекса в обоих затылочных отведениях) с единственным погодным фактором (атмосферным давлением, см. табл. 1).

У лиц обоего пола корреляция параметров ЭЭГ с метеорологическими показателями количественно возрастала и усиливалась в ряду дельта – тета – альфа – бета, т.е. по направлению «из глубины мозга к его конвексительной поверхности»: воспроизведена закономерность, установленная нами ранее [2–4]. Однако у мужчин данная закономерность проявлялась более отчетливо (табл. 2, рис. 1). Так, амплитуда ритмов ЭЭГ, мощность спектров, частота спектров, величина периодов ЭЭГ неврологически здоровых взрослых мужчин были связаны (R и R^2 от -0,88 до 0,89; $p < 0,05$ соответственно) с синхронными изменениями погоды: направлением ветра (24,9 % биотропности), атмосферным давлением (24 %), относительной влажностью (21,5 %), температурой (16,6 %), скоростью воздушных масс (13 %). Отсюда видно, что наибольшей метеочувствительностью обладает мощность спектров ЭЭГ и частотный диапазон бета. Затем в данном рейтинге следует альфа-ритм, затем – тета-волны. Сколько-нибудь существенных особенностей метеочувствительности медленноволновой части

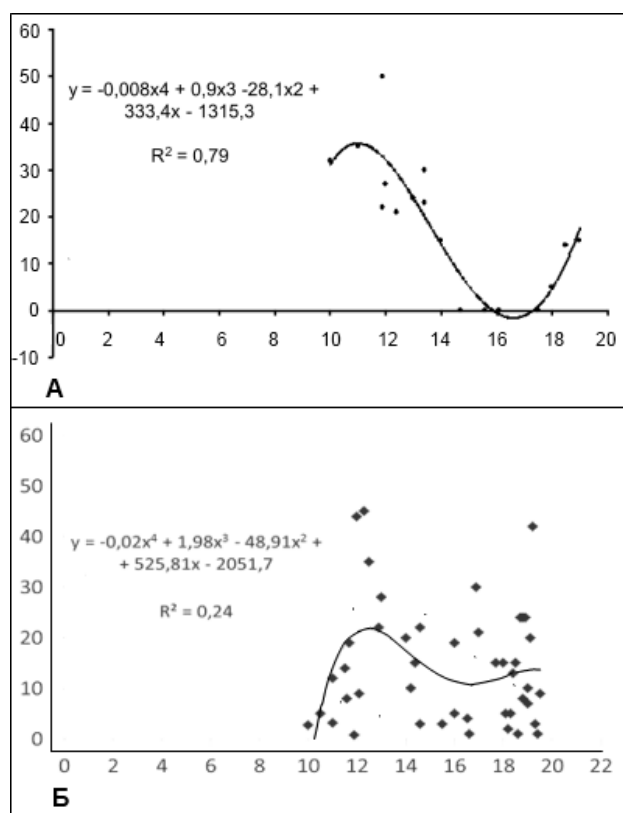


Рис. 1. Графики функций, аппроксимирующих зависимость величины максимальной амплитуды тета-ритма в отведении F8A2 (в мкВ по вертикали) от температуры окружающей среды (градусы Цельсия по горизонтали). Полиномиальный тип линии тренда. Над графиками приведены уравнения регрессии и коэффициенты детерминированности (R^2): А – мужчины; Б – женщины; точки – показатели отдельных обследуемых

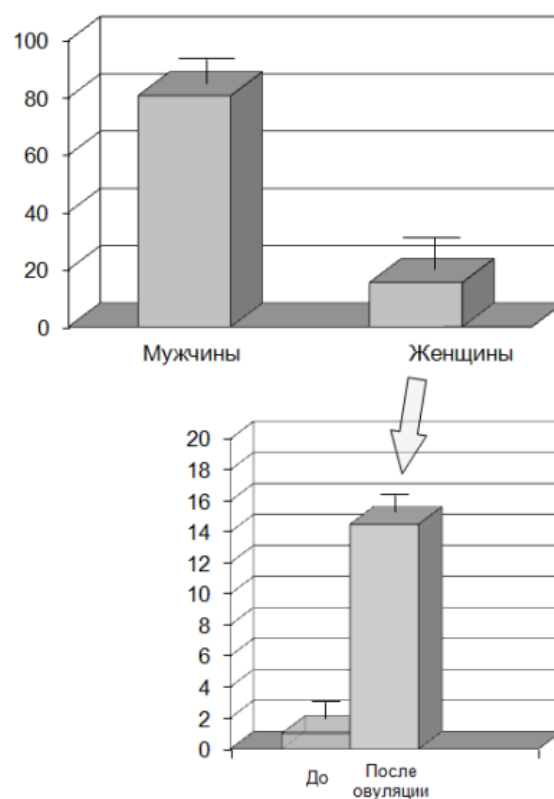


Рис. 2. Сравнение нейродинамической реактивности к погоде здоровых мужчин и женщин (в % – по числу статистически значимых эпизодов метеочувствительности исследуемых параметров РЭГ и ЭЭГ из всех возможных случаев проявления данного свойства)

спектра ЭЭГ в диапазоне дельта установлено не было. Эти данные отличались от аналогичных, но полученных при обследовании лиц женского пола.

У женщин было выявлено слабое проявление физиологической реактивности головного мозга к погоде по сравнению с мужчинами. Об этом, прежде всего, свидетельствуют менее выраженные (однако объективно регистрируемые при $p < 0,05$) связи между параметрами погоды и нейродинамическими величинами у обследуемых женского пола. Такие эпизоды вдвое реже встречаются у женщин, чем у мужчин (см. табл. 2, рис. 2). Кроме того, у лиц женского пола зарегистрированы особенности церебральной метеочувствительности в зависимости от фазы ОМЦ (см. рис. 2). В работе [13] описана аналогичная тенденция связи ЭЭГ женщин с эндогенным фактором – ежемесячным показателем возраста в пределах репродуктивного периода онтогенеза. Оказалось, что на постовуляторной стадии ОМЦ амплитудные параметры большинства ритмов ЭЭГ тоже изменяются «по мужскому типу».

Выводы

Таким образом, судя по данным РЭГ и ЭЭГ, церебральная метеочувствительность мужчин в целом превосходит таковую у женщин. Защитно-компенсаторное явление – метеочувствительность – обеспечивает, наряду с иными адаптивными свойствами гармоничное приспособление работы мозга к окружающей среде и создает условия для отсутствия субъективных ощущений погоды у здорового человека. У неврологически здоровых мужчин и женщин, судя по показателям РЭГ и ЭЭГ, по-разному достигается одна и та же цель – адекватное реагирование мозга и его кровообращения на обычные, постоянно меняющиеся внешние условия существования. Тактический межполовой антагонизм в конечном итоге оборачивается функциональным синергизмом на уровне целостной живой системы.

Таблица 2

Корреляции между метеорологическими параметрами и средней частотой спектра (Гц)
по альфа-ритму ЭЭГ здоровых мужчин и женщин

Погодные условия	Отведения									
	O2A2	O1A1	P4A2	P3A1	C4A2	C3A1	F8A2	F7A1	F4A2	Fp2A2
Мужчины, n = 96, 69 эпизодов метеочувствительности										
Направление ветра, °	-0,13	-0,22*	-0,22*	-0,15	-0,29*	-0,34*	-0,35*	-0,33*	-0,24*	-0,25*
Скорость ветра, м/с	0,68*	0,40*	0,82*	0,46*	0,81*	0,63*	0,89*	0,67*	0,71*	0,66*
Температура, °	0,33*	0,36*	0,19	0,71*	0,68*	0,55*	0,56*	-0,12	-0,14	0,39*
Влажность, %	-0,27*	0,08	-0,32*	-0,30*	0,32*	0,36*	-0,21*	0,18	-0,04	-0,07
Давление, мбар	-0,14	0,16	-0,15	-0,18	0,34*	0,40*	0,12	0,03	0,18	0,07
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,29*	-0,43*	-0,52*	-0,44*	-0,53*	-0,53*	-0,10	-0,37*	-0,26*	-0,26*
Температура, °	0,64*	0,82*	0,83*	0,74*	0,85*	-0,31*	0,77*	0,80*	0,65*	0,44*
Влажность, %	0,43*	0,57*	0,55*	0,70*	0,61*	0,50*	0,32*	0,57*	0,53*	0,21*
Давление, мбар	0,12	0,04	0,12	0,46*	0,13	-0,04	-0,22*	0,06	-0,28*	0,01
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,29*	-0,43*	-0,52*	-0,44*	-0,53*	-0,53*	-0,10	-0,37*	-0,26*	-0,26*
Температура, °	0,64*	0,82*	0,83*	0,74*	0,85*	-0,31*	0,77*	0,80*	0,65*	0,44*
Влажность, %	0,43*	0,57*	0,55*	0,70*	0,61*	0,50*	0,32*	0,57*	0,53*	0,21*
Давление, мбар	0,12	0,04	0,12	0,46*	0,13	-0,04	-0,22*	0,06	-0,28*	0,01
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,29*	-0,43*	-0,52*	-0,44*	-0,53*	-0,53*	-0,10	-0,37*	-0,26*	-0,26*
Температура, °	0,64*	0,82*	0,83*	0,74*	0,85*	-0,31*	0,77*	0,80*	0,65*	0,44*
Влажность, %	0,43*	0,57*	0,55*	0,70*	0,61*	0,50*	0,32*	0,57*	0,53*	0,21*
Давление, мбар	0,12	0,04	0,12	0,46*	0,13	-0,04	-0,22*	0,06	-0,28*	0,01
Женщины, n = 252, 39 эпизодов метеочувствительности										
Направление ветра, °	-0,12	-0,01	-0,12	-0,16*	-0,09	-0,34	-0,35	-0,03	-0,20*	0,05
Скорость ветра, м/с	0,22*	0,12	0,15*	0,15*	0,18*	0,13	0,15*	0,47*	0,01	-0,06
Температура, °	0,30*	0,06	0,11	0,11	0,08	0,13	0,16*	-0,10	-0,01	0,05
Влажность, %	-0,13	0,08	-0,12	-0,10	0,04	-0,06	-0,04	-0,04	-0,04	-0,06
Давление, мбар	0,13	0,06	0,13	0,12	0,18*	-0,01	0,12	0,09	0,09	0,08
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,08	-0,43	-0,12	-0,13	-0,13	-0,19*	-0,12	-0,19*	0,06	-0,16*
Температура, °	0,24*	0,80*	0,11	0,14*	0,15*	-0,21*	0,57*	0,28*	0,15*	0,36*
Влажность, %	0,34*	0,47*	0,08	0,20*	0,11	0,30*	0,31*	0,39*	0,13	0,20*
Давление, мбар	0,00	0,04	0,02	0,16*	0,13	-0,04	-0,03	-0,03	-0,23	-0,09
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,08	-0,43	-0,12	-0,13	-0,13	-0,19*	-0,12	-0,19*	0,06	-0,16*
Температура, °	0,24*	0,80*	0,11	0,14*	0,15*	-0,21*	0,57*	0,28*	0,15*	0,36*
Влажность, %	0,34*	0,47*	0,08	0,20*	0,11	0,30*	0,31*	0,39*	0,13	0,20*
Давление, мбар	0,00	0,04	0,02	0,16*	0,13	-0,04	-0,03	-0,03	-0,23	-0,09
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,08	-0,43	-0,12	-0,13	-0,13	-0,19*	-0,12	-0,19*	0,06	-0,16*
Температура, °	0,24*	0,80*	0,11	0,14*	0,15*	-0,21*	0,57*	0,28*	0,15*	0,36*
Влажность, %	0,34*	0,47*	0,08	0,20*	0,11	0,30*	0,31*	0,39*	0,13	0,20*
Давление, мбар	0,00	0,04	0,02	0,16*	0,13	-0,04	-0,03	-0,03	-0,23	-0,09
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,08	-0,43	-0,12	-0,13	-0,13	-0,19*	-0,12	-0,19*	0,06	-0,16*
Температура, °	0,24*	0,80*	0,11	0,14*	0,15*	-0,21*	0,57*	0,28*	0,15*	0,36*
Влажность, %	0,34*	0,47*	0,08	0,20*	0,11	0,30*	0,31*	0,39*	0,13	0,20*
Давление, мбар	0,00	0,04	0,02	0,16*	0,13	-0,04	-0,03	-0,03	-0,23	-0,09
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,08	-0,43	-0,12	-0,13	-0,13	-0,19*	-0,12	-0,19*	0,06	-0,16*
Температура, °	0,24*	0,80*	0,11	0,14*	0,15*	-0,21*	0,57*	0,28*	0,15*	0,36*
Влажность, %	0,34*	0,47*	0,08	0,20*	0,11	0,30*	0,31*	0,39*	0,13	0,20*
Давление, мбар	0,00	0,04	0,02	0,16*	0,13	-0,04	-0,03	-0,03	-0,23	-0,09
Отведения										
Направление ветра, °	Fp1A1	T6A2	T5A1	T4A2	T3A1	FpzA2	FzA1	CzA2	PzA1	OzA2
Скорость ветра, м/с	-0,08	-0,43	-0,12	-0,13	-0,13	-0,19*	-0,12	-0,19*	0,06	-0,16*
Температура, °	0,24*	0,80*	0,11	0,14*	0,15*	-0,21*	0,57*	0,28*	0,15*	0,36*
Влажность, %	0,34*	0,47*	0,08	0,20*	0,11	0,30*	0,31*	0,39*	0,13	0,20*
Давление, мбар	0,00	0,04	0,02	0,16*	0,13	-0,04	-0,03	-0,03	-0,23	-0,09

Список литературы

1. Ушаков И.Б., Орлов О.И., Баевский Р.М. и др. Концепция здоровья: Космос – Земля // Физиология человека. 2013. Т. 39. № 2. С. 5–9.
Ushakov I.B., Orlov O.I., Baevskiy R.M. et al. The concept of health: Space-to-Earth // Fiziologiya cheloveka. 2013. V. 39. № 2. P. 5–9.
2. Водолажская М.Г., Водолажский Г.И., Найманова М.Д. Influence of geophysical factors on the parameters of human electroencephalogram // Biophysics. 2010. V. 55. № 3. P. 477–483.
Vodolazhskaya M.G., Vodolazhskiy G.I., Naimanova M.D. Influence of geophysical factors on the parameters of human electroencephalogram // Biophysics. 2010. V. 55. № 3. P. 477–483.
3. Водолажская М.Г., Водолажский Г.И., Найманова М.Д., Рослый И.М. Влияние геофизических факторов на параметры ЭЭГ человека // Биофизика. 2010. Т. 55. № 3. С. 544–551.
Vodolazhskaya M.G., Vodolazhskiy G.I., Naimanova M.D., Rosly I.M. Influence of geophysical factors on the parameters of human EEG // Biofizika. 2010. V. 55. № 3. P. 544–551.
4. Водолажский Г.И., Водолажская М.Г. Метеочувствительность здорового организма // Авиакосм. и экол. мед. 2013. Т. 47. № 2. С. 3–8.
Vodolazhskiy G.I., Vodolazhskaya M.G. Weather sensitivity of healthy organism // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2013. V. 47. № 2. P. 3–8.
5. Водолажская М.Г., Водолажский Г.И., Найманова М.Д. Взаимосвязь ординарных факторов погоды и церебральных функций людей с неврологическими отклонениями // Экология человека. 2012. № 1. С. 51–58.
Vodolazhskaya M.G., Vodolazhskiy G.I., Naimanova M.D. Relationship of weather ordinary factors and cerebral functions of people with neurological abnormalities // Ekologiya cheloveka. 2012. № 1. P. 51–58.
6. Марков А.Л., Зенченко Т.А., Солонин Ю.Г., Бойко Е.Р. Чувствительность к атмосферным и геомагнитным факторам функциональных показателей организма здоровых мужчин, жителей Севера России // Авиакосм. и экол. мед. 2013. Т. 47. № 2. С. 29–33.
Markov A.L., Zenchenko T.A., Solonin Yu.G., Boiko E.R. Vulnerability to atmospheric and geomagnetic factors of the body functions in healthy male dwellers of the Russian North // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2013. V. 47. № 2. P. 29–33.
7. Непронова О.О., Водолажская М.Г. Прогнозирование резервных возможностей юных спортсменов с учетом состояния нормальной метеочувствительности // Кубан. науч. мед. вестн. 2009. Т. 107. № 2. С. 106–111.
Nepronova O.O., Vodolazhskaya M.G. Forecasting of young athletes reserve possibilities taking into account the state of normal meteosensitivity // Kubanskiy nauchny meditsinskiy vestnik. 2009. V. 107. № 2. P. 106–111.
8. Ростовская Э. Влияние внешних температурных условий на занятиях физическими упражнениями на функции терморегуляции // Вопр. физ. воспитания студентов. 1995. № 24. С. 124–127.
Rostovska E. The influence of external temperature conditions during physical exercises on the functions of thermoregulation // Voprosy fizicheskogo vospitaniya studentov. 1995. № 24. P. 124–127.
9. Гамбурцев А.В., Сигачев А.В. Динамика вызовов скорой помощи г. Москвы за последние 5 лет // Вестн. РАН. 2012. Т. 82. С. 415–424.

Gamburtsev A.V., Sigachev A.V. Dynamics of ambulance calls in Moscow over the last 5 years // Vestnik RAN. 2012. V. 82. P. 415–424.

10. Гамбурцев А.В., Сигачев А.В. Особенности динамики вызовов скорой медицинской помощи в четырех округах Москвы // Пространство и время. 2013. Т. 3. № 3 (13). С. 190–193.

Gamburtsev A.V., Sigachev A.V. Peculiarities of the dynamics of emergency calls to medical care in the four districts of Moscow // Prostranstvo i vremya. 2013. V.3. № 3 (13). P. 190–193.

11. Schluter P.J., Kord R.P.K., Brown J., Ryan A.P. Weather temperatures and sudden infant death syndrome // J. Epidemiol. and Community Health. 1998. № 1. P. 27–33.

12. Щекутьев Г.А. Нейрофизиологические исследования в клинике. М., 2001.

Shchekutsev G.A. Neurophysiological studies in the clinic. Moscow, 2001.

13. Чадова И.Н. Динамика электроэнцефалографии женщин в течение репродуктивного периода онтогенеза // Научное обозрение. 2014. № 1. С. 145–150.

Chadova I.N. Dynamics of electroencephalography of women during the reproductive period of ontogenesis // Nauchnoe obozrenie. 2014. № 1. C. 145–150.

Поступила 16.05.2014

GENDER DIFFERENCES IN WEATHER SENSITIVITY OF NORMAL ADULT PEOPLE REGISTERED ON THE RHEOENCEPHALOGRAM AND ELECTROENCEPHALOGRAM

Vodolazhskaya M.G., Vodolazhskiy G.I.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 27–32

In the real-life environment the subjectively unperceived reactivity of rheoencephalogram (REG) and electroencephalogram (EEG) to ordinary geophysical factors (i.e. wind, atmospheric pressure, relative humidity and temperature) is gender-dependent. Correlations between REG and EEG values and weather fluctuations are more frequent and stronger in men. Dependence of EEG rhythms on weather factors increases as the rhythmic activity within the delta-theta-beta range becomes more rapid. This pattern is particularly evident in men but not women. Reactivity of neurodynamic parameters in female REG and EEG is responsive to the ovarian-menstrual cycle.

Almost all cases of cerebral weather sensitivity of women were objectified in the post-ovulatory period, whereas in the preovulatory period episodes of weather sensitivity were only singular.

Key words: normal weather sensitivity, weather, rheoencephalogram, electroencephalogram, gender differences, adaptation.

УДК 581.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИОНООБМЕННОГО СУБСТРАТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ В БИОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ЗАМКНУТОСТИ

Тихомирова Н.А.¹, Ушакова С.А.^{1,2}, Куденко Ю.А.¹, Анищенко О.В.¹, Тихомиров А.А.^{1,2}

¹Институт биофизики Сибирского отделения РАН, Красноярск

²Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск

E-mail: n.tikhomirova@mail.ru

Целью работы явилось исследование возможности коррекции питательных растворов, содержащих минерализованные экзометаболиты человека, с помощью ионообменного субстрата при культивировании пшеницы в биолого-технической системе жизнеобеспечения (БТСЖО) с высокой степенью замкнутости. Объектами исследования были растения пшеницы *Triticum aestivum* L. линия 232 селекции Г.М. Лисовского. Растения выращивали в вегетационной камере методом гидропоники на керамзите в конвейерном режиме при круглосуточном освещении. Для снятия лимитов обеспечения растений элементами минерального питания проводили коррекцию питательного раствора. В экспериментальном варианте в питательный раствор закладывали ионообменный субстрат «БИОНА-312», в контрольном варианте коррекцию питательного раствора проводили минеральными солями. Способ коррекции растворов не оказал значительного влияния на продуктивность, CO_2 -газообмен и минеральный состав растений пшеницы. Использование ионообменного субстрата позволяет упростить технологию выращивания растений на растворах с добавлением экзометаболитов человека.

Ключевые слова: ионообменный субстрат, биолого-техническая система жизнеобеспечения, утилизация экзометаболитов человека, разновозрастной конвейер пшеницы.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 33–38.

Одной из наиболее актуальных задач совершенствования круговоротных процессов в биолого-технических системах жизнеобеспечения (БТСЖО) является создание технологий, обеспечивающих контроль и управление за включением в круговорот экзометаболитов человека [1–4]. Для БТСЖО космического назначения это позволило бы повысить степень замкнутости внутрисистемного массообмена за счет вовлечения в него жидких и твердых выделений человека. В Институте биофизики СО РАН определенные успехи были достигнуты при использовании минерализованных по методу Ю.А. Куденко экзометаболитов человека

для выращивания высших растений. В данной работе было показано, что минерализованные экзометаболиты человека могут быть применены в качестве основы для приготовления питательного раствора при длительном последовательном выращивании разновозрастного конвейера пшеницы и растений *Salicornia europaea* L. [5]. Однако минеральный состав экзометаболитов не является полностью сбалансированным для выращивания растений, и в течение вегетации необходимо проводить коррекцию питательного раствора по некоторым макро- и микроэлементам. Мы предположили, что использование ионообменного субстрата «БИОНА-312», заправленного всеми необходимыми для растений ионами, также может являться удобным способом коррекции раствора, приготовленного на основе минерализованных экзометаболитов человека, без дополнительного внесения в раствор минеральных солей. Целью работы являлось исследование возможности коррекции питательных растворов, приготовленных на основе минерализованных экзометаболитов человека, с помощью ионообменного субстрата «БИОНА-312» при выращивании растений пшеницы в БТСЖО.

Методика

Ионообменный субстрат «БИОНА-312» был разработан и предоставлен сотрудниками Института физической и органической химии НАН Беларуси [6–8]. «БИОНА-312» – это смесь ионообменного субстрата «БИОНА-112» (56 % от массы) и естественного цеолит-клиноптилолита (44 % от массы).

В качестве объектов исследования были выбраны растения пшеницы *Triticum aestivum* L. линия 232 селекции Г.М. Лисовского [9]. Растения пшеницы выращивали при круглосуточном освещении методом гидропоники на керамзите в вегетационных сосудах из нержавеющей стали, с посевной площадью 0,032 м². Полив растений осуществляли посредством подтопления субстрата в течение 3 мин каждые 6 ч. Источником света являлись металлогалогенные

Таблица 1

Содержание минеральных элементов в минерализованных экзометаболитах человека, ионообменном субстрате «БИОНА-312» и сухой биомассе пшеницы, г (в расчете на дозы веществ, указанных в столбце 1; ошибка не превышает 10 % от измеряемой величины)

Образец	N	P	S	K	Na	Ca	Mg
Потребности пшеницы за вегетацию (для формирования 100 г сухой биомассы)	2,1	0,59	0,23	2,19		0,24	0,19
Минерализованные экзометаболиты, 500 мл	0,35	0,13	0,14	0,50	0,90	0,01	0,01
Ионообменный субстрат «БИОНА-312», 260 г	2,86	0,50	1,33	2,76	0,42	7,67	2,31

лампы ДМЗ-3000. Интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) на уровне верхних листьев составляла 180 ± 10 Вт/м². Температуру воздуха в камере поддерживали на уровне 25 ± 1 °С при относительной влажности воздуха 60–70 %. Концентрация CO₂ была естественной (0,034 %).

Плотность посева составляла 1125 растений на 1 м². Длительность вегетации (от всходов до созревания) растений пшеницы продолжалась 70 сут. Конвейер пшеницы был представлен 5 возрастами с шагом 14 сут от посева. Площадь посева конвейера пшеницы занимала 0,16 м².

Для повышения замкнутости массообмена по основным биогенам в БТСЖО растения выращивали с использованием растворов, приготовленных на основе минерализованных по методу Ю.А. Куденко экзометаболитов человека [5]. После минерализации экзометаболитов перекисью водорода мочевины, оставшуюся в растворе после физико-химического окисления, подвергали ферментативному разложению уреазой соевой муки. После этого аммиак отгоняли. Общее содержание азота в минерализованных экзометаболитах после разложения мочевины и отгонки аммиака составляло 700 мг/л, так как данный метод физико-химического окисления не дает 100 %-ной минерализации органического вещества.

Предварительный расчет количества минерализованных экзометаболитов, которые необходимо вносить в питательный раствор, был сделан исходя из того, что при выращивании растений пшеницы в «БИОС-3» урожай зерна составлял около 1,1 кг/м² (на сухой вес) при Kхоз 39–42 % [9]. Следовательно, каждые 14 сут в конвейере на площади 0,16 м² должно нарастать примерно 0,4 кг сухой общей биомассы пшеницы, содержащей 2,1 % азота, или в среднем 8 г азота. Таким образом, каждые 14 сут в раствор необходимо было вносить 8 г азота. Поскольку минеральный состав экзометаболитов человека не является оптимальным для выращивания растений, необходимо было проводить коррекцию питательного раствора для снятия лимитов обеспечения растений пшеницы

минеральным питанием. Таким образом, эксперимент включал 2 варианта: опыт и контроль. В опыте в бак с питательным раствором для полива всего подопытного конвейера пшеницы закладывали ионообменный субстрат в нейлоновых мешочках и впоследствии никакой коррекции не проводили, а в контроле коррекцию проводили минеральными солями.

Содержание минеральных элементов в минерализованных экзометаболитах человека, ионообменном субстрате «БИОНА-312» и потребности пшеницы в минеральных элементах за вегетацию приведены в табл. 1. Данные по содержанию минеральных элементов в ионообменном субстрате «БИОНА-312» предоставлены ведущим научным сотрудником организации – изготовителем субстрата (Институт физической и органической химии НАН Беларуси) В.В. Матусевичем. В опыте при уборке созревших растений из бака с питательным раствором изымали нейлоновый мешочек с ионообменным субстратом, заложенный во время посева убираемых растений. Таким образом, ионообменный субстрат в питательный раствор в опыте, используемый для полива всех возрастов пшеницы, закладывали каждые 14 сут, изымая ионообменный субстрат, находившийся в растворе в течение 70 сут. Использованный ионообменный субстрат может быть повторно заправлен всеми необходимыми для растений элементами [7]. Коррекцию питательного раствора минеральными солями в контроле проводили в соответствии с результатами анализа минерального состава раствора 2 раза в неделю. pH контрольных и опытных растворов поддерживали на уровне 7–7,3 посредством ежесуточной коррекции азотной кислотой.

Состояние растений оценивали по продуктивности, CO₂-газообмену и минеральному составу. Концентрацию CO₂ в герметичной вегетационной камере измеряли с помощью газоанализатора LI-820 (LI-COR, США). Внешний CO₂-газообмен оценивали по следующим характеристикам: видимый фотосинтез, выделение CO₂ на свету (световое дыхание)

(Рвид, R). Видимый фотосинтез оценивали по изменению концентрации CO_2 в замкнутом объеме в единицу времени. Дыхание на свету оценивали по величине темнового дыхания в первые 20 мин после выключения света. Минеральные элементы определяли с помощью следующих методик и приборов: K, Na – методом пламенной фотометрии на приборе Flapho-4, Ca, Mg – методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре AAS-IN, N – методом фотоколориметрии по Кьельдалю, P – методом фотоколориметрии, S – методом титриметрии [5]. В таблицах и на рисунках представлены данные в виде средних арифметических значений. Достоверность различий между средними определяли по критерию Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Как показали результаты анализов, концентрация нитратного азота в питательном растворе опыта поддерживалась на уровне 20–45 мг/л. В контроле в результате коррекции раствора минеральными солями концентрация нитратного азота в питательном растворе колебалась от 40 до 110 мг/л. Вероятно, высвобождение ионов из ионообменного субстрата происходило постепенно, по мере потребления азота растениями. Концентрация натрия в питательных растворах достоверно не отличалась между вариантами и варьировала в диапазоне 220–320 мг/л. Как было показано ранее [9], натрий в такой концентрации не оказывает ингибирующего воздействия на растения пшеницы. Содержание остальных макроэлементов (K, Mg, P, S) в растворах опыта и контроля на протяжении эксперимента было стабильным и соответствовало количеству данных элементов в стандартном растворе Кнопа, обеспечивающему нормальный рост и развитие растений [10].

В результате использования ионообменного субстрата для коррекции питательных растворов у подопытных растений 2 первых генераций наблюдалось некоторое снижение массы зерна на 25 % (1-я генерация) и на 18 % (2-я генерация) по сравнению с соответствующими контрольными растениями (рис. 1). При этом масса корней подопытных растений была на 40 % (1-я генерация) и 56 % (2-я генерация) ниже, чем у контрольных растений. Сухая масса соломы подопытных растений 1-го поколения (генерации) была на 21 % ниже по сравнению с контролем, а у растений 2-го поколения не наблюдалось достоверных отличий между вариантами по данному параметру. Способ коррекции растворов не оказал значимого влияния на массы зерна и соломы растений 3-го поколения, тогда как масса корней подопытных растений была на 40 % ниже, чем в контроле (см. рис. 1).

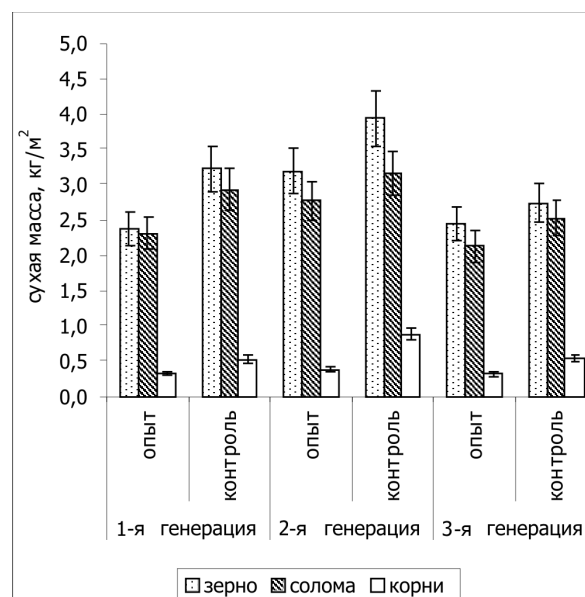


Рис. 1. Сухая масса растений пшеницы, выращенных на питательных растворах с добавлением минерализованных экзосметаболитов человека. Здесь и на рис. 2, 3: опыт – коррекция раствора с использованием ионообменного субстрата «БИОНА-312», контроль – коррекция раствора минеральными солями

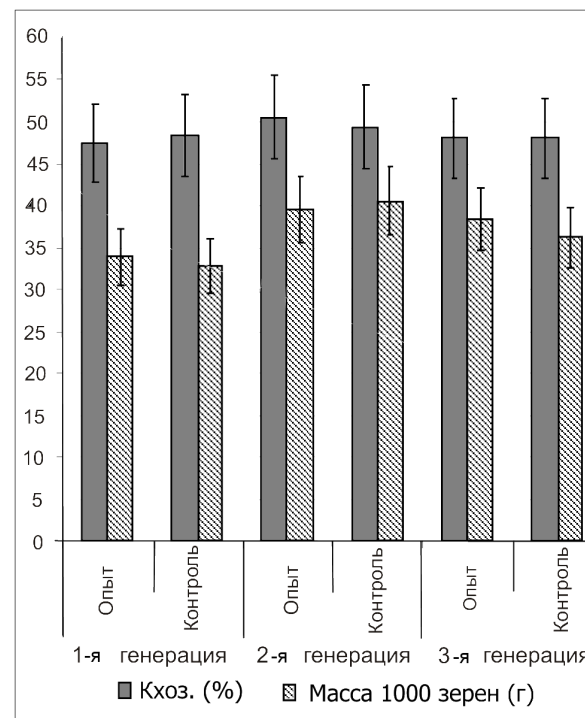


Рис. 2. Масса 1000 зерен и коэффициент хозяйственной эффективности (Kхоз) растений пшеницы, выращенных на питательных растворах с добавлением минерализованных экзосметаболитов человека

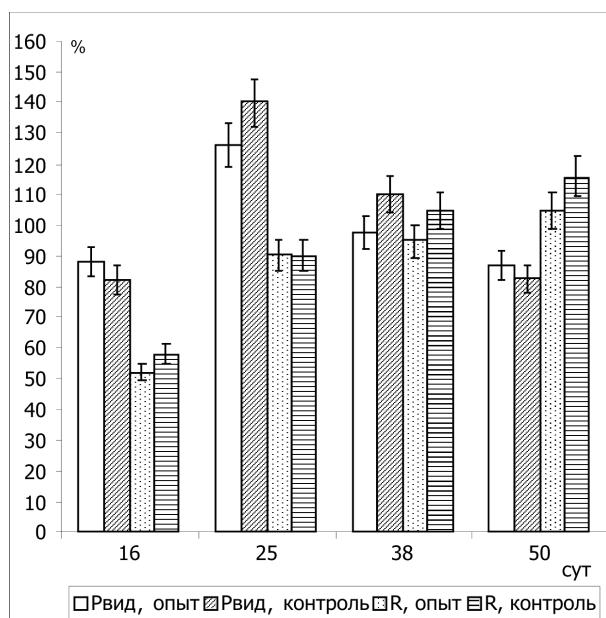


Рис. 3. Видимый фотосинтез (Рвид) и дыхание (R) растений пшеницы 3-й генерации (ммоль CO₂/ч/м²), выращенных на питательных растворах с добавлением минерализованных экзометаболитов человека

На протяжении всего эксперимента не наблюдалось достоверных отличий между вариантами по массе 1000 зерен (рис. 2). Следует отметить, что в результате эксперимента было получено зерно высокого качества. В среднем масса 1000 зерен составляла 38 г, что выше массы 1000 зерен растений пшеницы, выращенных в СЖО «БИОС-3» на стандартном растворе Кнопа [9]. Кхоз в течение эксперимента значительно не менялся и также был относительно высоким – около 48 %.

Внешний CO₂-газообмен растений пшеницы 3-й генерации на разных этапах вегетации представлен на рис. 3. Растения пшеницы наиболее интенсивно поглощали CO₂ в возрасте от 25 до 50 сут, как в подопытном, так и в контрольном варианте. Способ коррекции питательных растворов не оказал значимого влияния на интенсивность видимого фотосинтеза и дыхания растений на протяжении всего периода вегетации (см. рис. 3).

Скорости роста растений опыта и контроля 3-й генерации на разных этапах развития достоверно не различались (табл. 2). Наиболее активный прирост биомассы наблюдали у растений в возрасте от 25 до 50 сут (см. табл. 2), что хорошо согласуется с данными по газообмену растений (см. рис. 3).

Способ коррекции растворов не оказал существенного влияния на относительное содержание макроэлементов в зерне пшеницы (табл. 3). Относительное содержание натрия в съедобной части растений было незначительным. Более высокое содержание азота в растворах контроля по сравнению с опытом не

сказалось на накоплении азота в надземной биомассе растений на ранних этапах развития, и различия между вариантами были в пределах ошибки. Однако в соломе 70-суточных контрольных растений относительное содержание азота было в 1,8 раза выше по сравнению с подопытными растениями. Кроме того, в контроле наблюдалась тенденция к большему накоплению кальция в надземной биомассе растений, чем в опыте. Это объясняется технологией внесения нитратной формы азота при коррекции контрольного раствора. Различия по относительному содержанию остальных макроэлементов в надземной биомассе подопытных и контрольных растений были недостоверны.

Выводы

1. Выращивание нескольких поколений растений пшеницы в разновозрастном конвейере на нейтральном субстрате с добавлением минерализованных экзометаболитов человека показало, что можно откорректировать раствор по недостающим для растений минеральным элементам посредством внесения ионообменного субстрата в питательный раствор.

2. В результате использования «БИОНА-312» для коррекции питательного раствора был получен высокий урожай пшеницы, достоверно не отличающийся от урожая растений контрольного варианта, в котором недостаток элементов в питательном растворе восполнялся за счет добавления минеральных солей.

3. Несмотря на высокое содержание нитратного азота в исходном ионообменном субстрате, результаты исследования показали, что только 1/5 азота выходила в раствор. В этой связи возникли определенные лимиты по азоту для растений. Возможно, внесение ионообменного субстрата непосредственно в керамзит позволит решить проблему доступности азота для растений.

4. Применение ионообменного субстрата для коррекции раствора значительно упростит технологию культивирования растений в БТСЖО при использовании экзометаболитов человека в качестве источников минерального питания растений.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института физической и органической химии НАН Беларуси, предоставившим ионообменный субстрат «БИОНА-312» для проведения совместных исследований.

Работа была выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных Академий наук на 2013–2020 гг. по теме № 56.1.4 «Оценка устойчивости ценозов высших растений замкнутых экологических систем, включающих человека, к выращиванию на питательных средах из минерализованных органических отходов».

Таблица 2

Сухая масса растений пшеницы 5 возрастов 3-й генерации, выращенных в конвейерном режиме на питательных растворах с добавлением минерализованных экзометаболитов человека						
Вариант	Возраст, сут	Сухая масса 1 растения, г				
		зерна	соломы	половы	корней	всего растения
Опыт	16	-	0,11 ± 0,01	-	0,05 ± 0,01	0,16 ± 0,02
	25	-	0,36 ± 0,04	-	0,10 ± 0,01	0,47 ± 0,05
	38	-	1,55 ± 0,16	-	0,24 ± 0,02	1,79 ± 0,18
	50	0,60 ± 0,06	1,40 ± 0,14	0,55 ± 0,06	0,44 ± 0,04	2,98 ± 0,30
	70	2,26 ± 0,3	1,39 ± 0,14	0,57 ± 0,06	0,32 ± 0,04	4,54 ± 0,54
Контроль	16	-	0,12 ± 0,01	-	0,04 ± 0,01	0,16 ± 0,02
	25	-	0,30 ± 0,03	-	0,09 ± 0,01	0,39 ± 0,04
	38	-	1,73 ± 0,17	-	0,26 ± 0,03	2,00 ± 0,20
	50	0,55 ± 0,06	1,68 ± 0,17	0,84 ± 0,08	0,48 ± 0,05	3,55 ± 0,36
	70	2,49 ± 0,25	1,54 ± 0,15	0,83 ± 0,08	0,48 ± 0,05	5,34 ± 0,53

Примечание. Здесь и в табл. 3: опыт – коррекция раствора с использованием ионообменного субстрата, контроль – коррекция раствора минеральными солями.

Таблица 3

Относительное содержание макроэлементов в надземной биомассе растений пшеницы 3-й генерации, выращенных в конвейерном режиме на питательных растворах с добавлением минерализованных экзометаболитов человека, % на сухое вещество (ошибка не превышает 10 % от измеряемой величины)									
Вариант	Возраст, сут	Часть растения	K	P	Ca	Mg	Na	S	N
Опыт	16	листья	5,8	0,5	0,5	0,3	0,1	0,3	4,7
	25	листья	4,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,3	3,1
	38	солома и колосья	2,4	0,3	0,4	0,2	0,1	0,3	2,8
	50	зерно	0,6	0,4	0,1	0,2	0,01	0,2	2,7
		солома и полова	2,7	0,1	0,4	0,2	0,1	0,3	1,5
	70	зерно	0,4	0,4	0,1	0,2	0,01	0,2	2,9
		солома и полова	2,7	0,1	0,9	0,4	0,3	0,3	0,9
Контроль	16	листья	5,6	0,6	0,5	0,3	0,1	0,4	5,4
	25	листья	4,1	0,4	0,6	0,2	0,1	0,3	3,3
	38	солома и колосья	2,6	0,3	0,5	0,2	0,1	0,3	2,5
	50	зерно	0,7	0,5	0,2	0,2	0,01	0,2	2,5
		солома и полова	2,1	0,2	0,5	0,2	0,1	0,2	1,7
	70	зерно	0,5	0,4	0,1	0,2	0,01	0,2	2,8
		солома и полова	2,3	0,2	0,9	0,4	0,3	0,3	1,6

Список литературы

1. Fukuda S., Tsuga Sh., Arai R. et al. Preliminary system integration tests of water revitalization sub-system in CEEF // Proceedings of the International Symposium on Closed Habitation Experiments and Material Circulation Technology. Rokkasho, Japan, 2004. P. 68–75.
2. Tsuga S., Tako Y., Endo M. et al. Research and development of the waste processing system in the closed ecology experiment facilities // Proceedings of the International Symposium on Application of a Closed Experimental System to Modeling of C14 Transfer in the Environment. Rokkasho, Japan, 2007. P. 119–126.
3. Lasseur C., Brunet J., de Weever H. et al. MELISSA: the European project of closed life support system // Gravit. and Space Res. 2010. V. 23. P. 3–12.
4. Wheeler R.M. Plants for human life support in space: from Myers to Mars // Ibid. P. 25–36.
5. Ushakova S.A., Tikhomirov A.A., Tikhomirova N.A. et al. A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of biotechnical life supports // Advances in Space Res. 2012. V. 50. P. 932–940.
6. Солдатов В.С., Перышкина Н.Г. Искусственные почвы для растений. Минск, 1985.
Soldatov V.S., Peryshkina N.G. Artificial soils for plants. Minsk, 1985.
7. Солдатов В.С., Перышкина Н.Г., Хорошко Р.П. Ионитные почвы. Минск, 1978.
Soldatov V.S., Peryshkina N.G., Khoroshko R.P. Ion exchanger soils. Minsk, 1978.
8. Matraszek R., Szymańska M., Chomczyńska M., Soldatov V. Productivity and chemical composition of tomato and cucumber plants growing in nickel-polluted soils fertilized with Biona-312 // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2010. № 41. P. 155–172.
9. Gitelson I.I., Lisovsky G.M., MacElroy R.D. Manmade closed ecological systems. London; N.Y., 2003.
10. Коваль С.Ф., Шаманин В.П. Растение в опыте. Омск, 1999.
Koval S.F., Shamanin V.P. Plant in experiment. Omsk, 1999.

USE OF THE ION-EXCHANGE SUBSTRATE TO OPTIMIZE MINERAL NUTRITION OF PLANTS WITHIN A BIO-ENGINEERING LIFE SUPPORT SYSTEM WITH A HIGH LEVEL OF CLOSURE

Tikhomirova N.A., Ushakova S.A., Kudenko Yu.A., Anishchenko O.V., Tikhomirov A.A.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 33–38

Purpose of the work was to test manageability of nutrient solutions containing mineralized human exometabolites by using an ion-exchange substrate (IES) for cultivating wheat in a bio-engineering life support system with a high level of closure. Object of the investigation was wheat Triticum aestivum L. (Lysovsky cv. I. 232). Crops were raised on clayite in a growth chamber of a hydroponic conveyor system under continuous light. Correction of nutrient solution was to lift the limits of crop supply with minerals. The experimental crop grew in nutrient solution with immersed IES «BIONA-312»; nutrient solution for the control crop was corrected by adding mineral salts. Solution correction did not have a noteworthy effect on the yield, CO₂-gas exchange or mineral composition of wheat plants. IES makes simple the technology of plant cultivation on solutions enriched with human exometabolites.

Key words: ion-exchange substrate, bio-engineering life support system, human exometabolites utilization, uneven-aged wheat conveyor.

Поступила 27.03.2014

УДК 57.081.2

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ И ВОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА КОРНЕОБИТАЕМЫХ СРЕД ДЛЯ ОРАНЖЕРЕЙ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Подольский И.Г.¹, Стругов О.М.¹, Бингхем Г.Е.²

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

²Университет штата Юта, Логан, США
E-mail: igorp@imbp.ru

Исследования выполняли на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) в рамках программы космического эксперимента «Растения-2» на этапах МКС-5 – МКС-22 в космической оранжерее «Лада». С помощью комплекса из 6 точечных датчиков влагосодержания корнеобитаемой среды («Турфейс», частицы диаметром 1–2 мм) и 4 тензиометров в корневых модулях (КМ) при проведении экспериментов проводили мониторинг влагосодержания и водного потенциала корнеобитаемой среды (КС).

Целью исследований являлись подтверждение работоспособности датчиков влагосодержания и водного потенциала в условиях длительного космического полета (КП) и оценка их эксплуатационных характеристик. Показано, что при среднем влагосодержании КС 80 % в КМ эксплуатационные погрешности датчиков влагосодержания не превышают $\pm 1,5$ %. Анализ динамики показаний тензиометров в идентичных условиях позволяет утверждать, что эксплуатационные погрешности измерения водного потенциала КС не превышают ± 111 Па.

Ключевые слова: корнеобитаемая среда, космическая оранжерея, влагосодержание, водный потенциал, экспериментальная погрешность датчиков, российский сегмент Международной космической станции.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 39–45.

При выращивании растений в космическом полете (КП) необходимо иметь данные о влагосодержании корнеобитаемой среды (КС) с целью поддержания его на оптимальном уровне и обеспечения надлежащей диффузии кислорода в КС. В данной работе под влагосодержанием КС подразумевается отношение содержания воды в данный момент времени в процентах к количеству воды, насыщающему КС до полной влагоемкости.

Для регулирования влагосодержания КС предлагаются различные методы. Влагосодержание КС является одной из важнейших характеристик interface-климата – условий около конкретного органа – корня [1]. При создании системы жизнеобеспечения растений в условиях КП остается

актуальной задача управления данным параметром. Несмотря на успехи при выращивании растений в условиях КП (проведено 17 экспериментов на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС)) [2], метрологический контроль влагосодержания КС и его погрешности для различных методов регулирования водного режима остаются актуальными. Это связано с тем, что из-за отсутствия гравитационного механизма передвижения жидкости в условиях КП могут существовать неограниченный объем капиллярно-подвешенной влаги в КС и образовываться изолированные объемы «защемленного» воздуха. Эти объемы не будут обмениваться газами с атмосферой, что может приводить к гипоксии в КС [3–7]. Любой датчик работает в сложных, изменяющихся во времени условиях. Это, прежде всего, обусловлено тем, что процесс измерения – сложное, многогранное явление, характеризующееся множеством воздействующих на датчик факторов (как со стороны объекта КС, так и со стороны внешней среды, температуры, источников питания и т.д.). Каждый из этих факторов может быть измерен в отдельности, но в условиях КП, когда на датчик действует комплекс факторов, провести измерения нельзя. При исследовании датчиков в лабораторных условиях все значения величин, влияющих на работу датчика, могут поддерживаться в узких пределах. Такие оговоренные в технической документации условия поверки или градуировки принято называть нормальными, а погрешность датчика, возникающую в этих условиях, – основной погрешностью. В эксплуатационных условиях КП при установке датчиков, например, в космические оранжереи в условиях длительных КП им придется работать при изменениях, происходящих в КС, что приведет к появлению погрешностей, естественно, больших, чем в нормальных (лабораторных) условиях. Погрешность датчиков в этих условиях называется эксплуатационной.

В настоящее время предлагаются разные методы выращивания растений для условий КП, которые отличаются между собой по типу КС, способу

Таблица 1

Длительность эксплуатации оранжерейного устройства «Лада» в автоматическом режиме на российском сегменте МКС

Этапы МКС	Длительность эксплуатации, сут
МКС-5	36
МКС-6	69
МКС-7	75
МКС-8	75
МКС-9	96
МКС-10	89
МКС-11	94
МКС-12	79
МКС-13	85
МКС-16	87
МКС-19	46
МКС-20	34
МКС-21	32
МКС-22	73
Всего	970

подачи жидкости (воды или питательного раствора) в КС, а также по конструктивному решению отдельных элементов культивационных устройств. С точки зрения газожидкостного обеспечения КС для условий КП различными разработчиками предлагаются 2 системы подачи жидкости к корням растений. Первая – путем принудительной дозированной подачи жидкости и воздуха в КС через распределительные перфорированные трубки по сигналу с датчика влагосодержания КС [8]. Вторая – путем подачи жидкости в КС с последующим формированием заданного влагосодержания или стока жидкости за счет отрицательного давления на границе капиллярно-пористого элемента, выполненного в виде пластины [9] или трубки [10–13]. Система с принудительной подачей жидкости в КС длительное время надежно эксплуатировалась в условиях КП [2]. Длительность эксплуатации оранжерейного устройства «Лада» в автоматическом режиме на РС МКС приведена в табл. 1. Общее время эксплуатации составляет 970 сут. Применение систем 2-го типа не имело столь длительной эксплуатации в условиях КП [13] и составляет всего 90 сут. Следует отметить, что устойчивые режимы переноса жидкости в системах 2-го типа могут обеспечиваться лишь в ограниченном слое КС при наличии неразрывности потока воды в системах водообеспечения КС. Необходимо помнить об изменении гидрофизических характеристик КС в условиях КП, которые выявлены в ранее выполненных исследованиях на этапе МКС-5 [14, 15]. Кроме того,

изменение характерного порового пространства КС при развитии корневой системы, засоление, активное развитие микроорганизмов и засорение капиллярно-пористого управляющего элемента [16] ставит под сомнение перспективность длительной эксплуатации таких систем.

Методика

В Государственном научном центре РФ – Институте медико-биологических проблем РАН (ГНЦ РФ – ИМБП РАН) в рамках договора между Исследовательским центром Университета штата Юта, (Лаборатория космической динамики) и ГНЦ РФ – ИМБП РАН было разработано оранжерейное устройство «Лада», которое длительное время эксплуатировалось на РС МКС. Внешний вид оранжереи представлен на рис. 1. Теоретическое обоснование теплоимпульсного метода измерения влагосодержания КС для оранжерейного устройства «Лада» представлено в работе [17]. Анализ погрешностей метода измерения влагосодержания КС для земных условий описан в работе [18]. В работе показано, что в диапазоне влагосодержания КС 20–100 % от полной влагоемкости КС погрешность метода измерения для земных условий не превышает $\pm 1,5$ %. Задачей данной работы была оценка реальной эксплуатационной погрешности датчиков влагосодержания и водного потенциала КС в условиях КП. Одним из важнейших критериев совершенства устройства космических оранжерей

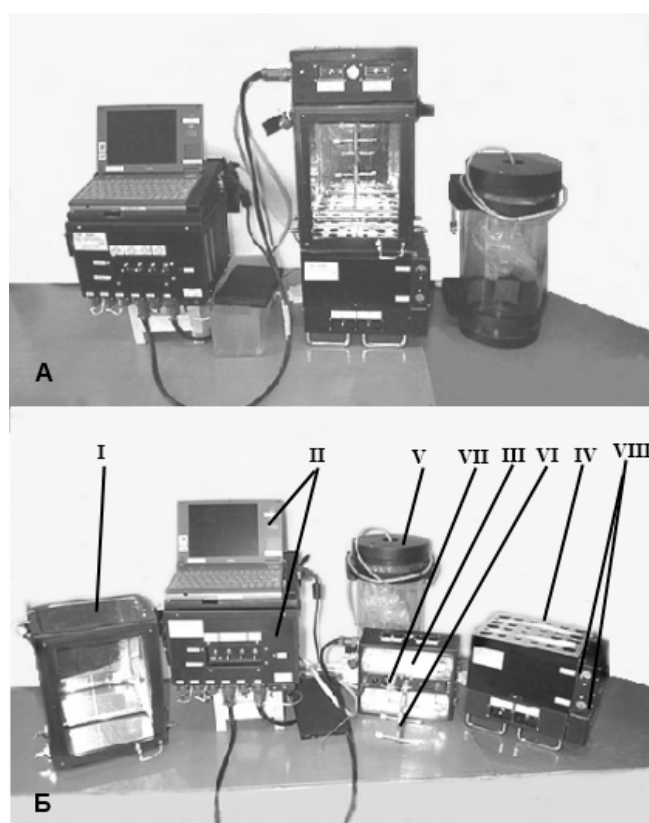


Рис. 1. Оранжерея «Лада» в сборе (А) и составляющие ее блоки (Б): I – листовая камера; II – блок управления и контроля; III – блок освещения; IV – корневой модуль; V – емкость для воды; VI – стойка с датчиками; VII – видеокамера; VIII – насосы

и технологий выращивания растений в настоящее время является работоспособность устройства и оценка его эксплуатационных характеристик в условиях КП. Такие исследования необходимы для понимания энергетических процессов влагопереноса в КС и выбора метода регулирования влагосодержания КС оранжерейных устройств в условиях КП.

В экспериментах, проведенных на борту РС МКС, оранжерея обеспечивала сбор, регистрацию и хранение данных о параметрах среды в зоне вегетации и окружающей среды, а также поддержание заданного влагосодержания КС. Посадка семян производилась между 2 сомкнутыми фитилями, которые образуют 4 посадочные полосы на КМ. КМ был заполнен КС, в качестве которой использовался субстрат «Турфейс» (1–2 мм). В КС вносили удобрения пролонгированного действия «Осмокот». Фитили были соединены с водоподводящими, пористыми трубками, расположенными в КС, и обеспечивали быстрый транспорт воды. Подача воды в пористые трубки осуществлялась из канистры для воды через гибкий трубопровод с помощью перистальтического насоса. Таким способом осуществлялась подача воды в КС и далее к

корневой системе растений. В течение всего срока вегетации растения находились внутри принудительно вентилируемой и освещаемой листовой камеры. Заданные параметры вентиляции обеспечивали конструкцией воздухопроводов в корневом модуле и 2 вытяжными вентиляторами в блоке освещения. Таким способом обеспечивались транспирация и фотосинтез растений. Оранжерея являлась открытой системой, так как свободно сообщалась с атмосферой МКС. В оранжерее постоянно осуществлялся контроль параметров окружающей среды. К этим параметрам относятся температура, давление, влажность и концентрации кислорода и углекислого газа. К контролируемым параметрам при выращивании растений относились распределение температуры и влагосодержания в КС, распределение температуры и облученности в листовой камере, влажность воздуха на выходе из листовой камеры и температура поверхности листа. Дополнительно осуществлялся визуальный контроль растений на разных стадиях вегетационного цикла с помощью встроенной цифровой фотокамеры. К регулируемым параметрам относятся влагосодержание КС, продолжительность периода освещения и вентилирования растений в течение суток. Эти параметры могли задаваться и автоматически поддерживаться в процессе вегетации растений. Функциональная схема оранжереи, поясняющая основные связи ее составных частей, представлена на рис. 2.

Основной частью блока управления являлась коммерческая система управления и сбора данных Campbell Scientific CR10X (далее по тексту – CR10X) с 2 дополнительными модифицированными модуляторными платами CSI AM25T. CR10X имела возможность работать как одновременно, так и раздельно с 2 модулями выращивания растений и была синхронизирована по времени со встроенным компьютером. CR10X обеспечивала измерение заданных параметров, сбор, хранение и передачу на встроенный компьютер данных, а также осуществляла управление исполнительными механизмами (светильниками, вентиляторами, насосами). При нормальной работе данные на CR10X усредняли и передавали на жесткий диск встроенного компьютера каждые 20 или 60 мин, в зависимости от заданного периода усреднения данных. Усредненные данные хранили также и в памяти CR10X, при этом объем памяти CR10X позволял хранить данные за 50 сут эксперимента при усреднении данных за 60 мин. На блоке освещения были размещены 2 светильника, 2 вентилятора и цифровая фотокамера, а также датчики, контролирующие среду в листовой камере. К контролируемым в листовой камере параметрам относятся: распределение температур воздуха от входа в листовую камеру до выхода из нее, распределение облученности от светильника до корневой модуля (фотодиодные датчики), влажность воздуха на

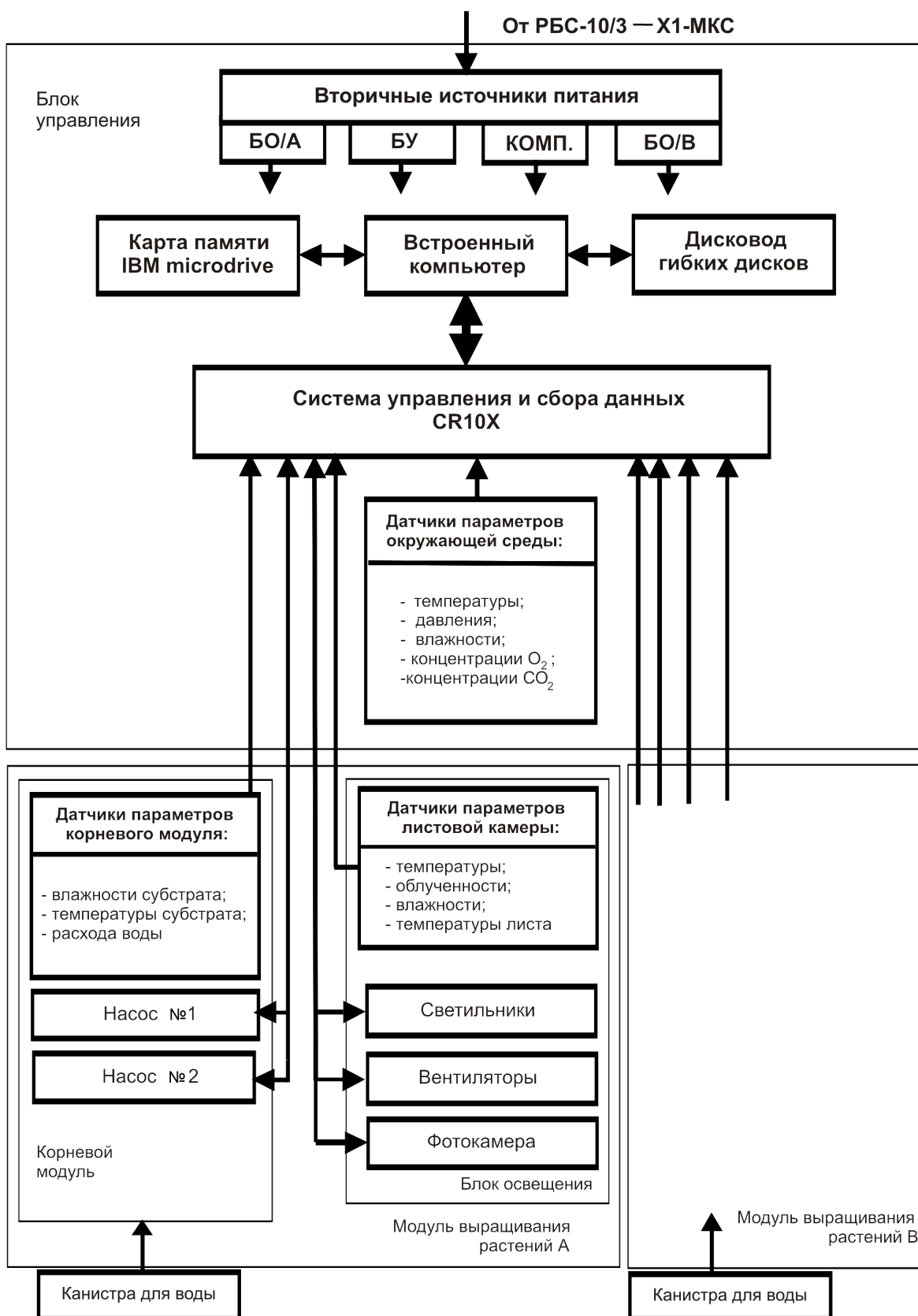


Рис. 2. Функциональная схема космической оранжереи «Лада»

выходе из листовой камеры и температура поверхности листа растений (инфракрасный оптический датчик).

В КМ были размещены 2 перистальтических насоса и датчики, контролирующие параметры КС, к которым, прежде всего, относятся влагосодержание КС в 6 зонах, температура КС в тех же 6 зонах и расход воды. Датчики имели 3 типоразмера: короткий (К) – 40 мм, длинный (Д) – 70 мм, особо длинный (ОД) – 100 мм. Для получения вспомогательной информации о состоянии КС использовали 4 тензиометрических датчика для измерения потенциала влаги КС. Схема размещения датчиков в кюветах позволяла производить мониторинг в различных частях КМ. Комплекс датчиков обеспечивал измерение и регистрацию влагосодержания и водного потенциала КС. Для выбора пороговых значений влагосодержания КС при выращивании растений в условиях КП использовалась методика, описанная ранее в работе [19]. Мониторинг производился с периодичностью измерения 1 раз в 1 ч. Тензиометрические датчики начинали действовать после заправки водой насосом № 2. Насос № 1 обеспечивал подачу воды в КС.

Датчики влагосодержания КС теплоимпульсного типа, позволяли также измерять и температуру КС. Расход воды измерялся во время работы насосов с помощью датчиков Холла. Оба насоса подавали воду из канистры для воды через гибкий трубопровод, который мог подсоединяться только к 1 из 2 входных гидроразъемов КМ, который в свою очередь соединялся с соответствующим насосом.

В процессе выращивания растений осуществлялась регистрация основных параметров среды обитания. С использованием управляющей программы формировалась информация о параметрах среды обитания растений. На основе анализа числовой и графической информации проводилась оценка погрешности измерений датчиков влагосодержания КС и тензиометров.

Результаты и обсуждение

Оценка экспериментальной погрешности датчиков влагосодержания и водного потенциала КС при выращивании растений в условиях КП проводили по данным, полученным в эксперименте при выращивании растений на этапе МКС-6 при постоянном среднем влагосодержании КС – 80 % (рис. 3).

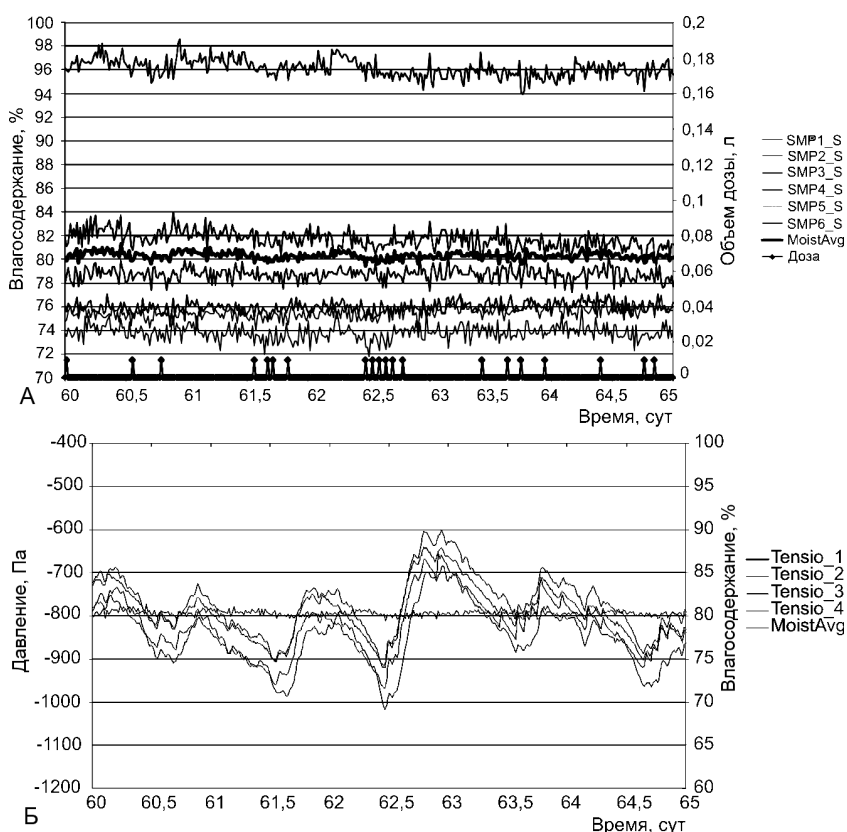


Рис. 3. Мониторинг влагосодержания (А) и потенциала влаги КС (Б) на этапе стабильного уровня влагосодержания

Измерения производили с периодичностью 1 раз в 20 мин в течение 10 сут. Погрешности всех датчиков влагосодержания SMP1_S...SMP6_S оценивали как разность между измеренным значением величины влагосодержания КС и ее истинным значением. При изменении истинного значения SMP1_S (t) по линейному закону значения в силу влияния погрешностей измерений могут быть и больше, и меньше истинных значений. Оценка погрешности производилась на базе методов теории вероятностей и математической статистики. Как правило, истинное значение измеряемой величины остается неизвестным и вместо него принимается некоторое среднее арифметическое значение, которое при неограниченно большом числе наблюдений называется математическим ожиданием. После этого находилось наибольшее случайное отклонение от среднего значения. Для оценки экспериментальной погрешности датчиков влагосодержания и водного потенциала КС использовался этап эксперимента, когда вода в КМ не подавалась (38 измерений). Эксплуатационные погрешности датчиков влагосодержания и водного потенциала КС приведены в табл. 2.

Анализ показаний датчиков влагосодержания КС при проведении эксперимента в условиях КП показал,

Таблица 2

Эксплуатационные погрешности датчиков влагосодержания и водного потенциала КС

Датчики	Среднее значение	Максимум	Минимум	Эксплуатационные погрешности
Датчики влагосодержания				
SMP1_S	78,8 %	79,9 %	77,7 %	±1,1%
SMP2_S	74,1 %	75,2 %	72,8 %	±1,2%
SMP3_S	76,0 %	77,1 %	75,2 %	±1,2%
SMP4_S	96,7 %	98,2 %	95,4 %	±1,5%
SMP5_S	75,4%	76,2 %	74,4 %	±1%
SMP6_S	82,4 %	83,7 %	81 %	±1,4%
MoistAvg	80,5 %	81,3 %	79,7 %	±0,8%
Тензиометры				
Tensio_1	-803 Па	-753 Па	-872 Па	±69 Па
Tensio_2	-749 Па	-703 Па	-823 Па	±74 Па
Tensio_3	-789 Па	-733 Па	-900 Па	±111 Па
Tensio_4	-739 Па	-687 Па	-831 Па	±92 Па

что эксплуатационные погрешности 6 датчиков влагосодержания не превышают ±1,5 %. В результате получены максимально допустимые погрешности, в пределах которых система измерения и регулирования влагосодержания КС в КМ для условий КП может считаться технически приемлемой. Анализ данных 4 датчиков водного потенциала КС при проведении эксперимента в условиях КП показал, что при постоянном среднем влагосодержании КС (MoistAvg) – 80 % их погрешность не превышает ±111 Па.

При проведении эксперимента в космической оранжерее «Лада» не потребовалась коррекция порогового значения регулятора влагосодержания КС и величины разовой дозы воды для полива растений, как это ранее было в экспериментах с оранжереей «Свет» [16]. Алгоритм регулирования на основе зондирования влагосодержаний КС в 6 зонах корневых модулей (КМ) обеспечивает устойчивый режим среднего влагосодержания КС (MoistAvg). Показания комплекса датчиков влагосодержания КС дают возможность анализировать направление потоков воды в КС для условий КП на всех этапах экспериментов. Оперативные данные и их обработка во время проведения экспериментов позволяют управлять влагорегулированием в автоматическом режиме. Длительные летно-конструкторские космические испытания оранжереи «Лада» показали, что создана надежная технология, обеспечивающая благоприятные условия культивирования растений в условиях КП. Испытанные технические решения будут использованы для разработки будущих штатных оранжерейных устройств и организации interface-климата растений в условиях длительных КП. Для получения полной информации о возможности использования тензиометров, с

целью регулирования влагосодержания КС в КМ в условиях длительных КП необходимы дополнительные исследования.

Выводы

Зондирование влагосодержания корнеобитаемой среды обеспечивает благоприятные условия культивирования растений в космической оранжерее. Метрологический контроль влагосодержания корнеобитаемых сред и погрешности такого контроля для различных методов регулирования водного режима остаются актуальными. Испытанные технические решения будут использованы для разработки будущих штатных оранжерейных устройств и организации interface-климата растений в условиях длительных КП.

Работа выполнена при частичной поддержке кооперативного соглашения № K920566 между USURF/SDL и ГИЦ РФ – ИМБП РАН.

Список литературы

1. Парфенов Г.П. Невесомость и элементарные биологические процессы // Проблемы космической биологии. 1988. Т. 57. С. 268.
Parfenov G.P. Weightlessness and basic biological processes // Problems of Space Biology. 1988. V. 57. P. 268.
2. Сычев В.Н. Космические эксперименты по проблеме создания биологических систем жизнеобеспечения человека // Авиакосм. и экол. мед. 2013. Т.47. № 1. С. 43–46.
Sychev V.N. Space experiments on the development of biological systems for the human life // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2013. V. 47. № 1. P. 43–46.

3. Jones S.B., Heinse R., Podolskiy I.G. et al. Oxygen diffusion measurements in partially saturated porous media aboard the International Space Station. *Agronomy Abstracts*, ASA, Madison, WI. 2007.
4. Heinse R., Jones S.B., Podolskiy I.G. et al. An automated oxygen diffusion and water retention measurement system for microgravity. *Agronomy Abstracts*, ASA, Madison, WI. 2007.
5. Porterfield D.M., Matthews S.W., Daugherty C.J. et al. Spaceflight exposure effects on transcription, activity, and localization of alcohol dehydrogenase in roots of *Arabidopsis thaliana* // *Plant Physiol.* 1997. V. 113. P. 685-693.
6. Porterfield D.M., Barta D.J., Ming D.W. et al. ASTROCULTURE™ root metabolism and cytochemical analysis // *Adv. Space Res.* 2000. V. 26. № 2. P. 315-318.
7. Stout S.C., Kuang A., Musgrave M.E. et al. Poliar detection of hypoxia in *Brassica rapa* plants grown in microgravity // *Gravit. and Space Biol. Bul.* 1999. V. 13. № 1. P. 11.
8. Bingham G.E., Podolsky I.G., Levinskikh M.A. et al. LADA, a joint Russian – USA ISS plant greenhouse: continuing the Svet science and technology development tradition // *ASGSB Bul.* 2001. V. 15. № 1. P. 38.
9. Wright B.D., Bausch W.C., Knott W.M. Hydroponic system for microgravity plant experiments // *Trans. of ASAE.* 1988. V. 31. № 2. P. 440-446.
10. Bula R.J., Tibbitts. T.W., Morrow R.S. et al. Commercial involvement in the development of space-based plant grown technology // *Adv. Space Res.* 1992. V. 12. № 5. P. 5-10.
11. Tsao D.T., Okos M.R., Sager J.C. Controlling the water availability from a ceramic tube system subjected to non-standard gravities // 26th International Conference on Environmental Systems. 1996. Paper № 961505.
12. Berkovich Yu.A., Krivobok N.M., Smolianina S.O. et al. Development and Operation of a Space-Oriented Salad Machine «Phytoconveyer» // *SAE.* 2005. Paper 2005-01-2842.
13. Morrow R.C., Iverson J.T., Richter R.C., Stadler J.J. Biomass Production System (BPS) Technology Validation Test Results // International Conference on Environmental Systems, Colorado Springs, CO. 2004. Jul. 19. P. 1061-1070.
14. Bingham G.E., Podolsky I.G., Topham T.S., Mulholland J.M. Lada: The ISS plant substrate microgravity testbed // *SAE Technical.* 2002. Paper 2002-01-2388. SAE, Warrendale, PA.
15. Heinse R., Jones S.B., Tuller M. et al. Providing optimal root zone fluxes: Challenges of capillary-driven hysteresis water distributions in microgravity // *Ibid.* Paper 2009-01-2360. 2009. SAE, Warrendale, PA.
16. Jones S.B., Or D., Heinse R., Tuller M. Beyond Earth: designing root zone environments for reduced gravity conditions soil // *Science Society of America.* Madison, USA.
17. Yendler B.S., Podolsky I.G., Bingham G.E. et al. Moisture sensor for use in microgravity // 25th Intern. Conf. on Environmental Systems. 1995. Paper № 951471.
18. Подольский И.Г., Норох А.А., Бингхем Г.Е. Оценка погрешности теплоимпульсного метода измерения влагосодержания корнеобитаемых сред для космических оранжерей // *Авиакосм. и экол. мед.* 2002. Т.36. № 1. С. 55-60.
- Podolskiy I.G., Norokh A.A., Bingham G.E. Evaluation of the error of the thermopulse technique used to measure moisture content determination of root substrates in space greenhouse // *Авиакосмическая и экологическая медицина.* 2002. V. 36. № 1. P. 55-60.
19. Подольский И.Г. Исследование и разработка метода и оборудования для регулирования водно-воздушного режима капиллярно-пористых тел (корнеобитаемых сред) в оранжерейных устройствах для условий микрогравитации: Дис. ... канд. техн. наук. 2000. С. 91-94.
- Podolskiy I.G. Research and development of methods and equipment for controlling the water-air regime of capillary-porous bodies (rooting medium) in a greenhouse devices for microgravity: *Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk.* 2000. P. 91-94.
20. Подольский И.Г., Сычев В.Н., Левинских М.А., Стругов О.М. Некоторые особенности жидкостного обеспечения корнеобитаемой среды при культивировании в условиях микрогравитации // *Авиакосм. и экол. мед.* 1998. Т. 32. № 2. С. 36-43.
- Podolsky I.G., Sychev V.N., Levinskikh M.A., Strugov O.M. Some peculiar features of liquid supply to the root medium of plant growing in microgravity // *Авиакосмическая и экологическая медицина.* 1998. V. 32. № 2. P. 36-43.

Поступила 24.04.2014

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ROOT ZONE MOISTURE AND WATER POTENTIAL SENSORS FOR GREENHOUSES IN THE CONDITIONS OF EXTENDED SPACE FLIGHT

Podolskiy I.G., Strugov O.M., Bingham G.E.

Авиакосмическая и Экологическая Медицина (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 39-45

The investigation was performed using greenhouse Lada in the Russian segment of the International space station (ISS RS) as part of space experiment Plants-2 during ISS missions 5 through to 22. A set of 6 point moisture sensors embedded in the root zone (surface particles of 1-2 mm in diam.) and 4 tensiometers inside root modules (RM) were used to monitor moisture content and water potential in the root zone.

The purpose was to verify functionality and to test performance of the sensors in the spaceflight environment. It was shown that with the average RZ moisture content of 80 % the measurement error of the sensors do not exceed ± 1.5 %. Dynamic analysis of the tensiometers measurements attests that error in water potential measurements does not exceed ± 111 Pa.

Key words: root zone, space greenhouse, moisture content, water potential, experimental error of the sensors, Russian segment of the International space station.

МЕХАНИЗМЫ ИЗМЕНЕНИЙ ПОЗВОНОЧНИКА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОДОЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Моисеев Ю.Б.

Научно-исследовательский испытательный центр (авиационно-космической медицины и военной эргономики) Центрального научно-исследовательского института ВВС МО РФ, Москва
E-mail: ybmn@rambler.ru

Целью работы было изучение особенностей реагирования позвоночника человека на осевую статическую и динамическую нагрузку.

Сегменты позвоночника от XI грудного до II поясничного позвонков человека подвергали осевой статической (нагружение со скоростью 20 мм/мин) и динамической (нагружение со скоростью 200 и 500 мм/мин) нагрузке. В процессе нагружения регистрировали величину нагрузки, деформацию сегмента в целом, передней поверхности межпозвонкового диска Th_{XI} - Th_{XII} и XII грудного позвонка, сигналы акустической эмиссии (показатель микроразрушения губчатой костной ткани позвонка). Установлено, что прирост деформации тела позвонка меньше, чем межпозвонкового диска, а центральные отделы замыкательной пластинки позвонка сжимаются сильнее, чем периферические. Эти особенности отмечали больше при статическом нагружении, чем при динамическом.

Для достижения одной и той же деформации сегмента позвоночника при динамическом нагружении необходимо преодолеть большее сопротивление большего числа костных трабекул, чем при статической нагрузке. Отсюда следует, во-первых, что величина динамической нагрузки, вызывающей одно и то же сжатие сегмента, должна быть больше, чем величина статической нагрузки, и главное практическое следствие этого – динамическая прочность позвоночного столба заметно выше, чем статическая. Во-вторых, жесткость, проявляемая позвоночником во время удара, выше, чем в статике. В-третьих, одна и та же деформация в ходе динамического нагружения должна сопровождаться большим объемом микроразрушений, чем в условиях статики, о чем свидетельствует достоверная разница числа накопленных сигналов АЭ в момент перелома. Для условий динамической нагрузки оно составляет $444,2 \pm 308,2$, статической – $85,0 \pm 36,6$ ($p < 0,05$ по t-критерию Стьюдента).

Ключевые слова: позвоночник, осевая нагрузка, механизмы травмирования, перегрузка.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 46–50.

Современные и в особенности перспективные высокоманевренные самолеты могут создавать большие пилотажные перегрузки, действующие на летчика,

причем их величины могут достигать 10 ед. длительностью площадки несколько секунд [1]. Подобные механические нагрузки приближаются к предельным не только с точки зрения их неблагоприятного воздействия на сердечно-сосудистую систему человека, но и на опорно-двигательный аппарат, в частности позвоночник. В связи с этим изучение биомеханических реакций позвоночного столба на продольные статические нагрузки представляет несомненный практический и теоретический интерес.

В статье подведены итоги цикла исследований, показывающих особенности биомеханического реагирования позвоночного столба человека на продольные динамические и статические нагрузки, проводившиеся нами в последнее десятилетие.

Ранее мы сообщали научной общественности некоторые полученные результаты [2]. В модельных экспериментах с сегментами позвоночника человека было установлено, что увеличение времени действия осевой нагрузки на позвоночник человека сопровождается следующими основными группами явлений:

1) закономерным снижением несущей способности (предела прочности) позвоночного столба, которое описывается экспоненциальным законом;

2) снижением доли линейного упругого компонента в деформации разрушения позвоночника. По мере увеличения длительности нагрузки растет «вес» неупругой деформации, когда минимальный прирост усилия вызывает значительный прирост сжатия образца. Тем самым деформация разрушения, которая, как оказалось, существенно не зависит от времени действия продольной нагрузки, достигается при меньшем внешнем усилии;

3) уменьшением жесткости и модуля упругости позвоночника. Это находит свое выражение в том, что одинаковой осевой нагрузке при большем времени нагружения соответствует большее сжатие позвоночного столба и способствует достижению деформации разрушения при меньшей интенсивности внешнего воздействия.

В данном сообщении акцент делается на изучении механизмов реагирования позвоночного

столба на механическую продольную нагрузку разной длительности. Это потребовало исследования особенностей деформирования элементов позвоночно-двигательных сегментов – позвонков и межпозвонковых дисков.

Методика

Эксперименты выполнены на сегментах позвоночного столба человека, состоящих из 5 тел позвонков Th_{xi}-L_{iii} (2 нижнегрудных и 3 верхнепоясничных позвонка), 4 смежных межпозвонковых дисков и межпозвонковых связок. Выбор данного отдела позвоночника обусловлен тем, что именно он чаще всего страдает при травмах и поражается дегенеративными изменениями. Сегменты извлекали из тел людей (мужчин), скоропостижно скончавшихся в возрасте 20–50 лет от причин, не влияющих на состояние костной системы. Перед испытаниями замыкательные пластинки верхнего и нижнего позвонков сегмента моделировали сплавом Вуда. Отсутствие патологии позвоночника проверялось рентгенологически и *ad oculus*, непосредственно в ходе подготовки к эксперименту.

Осевая механическая нагрузка создавалась стандартной испытательной машиной TIRATEST-2300 (Германия). Время действия нагрузки до разрушения задавалось скоростью нагружения сегментов. Нагружение проводилось со скоростями 500, 200 мм/мин (динамический режим) и 20 мм/мин (статический режим), что соответствовало длительностям $0,49 \pm 0,03$; $1,56 \pm 0,13$; $15,82 \pm 0,03$ с соответственно. Момент повреждения, несущую способность сегмента, деформацию определяли по кривой нагружения, которая регистрировалась на двухкоординатном самописце «Эндим 620.02» (Германия).

Продольная деформация сегмента позвоночника в целом оценивалась по кривой нагружения, а сжатие передних отделов тел позвонков и межпозвонковых дисков – по деформации наклеенных на них тензорезисторов. Для наклеивания тензорезисторов на позвонки применялся клей МК-8 или СК-1 (разработаны лабораторией полимеров ВНИИ МТ). Деформация тензорезистора определяется по формуле

$$\Delta l = \Delta R \cdot l / R \cdot S,$$

где Δl – деформация тензорезистора, мм; ΔR – изменение сопротивления тензорезистора, Ом; l – база тензорезистора, мм; R – его сопротивление, Ом; S – коэффициент тензочувствительности.

Поскольку область измерения сжатия этим способом ограничена базой тензорезистора (3 мм), а размеры тел позвонков на различных анатомических уровнях позвоночного столба отличаются друг

от друга, то целесообразно ориентироваться не на абсолютную, а на относительную деформацию тензорезистора (ε), определяемую по формуле

$$\varepsilon = (\Delta l / l) \cdot 100 \%, \\ \text{или } \varepsilon = (\Delta R / R) \cdot 100 \%.$$

В ходе эксперимента регистрировали акустическую эмиссию (АЭ) с помощью регистратора акустических сигналов РАС-43.

Всего проведено 15 экспериментов с 15 сегментами позвоночника.

Исследование особенностей деформации разных отделов тел позвонков под влиянием осевой нагрузки проводилось в модельных экспериментах с 3 сегментами позвоночника Th_{xi}-L_{iii}, подготовленными так, как это было описано выше. Сегменты помещались в ручной пресс и подвергались статической нагрузке до уровня 350 кГ (3430 Н) с шагом в 50 кГ (490 Н). Усилия регистрировались с помощью тензодатчика на аппаратуре «Топаз-3-02» и цифрового вольтметра Ц-15-13. По достижении очередной «ступеньки» нагрузки проводилась рентгенография сегмента в боковой проекции. Величины продольной деформации передних, центральных и задних отделов тел 12 грудных позвонков измерялись на рентгенограммах при 7-кратном их увеличении. Для исключения влияния индивидуальных различий и случайных различий, сопровождавших каждую рентгеновскую съемку, оценивались значения не абсолютного, а относительного сжатия. Всего выполнен 21 эксперимент.

Исследования проводились с соблюдением основных биоэтических правил.

Результаты и их обсуждение

Изучение механизмов реагирования позвоночного столба на механическую продольную нагрузку разной длительности потребовало исследования особенностей деформирования элементов позвоночно-двигательных сегментов.

На рис. 1 представлена усредненная диаграмма «нагрузка – относительная деформация», построенная по результатам экспериментов с 3 сегментами позвоночника. Наибольшему продольному сжатию подвергаются центральные отделы тел (в проекции пульпозного ядра межпозвонкового диска), несколько меньшему – передние и минимальному – задние.

Сопоставим показатели сжатия различных отделов позвонка с типичной динамикой внутридискового давления, описанной в работе [3]. Максимальный прирост давления, как и максимальный градиент деформации передних, центральных и задних отделов позвонка, соответствует нагрузкам до 150 кГ (1470 Н). По-видимому, именно при этих уровнях

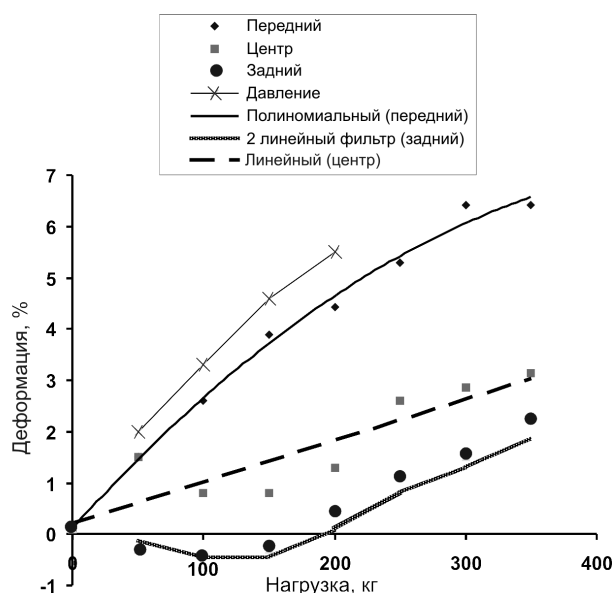


Рис. 1. Динамика сжатия передних, центральных, задних отделов тела позвонка и внутридискового давления в зависимости от осевой статической нагрузки

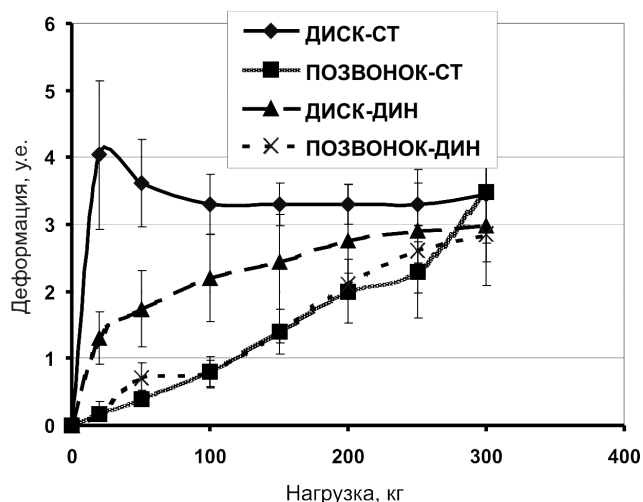


Рис. 2. Динамика сжатия передних поверхностей межпозвонковых дисков $Th_{XI}-Th_{XII}$ и тел XII грудного позвонка при статическом и динамическом осевом нагружении сегментов позвоночника

воздействия формируется перераспределение и концентрация внешнего усилия на центральный отдел замыкательной пластинки. Синхронность формирования градиента сжатия и максимального прироста внутридискового давления косвенным образом свидетельствует о ведущей роли ядра межпозвонкового диска в обоих этих явлениях. При больших нагрузках абсолютные значения различий сохраняются, но дальнейший прирост сжатия

на единицу нагрузки становится примерно одинаковым на всех участках тела позвонка. Именно эти различия при достижении пороговых величин деформации в значительной степени обуславливают центральную локализацию первых трещин замыкательной пластинки – начальной степени перелома позвоночника.

На рис. 2 показаны закономерности деформирования позвонков и межпозвонковых дисков, изученные применительно к передним поверхностям тела XII грудного позвонка и лежащего над ним диска.

Деформация передней поверхности позвонка вызвана в основном осевым сжатием передней стенки его тела. Деформация же передней поверхности межпозвонкового диска обусловлена главным образом выпячиванием его фиброзного кольца, происходящим из-за давления пульпозного ядра, которое таким образом реагирует на осевую нагрузку. Ядро, обладая гидростатическими свойствами, равномерно перераспределяет усилие во все стороны и одновременно с фиброзным кольцом деформирует центральные отделы замыкательной пластинки тела позвонка. В результате на начальном этапе осевого нагружения деформация фиброзного кольца и центральных отделов замыкательной пластинки происходят одновременно и однонаправленно: чем выше деформация поверхности диска, тем сильнее деформируются центральные отделы позвонка. Таким образом, по деформации периферических отделов межпозвонкового диска можно судить о сжатии центра тела смежного позвонка. Темпы сжатия передней поверхности позвонка на начальном этапе осевого нагружения позвоночного столба в динамических и особенно статических условиях отстают от деформации передней поверхности диска. Это подтверждают приведенные на рис. 1 данные о преимущественном сжатии центральных участков тела позвонка по сравнению с передними и задними периферическими отделами.

Отставание сжатия передней поверхности позвонка по величине от деформации межпозвонкового диска при статическом нагружении выражено больше, чем в условиях динамики. Это, по нашему мнению, может свидетельствовать о большем градиенте сжатия центральных и периферических (передняя поверхность) отделов позвонков в условиях статического нагружения по сравнению с ударной нагрузкой. При высоком градиенте сжатия центральной и передней поверхностей тела позвонка под воздействием статического осевого усилия преимущественно деформируются костная ткань в проекции пульпозного ядра (от 1/3 до 1/2 площади замыкательной пластинки). Оставшаяся часть, расположенная в периферических отделах тела позвонка, на долю которой приходится большая часть спонгиозы, вовлекается в процесс заметно меньше. При динамическом нагружении осевая

нагрузка распределяется по поверхности замыкательной пластинки более равномерно, и сжатию подвергается больший объем костной ткани, чем в случае статического воздействия.

Для достижения одной и той же деформации сегмента позвоночника (как и позвоночного столба в целом) при динамическом нагружении необходимо преодолеть большее сопротивление большего числа костных трабекул, чем при статической нагрузке (рис. 3). Отсюда следует, во-первых, что величина динамической нагрузки, вызывающей одно и то же сжатие сегмента, должна быть больше, чем величина статической нагрузки, и главное практическое следствие этого – динамическая прочность позвоночного столба заметно выше, чем статическая. Во-вторых, жесткость, проявляемая позвоночником во время удара, выше, чем в статике. Это явление мы регистрировали экспериментально и об этом сообщалось ранее [2]. В-третьих, одна и та же деформация в ходе динамического нагружения должна сопровождаться большим объемом микро-разрушений, чем в условиях статики. Последнее утверждение мы проверили экспериментально.

О степени микро-разрушений мы судили по числу сигналов АЭ – звуковых сигналов, свидетельствующих о повреждениях трабекул. В экспериментах с сегментами позвоночника продемонстрировано, что число накопленных сигналов АЭ в момент перелома, вызванного динамической нагрузкой, достоверно выше, чем при переломе, возникшем при статической нагрузке (соответственно $444,2 \pm 308,2$ и $85 \pm 36,6$; $p < 0,05$ по t-критерию Стьюдента). Одновременно выявлена тенденция к появлению микроповреждений костной ткани позвонков при меньших величинах деформации и нагрузки в условиях динамического нагружения: соответственно $2,05 \pm 0,27$ мм и $176 \pm 74,7$ кГ для динамики и $2,7 \pm 0,9$ мм и 312 ± 133 кГ для статики. И хотя приведенные различия статистически недостоверны вследствие небольшой экспериментальной выборки, их необходимо принимать в расчет, так как они вполне соответствуют общей картине.

Итак, с учетом полученных ранее результатов и доложенных материалов можно говорить о следующих механизмах, обуславливающих особенности биомеханических реакций позвоночника на статическую и динамическую нагрузку.

Первый механизм был уже ранее предложен нами для обсуждения [2]. Он действует преимущественно на микроуровне – на уровне костных балок губчатого вещества позвонков, при рассмотрении костной ткани как биологического материала. Этот механизм вытекает из термофлуктуационной теории прочности материалов [4]. Согласно этой теории, в основе разрушения лежит образование микротрещин, рост их объемной концентрации в образце, постепенное их слияние и укрупнение.

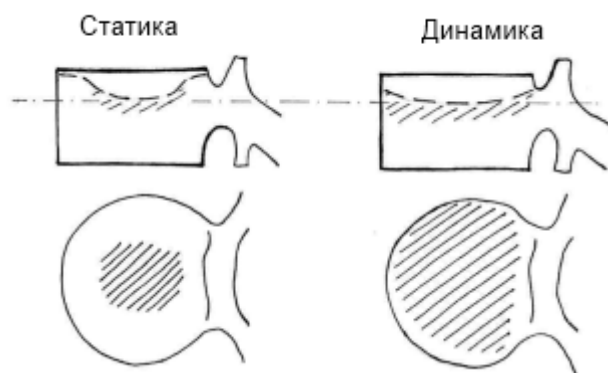


Рис. 3. Схематическое изображение влияния статического (на рис. «Статика») и динамического (на рис. «Динамика») осевого нагружения сегмента позвоночника на объем вовлекаемых в процесс трабекул губчатой кости тел позвонков.

Верхний ряд – вид сбоку; нижний ряд – вид сверху. Штриховка – зона губчатой кости, непосредственно вовлеченная в сопротивление осевому сжатию тела позвонка

При достижении определенного порога микроповреждения приводят к макро-разрушению материала. Параметры нагрузки, вызывающие разрушение, существенным образом зависят от времени ее действия:

$$\tau = A \exp(-a\sigma),$$

где τ — время действия нагрузки; σ — предел прочности материала; A , a — коэффициенты.

По-видимому, с наибольшим успехом термофлуктуационная теория может быть применима к изучению и объяснению механизма повреждений, возникающих в костной ткани на уровне «коллаген — кристалл», и образования дефектов в костных трабекулах. Именно на этих морфологических уровнях организации первостепенную роль играют процессы, описываемые положениями указанной теории: возмущение межатомных связей под влиянием внешней нагрузки; разрыв этих связей вследствие усиливающихся флуктуаций атомов; накопление разорванных связей, ведущее к появлению очагов образования трещин с последующим ростом объемной концентрации микротрещин в материале под действием внешней нагрузки.

Второй механизм в большей мере актуален для позвоночника как биологической конструкции. Он представлен особенностями деформирования элементов позвоночно-двигательных сегментов и обусловленным этим перераспределением нагрузок по поверхности замыкательной пластинки позвонка. Динамическая продольная нагрузка вызывает более равномерное осевое сжатие тела позвонка по сравнению с условиями статического нагружения,

когда градиент деформации периферических и центральных участков существенно выше. В результате одна и та же деформация в динамике вовлекает в реакцию большее число трабекул, чем в статике, поэтому для одного и того же уровня сжатия требуется преодолеть сопротивление и повредить больше костных балок, что достигается при большей величине внешнего усилия.

Выводы

1. Статическая осевая нагрузка вызывает перелом позвоночника при меньшей величине усилия, чем динамическая нагрузка.
2. Одно и то же макроповреждение позвоночника, например перелом тела позвонка полученное при динамическом внешнем воздействии, сопровождается большей микротравматизацией, чем вызванное статическим нагружением. Нормализация морфологического и функционального состояния поврежденного динамической нагрузкой позвоночного столба требует восстановления большего числа поврежденных трабекул.
3. Одна и та же величина внешнего осевого нагружения более травматична, если она имеет динамический характер.

Список литературы

1. Bukhtiyarov I.V., Zhdanko I.M., Khomenko M.N., Filatov V.N. Physiological aspects of long duration gravitational stress // Military health care in regional military, climatic, epidemiological environment. М., 2012. P. 25–27.
2. Ступаков Г.П., Моисеев Ю.Б. Влияние длительных продольных механических нагрузок на биомеханические реакции позвоночника человека // Авиакосм. и экол. мед. 1993. Т. 27. № 5–6. С. 66–70.
Stupakov G.P., Moiseev Yu.B. Effects of time of longitudinal mechanical load on biomechanical of the human spinal column // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 1993. V. 27. № 5–6. P. 66–70.
3. Цивьян Я.Л., Райхинштейн В.Х. Межпозвонковые диски (некоторые аспекты физиологии и биомеханики). Новосибирск, 1977.
Tsivayn Ya.L., Raykhinshtein V.Kh. Intervertebral discs (some physiological and biomechanical aspects). Novosibirsk, 1977.
4. Журков С.Н. Физические основы прочности // Наука и человечество. М., 1973. С. 177–193.
Zhurkov S.N. Physical basis of strength // Science and humanity. Moscow, 1973. P. 177–193.

MECHANISMS OF CHANGES IN THE HUMAN SPINAL COLUMN IN RESPONSE TO STATIC AND DYNAMIC AXIAL MECHANIC LOADING

Moiseev Yu.B.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 46–50

The study was concerned with the human spinal column reaction to axial static and dynamic loading.

Fresh segments of the column from dorsal vertebra XI to lumbar vertebra II were exposed to axial static (20 mm/min) and dynamic (200 and 500 mm/min) loading. Measured variables included load value, whole segment deformation, anterior surfaces of intervertebral disk Th_{XI}-Th_{XII} and dorsal vertebra XII, and acoustic emission signals indicative of spongy bone microdestruction. It was found that vertebral body deformation augmented less in comparison with the intervertebral disk and that central parts of the spinal end plates compress greater than peripheral. This difference was more considerable due to static loading rather than dynamic.

To produce deformation of a spinal segment by dynamic loading same as by the static one, it is necessary to overcome a stronger resistance of a larger number of trabecular bones. Herefrom it follows that, first, to cause an equal segment compression the dynamic load must be heavier than static and, which is of paramount practical significance, dynamic strength of the column is markedly higher than static. Secondly, spinal stiffness during impact is higher as compared with the static condition. Thirdly, same degree of deformation due to dynamic loading should result in a larger volume of microdestructions comparing with static loading, which is testified by a reliable difference in the number of AE signals accumulated prior to fracture. The number of AE signals amounts to 444.2 ± 308.2 and 85.0 ± 36.6 in case of the dynamic and static loading, respectively ($p < 0.05$ according to Student's t-criterion).

Key words: spinal column, axial loading, damage mechanisms, overload.

Поступила 01.07.2014

УДК 531;612.75;611.71,72;519.6

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОГО СЕГМЕНТА ПОЗВОНОЧНИКА ПРИ НАГРУЗКАХ

Чумаченко Е.Н., Логашина И.В.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва
E-mail: mmkaf@miem.edu.ru

Предложена математическая модель, позволяющая анализировать напряженно-деформированное состояние в элементах позвоночного столба при продольных и поперечных нагрузках, вызванных изменением гравитационного поля и/или действиями пилота высокоскоростного летательного аппарата в условиях пилотажной перегрузки. Разработан алгоритм решения, позволяющий учитывать изменение давления в межпозвонковом диске и форму фиброзного кольца при нагрузках, близких к критическим.

Компьютерная реализация поставленной задачи и расчеты напряженно-деформированного состояния сегмента позвоночника выполнены с помощью вычислительного комплекса SPLEN, разработанного фирмой КОММЕК Лтд.

Для анализа напряженно-деформированного состояния позвоночного сегмента были рассмотрены 2 варианта внешней нагрузки: нормальная и односторонняя с изгибающим моментом.

Были найдены предельно допустимые нагрузки на сегмент позвоночника, получена картина распределения интенсивности напряжений, средних напряжений, искажения сегментов позвоночника и поля параметров разрушения. Построенные компьютерные модели могут быть положены в основу разработки методики прогнозирования характерных травм позвоночника при различных вариантах экстремальных нагрузок и патологиях.

Ключевые слова: механика, биомеханика, математическое моделирование, позвоночник.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 51–57.

Как с теоретической точки зрения, так и в целях обеспечения безопасности пилотируемых космических полетов (КП) важно знать о влиянии остеодистрофических изменений на прочность кости, в первую очередь губчатой. Проблемы регуляции кальциевого гомеостаза в организме, особенно в костной ткани, сохранили свою актуальность, так как приспособление человека к условиям невесомости сопровождается потерей костной массы [1]. После КП собак, а в дальнейшем и космонавтов обнаружили понижение степени минерализации костей скелета, связанное с потерей солей кальция из организма. Возникал отрицательный кальциевый баланс. Изучению этих важных проблем во многом

способствовали проведенные в Советском Союзе биологические эксперименты на специализированных биоспутниках серии «Космос», на борту которых находились крысы, черепахи и другие животные, а также растения. Результаты экспериментов позволили изучить и вскрыть многие важные стороны изменений обменных процессов, и в первую очередь кальциевого обмена, в условиях КП. Впоследствии был обобщен и систематизирован материал по изучению обменных процессов в костной ткани (включая особенности метаболизма различных отделов скелета, роль возрастного и других факторов) при экспериментальной гипокинезии в наземных условиях и при КП лабораторных животных на биоспутниках серии «Космос» и человека на космической орбитальной станции «Салют-1». Были получены данные о костных изменениях у космонавтов в условиях длительных КП [2]. На основе экспериментов, проведенных на крысах и черепахах, даны характеристики костных изменений различных отделов скелета и исследованы уровни соответствующих восстановительных реакций.

Аналогичные исследования проводили и за рубежом на клеточных структурах и животных (белые крысы, обезьяны) на биоспутниках «Биюн-9–11», американской космической лаборатории SLS-2. Также выполнялись наземные исследования с моделированием гипокинезии [3].

Анатомические особенности позвоночника человека

Позвоночник у человека состоит из 32–34 позвонков, соединенных между собой межпозвонковыми дисками. Позвонки в различных отделах позвоночника имеют свои отличительные анатомические и функциональные особенности.

Позвонки состоят из внутреннего губчатого (губчатая костная ткань, обеспечивающая прочность позвонков) и компактного внешнего вещества (кортикальная костная ткань). Губчатое вещество в центральной части имеет более пористую структуру, чем вблизи компактного внешнего вещества.

Механические нагрузки, которым подвергается позвонок, стимулируют образование новых клеток. Усиление воздействий на позвонок обеспечивает ускоренное образование костного вещества с более

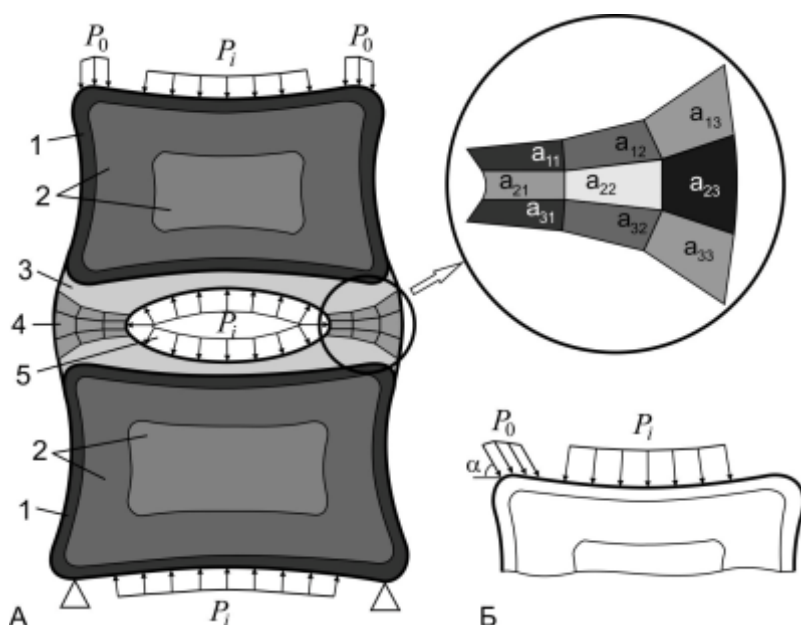


Рис. 1. Формализованная схема двухпозвонкового сегмента: А – с симметричной схемой нагружения; Б – с изгибающим моментом. 1 – кортикальная кость; 2 – губчатая костная ткань; 3 – гиалиновая пластинка; 4 – изотропные составляющие ортотропного фиброзного кольца; 5 – пульпозное ядро; P_i – внутридисковое давление; P_0 – внешняя распределенная нагрузка

плотной костной субстанцией, и наоборот, уменьшение нагрузки вызывает ее распад.

Так, например, вынужденная в связи с болезнью обездвиженность или длительное пребывание в состоянии невесомости ведет к потере кальция и уменьшению плотности костных тканей, прежде всего губчатых. Одно из возможных последствий – размягчение костей скелета.

В связи с тем что в межпозвонковом диске разворачиваются основные патологические процессы, связанные с некоторыми заболеваниями позвоночника, остановимся на нем подробнее. Межпозвонковый диск состоит из фиброзного кольца, студенистого ядра и замыкательных пластинок, примыкающих непосредственно к телам позвонков. Фиброзное кольцо образовано концентрическими пластинками, состоящими из коллагеновых и эластиновых волокон, что определяет их высокую прочность, сочетающуюся с упругостью под воздействием нагрузки. Механические свойства фиброзного кольца не однородны и по толщине, и по радиусу.

Пульпозное ядро располагается в середине межпозвонкового диска. Оно играет в позвоночнике чрезвычайно важную роль – действует как пружина, буфер или шарнир, обеспечивающий движение позвоночника (сгибание, разгибание, наклон в стороны). Его деформирование сопровождается частичным массообменом между пульпозным ядром

и трабекулярным пространством. Ядро диска имеет уникальную молекулярную структуру, обеспечивающую всасывание жидкости, чтобы сохранять воду под давлением. Если поместить здоровое ядро диска в блюдце с водой, оно разбухнет и увеличится в 3 раза. Такая мощная всасывающая сила позволяет поддерживать высокое давление в ядре, и оно не сплющивается и не высыхает под действием постоянных нагрузок, как это произошло бы с обычной губкой. У молодого человека ядро диска состоит из воды почти на 90 %, но с возрастом оно хуже удерживает воду.

Одно из заболеваний позвоночника, возникающее при перегрузках – грыжа диска. Механизм возникновения грыжи диска заключается в разрыве, частичном разрушении фиброзного кольца, сопровождающимся выходом вещества пульпозного ядра за пределы диска. При разрыве полуокружности фиброзного кольца, обращенного в позвоночный канал, вещество пульпозного ядра выходит в него, что может приводить к компрессии нервных структур и последующим тяжелым заболеваниям.

Разработка математической модели позвоночника

Многообразие индивидуальностей, форм патологии позвоночника человека и условий воздействия ограничивает широкое использование результатов экспериментальных исследований в области клинической медицины; себестоимость исследований также высока. Поэтому биомеханическое и математическое моделирование на базе банка экспериментальных данных должно быть одним из путей решения проблем патогенеза вертебральной патологии.

Ввиду того что позвоночник и его сегменты являются исключительно сложными анатомическими образованиями, моделирование поведения элементов позвоночника при критических нагрузках возможно лишь в рамках численного анализа формализованной модели, например, с помощью метода конечных элементов. Математическая модель разрабатывалась совместно с А.И. Воложиным [1, 4]. Фронтальное сечение сегмента позвоночника из 2 позвонков приведено на рис. 1.

Представленная биомеханическая модель позвоночника построена при следующих допущениях:

- Сегмент позвоночника (см. рис. 1) является составной симметричной конструкцией (система позвонков и межпозвонковых дисков), в общем случае переменного сечения (вдоль позвоночного столба), опирающейся краями нижнего торца на

Модуль упругости (E) и коэффициент Пуассона (ν)

Материал		E , Па	ν
Кортикальная костная ткань позвонка		$1,61 \cdot 10^8$	0,25
Губчатая костная ткань (на контуре)		$75 \cdot 10^6$	0,45
Губчатая костная ткань (в центре)		$28,9 \cdot 10^6$	0,44
Гиалиновая пластинка диска		$24,3 \cdot 10^6$	0,4
Девять изотропных составляющих ортотропного фиброзного кольца	a_{11}, a_{31}	$13,5 \cdot 10^6$	0,44
	a_{12}, a_{32}	$17,3 \cdot 10^6$	0,44
	a_{22}	$25,4 \cdot 10^6$	0,44
	a_{23}	$34,9 \cdot 10^6$	0,44
	a_{13}, a_{21}, a_{33}	$21,3 \cdot 10^6$	0,44

жесткое основание (средняя часть нагружена давлением от пульпозного ядра) и находящейся под действием внешних сил. Взаимодействия позвоночника с продольными и поперечными связками, задней структурой и грудной клеткой не учитываются.

– Позвонкок является упругодеформируемым телом, ограниченным кортикальной костной пластинкой из изотропного компактного линейно-деформируемого материала. Пористость трабекулярного пространства максимальна в центральной части и стремится к минимуму в области, сопряженной с кортикальной костной пластинкой [5]. В модели губчатая костная ткань аппроксимируется как составная, с различными свойствами в центре и по контуру позвонка.

– Межпозвоночный диск – торообразное тело, жестко сочлененное с костной концевой пластинкой позвонка посредством линейного упругодеформируемого хрящевого слоя – замыкательной гиалиновой пластинки, переходящей в структуру фиброзного кольца. Предполагается, что по поверхности контакта с пульпозным ядром гиалиновая пластинка пронизана питательными каналами для обеспечения процесса диффузии после достижения предельного уровня внутри дискового давления [6].

– Фиброзное кольцо рассматривается как линейное ортотропное тело. В модели оно представлено как локально-изотропный тор, состоящий из 9 изотропных (3 x 3) колец (см. рис. 1, А).

– Пульпозное ядро, близкое по форме к эллипсоиду, считается идеальной, несжимаемой жидкостью, подчиняющейся гидростатическому закону. Давление пульпозного ядра зависит от величины внешней нагрузки и состояния костных тканей позвоночника.

– Предполагается, что внешняя нагрузка распределяется через окружающие сегмент позвонки таким образом, что основная ее часть приходится на внешний контур (см. рис. 1, А).

Для анализа напряженно-деформированного состояния позвоночного сегмента были рассмотрены 2 варианта внешней нагрузки: нормальная и односторонняя с изгибающим моментом (см. рис. 1 А, Б). Угол, под которым задается направление внешней нагрузки, может изменяться от 90 до 0°.

Упругие характеристики, принятые по данным работ [7, 8], приведены в таблице.

Математическая постановка задачи деформирования сегмента позвоночника

Математическая постановка задачи может быть сведена к следующей.

В каждой из локально однородных односвязных подобластей, неоднородного многосвязного фрагмента позвоночника, должны выполняться:

– уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j}^I = 0 \quad , \quad (1)$$

– экспериментально установленные соотношения

$$\sigma_u^I = F^I(\varepsilon_u) \quad , \quad (2)$$

характеризующие физические инвариантные зависимости между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций в костных тканях позвоночника;

– соотношения, связывающие компоненты тензора напряжений и деформаций:

$$\sigma_{ij}^I = K^I \cdot \Theta^I \cdot \delta_{ij} + \frac{2\sigma_u^I}{3\varepsilon_u^I} (\varepsilon_{ij}^I - \varepsilon^I \cdot \delta_{ij}) \quad , \quad (3)$$

$$\text{где} \quad \varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{ij} \cdot \delta_{ij} = \frac{\Theta}{3} \quad ,$$

$$\varepsilon_u = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_{ij} - \varepsilon \delta_{ij})(\varepsilon_{ij} - \varepsilon \delta_{ij})} ;$$

K – коэффициент объемного сжатия;

δ_{ij} – дельта Кронекера;

– соотношения Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{u_{i,j} + u_{j,i}}{2} . \quad (4)$$

В каждой точке смежных границ соседних подобластей I и J принимаются специальные условия для функций перемещения:

$$u_i^I(x_j) = u_i^J(x_j) , \quad (5)$$

обеспечивающие жесткое соединение костных тканей между собой и непрерывность поля деформаций при приложении нагрузки к моделируемому фрагменту челюсти.

Пусть сегмент позвоночника занимает объем V с внешней границей S в декартовой системе координат. Граница сегмента может быть разбита на 3 части, так что

$$S = S_\sigma \cup S_u \cup S_{u\sigma} .$$

На части границы S_σ действуют поверхност-

ные силы $\vec{P}_n = P_{n_i} \vec{k}_i$:

$$\sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3) n_j|_{S_\sigma} = P_{n_i}(x_1, x_2, x_3) . \quad (6)$$

На части границы S_u заданы перемещения

$$\vec{u}^* = u_i^* \vec{k}_i :$$

$$u_i(x_1, x_2, x_3)|_{S_u} = u_i^*(x_1, x_2, x_3) . \quad (7)$$

На части границы $S_{u\sigma}$ частично заданы оба вектора, $\vec{P}_n$ и $\vec{u}^*$:

$$\sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3) n_j|_{S_{u\sigma}} = P_{n_i}(x_1, x_2, x_3) ,$$

$$u_i(x_1, x_2, x_3)|_{S_{u\sigma}} = u_i^*(x_1, x_2, x_3) . \quad (8)$$

Искомые величинами являются 3 функции перемещения:

$$u_1(x_1, x_2, x_3) , u_2(x_1, x_2, x_3) , u_3(x_1, x_2, x_3) .$$

Решение поставленной квазистатической краевой задачи осуществлено с применением одного из наиболее эффективных методов автоматизированного проектирования – методом конечных элементов (МКЭ). Для получения системы разрешающих уравнений относительно узловых перемещений используется принцип минимума полной энергии (принцип возможных изменений деформированного состояния). Один из способов реализации этого принципа состоит в задании произвольного (виртуального) перемещения и приравнивания внешней и внутренней работ, совершаемых различными силами и напряжениями на этом перемещении.

Зависимость модуля Юнга и коэффициента Пуассона от плотности губчатой кости определялась в соответствии с алгоритмом, приведенным в работе [4]. Относительную плотность ρ изменяли в диапазоне 0,3–1,0. Графики гипотетической зависимости модуля Юнга, предела упругости и модуля сдвига от плотности приведены на рис. 2.

Необходимо было определить, при каких критических нагрузках возможно возникновение в опорных костных тканях или в фиброзном кольце напряженно-деформированного состояния, приводящего к локальному разрушению, т.е. к травме и возможным клиническим осложнениям.

Компьютерная реализация поставленной задачи и расчеты напряженно-деформированного

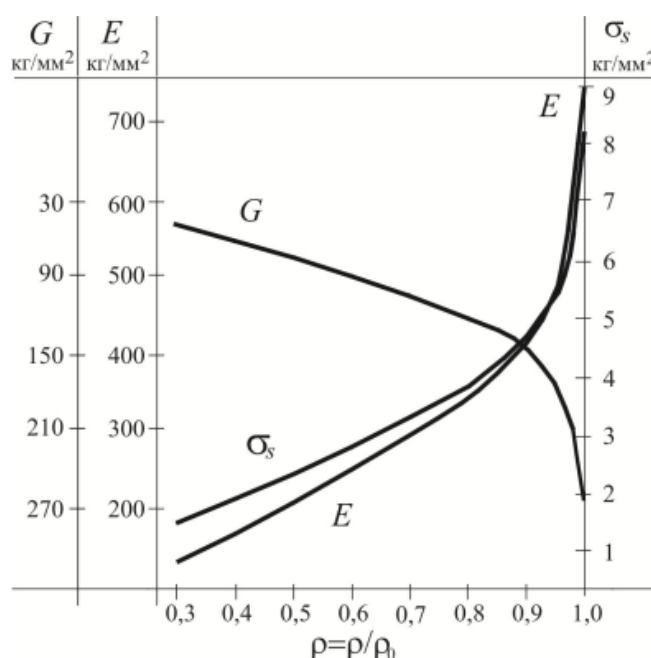


Рис. 2. Гипотетическая зависимость упругих модулей губчатой кости от ее относительной плотности

состояния сегмента позвоночника выполнены с помощью вычислительного комплекса SPLEN, разработанного фирмой КОММЕК Лтд., при участии ведущих ученых г. Москвы. При расчетах определялось минимальное значение распределенной нагрузки P_0 на рабочую поверхность позвонка, при которой в соответствующих элементах 2-позвонокового сегмента позвоночника возникают напряжения порядка предела упругости или показатель разрушения по критерию Шлейхера – Надаи [9] становится близким к единице.

Алгоритм учета массообмена между пульпозным ядром и трабекулярным пространством позвонка

Было принято, что изменение объема пульпозного ядра менее чем на 5 % не влечет за собой повышения внутреннего давления P_i .

При превышении этого порога величина P_i начинает возрастать по гидростатическому закону $P_i \cdot V = \text{const}$.

Алгоритм определения критических значений P_0 и соответствующих значений давления P_i выглядит следующим образом:

1. Задаются «пробные» значения внешней нагрузки P_0 и внутреннего давления P_i , заведомо не превышающие критические значения. Вычисляется объем пульпозного ядра V_0 .

2. Выполняется расчет напряженно-деформированного состояния сегмента позвоночника.

3. Если показатель разрушения по Шлейхеру – Надаи в любом участке сегмента позвоночника превышает 1,0 или в какой-то из подобластей достигнут предел упругости – осуществляется завершение расчета. Запоминаются полученные значения P_0 и P_i .

4. Вычисляется новый объем пульпозного ядра V_i .

5. Если относительное уменьшение объема пульпозного ядра больше или равно 0,05, то вычисляется новое значение давления в пульпозном ядре, равное $P_i \cdot V_0 / V_i$. Осуществляется переход к п. 2.

6. Если относительное уменьшение объема пульпозного ядра меньше 0,05, то увеличивается значение P_0 на некоторую малую величину и осуществляется переход к п. 2.

В ходе решения поставленной задачи были найдены предельно допустимые нагрузки на сегмент позвоночника, т.е. такие нагрузки, при которых еще не наступают необратимые деформации (разрушение, пластические деформации); зависимости между углами приложения силы и максимальной нагрузкой. Также была получена картина распределения интенсивности напряжений, средних напряжений, искажения сегментов позвоночника и поля параметров разрушения.

Для значения угла наклона «нормальной» нагрузки в 90° (вертикальное направление) результаты

расчетов приведены на рис. 3.

Максимум интенсивности напряжений приходится на область талии позвонков, а минимум – в центральной части, вдоль оси сегмента. При этом весь сегмент, за исключением участков гиалиновых пластин и костных тканей, располагающихся вблизи оси симметрии и пульпозного ядра, испытывает напряжение сжатия. Наиболее вероятная область начала разрушения сегмента позвоночника – внутренняя часть фиброзного кольца, в секторах, прилегающих к гиалиновым пластинкам.

При уменьшении угла, под которым прилагается внешняя распределенная нагрузка, ее критические значения уменьшаются. Например, при угле равном 45° критические значения интенсивности напряжений уменьшаются на 61 %, а максимальные значения средних напряжений – на 28 и 67 %. Слабым звеном конструкции сегмента, с точки зрения прочности, по-прежнему остается внутренний сектор фиброзного кольца.

Нелинейная зависимость максимально допустимой симметричной нагрузки на сегмент позвоночника в зависимости от угла ее приложения приведена на рис. 4 (график 1). Она показывает, что отличия в значениях критических нагрузок могут достигать 20-кратных значений.

Второй тип прикладываемой нагрузки (см. рис. 1, Б), односторонней и создающей изгибающий момент, может имитировать некоторые физические действия пилота в условиях повышенной гравитации. Сами действия могут быть вызваны необходимостью обеспечения управления летательным аппаратом в экстремальных условиях.

В этом случае максимальные значения интенсивности напряжений приходятся на талию позвонков и фиброзное кольцо со стороны прикладываемой нагрузки. Эта сторона подвергается сжатию, в то время как другая сторона сегмента – растяжению. При углах приложения внешней распределенной нагрузки свыше 60° и меньше 30° опасным местом с точки зрения разрушения является, как и прежде, внутренняя часть фиброзного кольца. При углах от 30 до 60° опасности разрушения в большей степени подвергается внешняя часть фиброзного кольца со стороны приложения нагрузки. Зависимость предельных значений нагрузки от угла ее приложения показана на рис. 4 (график 2).

Следует отметить, что при приближении к вертикали кривая становится пологой, т.е. сегмент устойчив к небольшим отклонениям приложенной нагрузки от оси позвоночника. При распределенной односторонней, с изгибающим моментом нагрузке $4,9 \text{ кг/мм}^2$ критическая масса, воздействие которой может выдержать позвоночник, почти в 2 раза меньше, чем при нормальной распределенной нагрузке. То есть наличие изгибающего момента значительно повышает вероятность травмирования

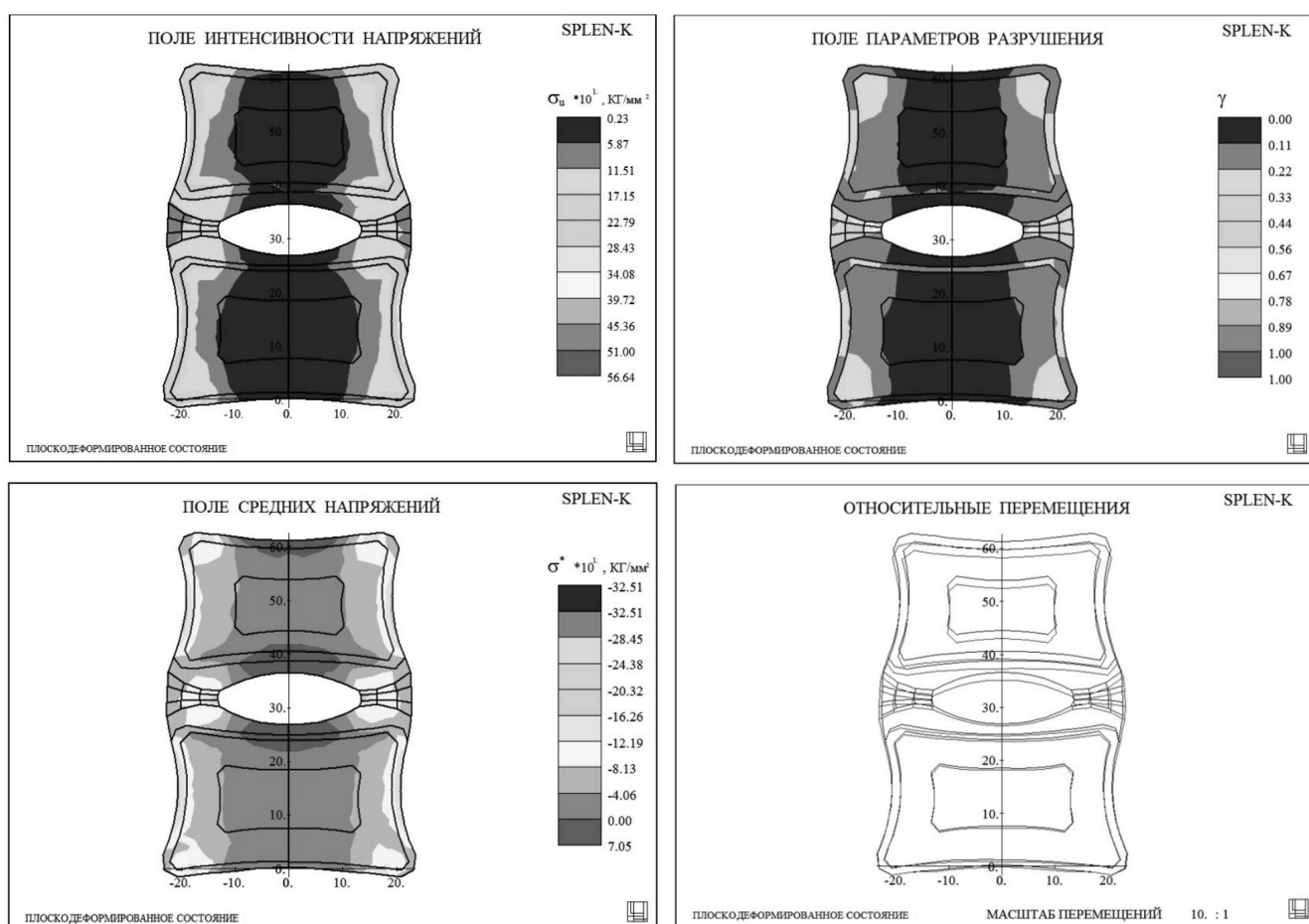


Рис. 3. Результаты расчетов для предельной нормальной нагрузки, приложенной под углом 90°

позвоночника и образования межпозвонковой грыжи в момент начала разрушения фиброзного кольца.

При большой потере кальция, вследствие, например, длительного пребывания в космосе, плотность губчатой костной ткани уменьшается и соответственно уменьшается значение модуля Юнга (см. рис. 2). Это существенно ухудшает прочностные показатели позвоночника. Например, предельная нормальная вертикальная нагрузка на позвоночник при относительной плотности 1,0 равна 4,11 кг/мм². При потере 10 % относительной плотности эта величина станет равной 2,47 кг/мм², при потере 20 % – 1,70 кг/мм², а при потере 50 % – 0,99 кг/мм².

Выводы

1. Предложена математическая модель, позволяющая анализировать напряженно-деформированное состояние в элементах позвоночного столба при продольных и изгибающих нагрузках, вызванных изменением гравитационного поля и/или функциональными действиями пилота высокоскоростного летательного аппарата.

2. Разработан алгоритм решения, позволяющий учитывать изменение давления в межпозвонковой полости и формы фиброзного кольца при нагрузках, близких к критическим.

3. Построенные компьютерные модели могут быть положены в основу разработки методики прогнозирования характерных травм позвоночника при различных вариантах экстремальных нагрузок и патологиях.

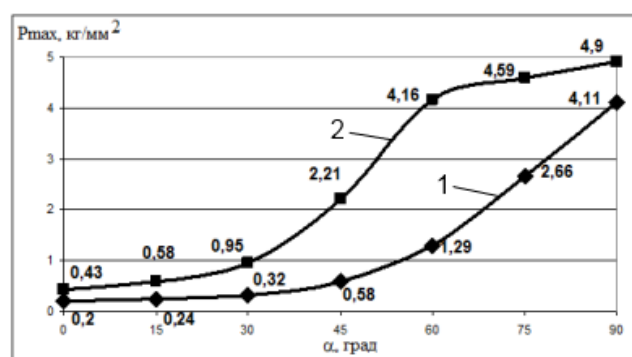


Рис. 4. График максимально допустимой нагрузки на сегмент позвоночника в зависимости от угла ее приложения: 1 – симметричная нагрузка; 2 – односторонняя с изгибающим моментом

Список литературы

1. Григорьев А.И., Воложин А.И., Ступаков Г.П. Минеральный обмен у человека в условиях измененной гравитации. Проблемы космической биологии. Т. 74. М., 1994.
Grigoriev A.I., Volozhin A.I., Stupakov G.P. Mineral metabolism in humans in altered gravity conditions. Problems of space biology. V. 74. Moscow, 1994.
2. Прохончуков А.А., Жижина Н.А., Тигранян Р.А. Гомеостаз костной ткани в норме и при экстремальном воздействии. Т. 49. М., 1984.
Prohonchukov A.A., Zhizhina N.A., Tigranian R.A. Bone homeostasis in normal and extreme exposure. V. 49. Moscow, 1984.
3. Родионова Н.В. Исследования по космобиологии в институте зоологии НАН Украины. Цитологические механизмы потери костной ткани при микрогравитации и гипокинезии // Вестн. зоологии. 2008. Т. 42. № 5. С. 387–401.
Rodionova N.V. Studies on space biology in the Institute of Zoology of NAS. Cytological mechanisms of bone loss in microgravity and hypokinesia // *Vestnik zoologii*. 2008. V. 42. № 5. P. 387–401.
4. Чумаченко Е.Н., Воложин А.И., Маркин В.А. Биомеханическая модель и методика расчета напряженно-деформированного состояния пародонтального комплекса нижней челюсти // Научные технологии. 2001. № 1. Т. 2. С. 49–60.
Chumachenko E.N., Volozhin A.I., Markin V.A. Biomechanical model and method of calculation of the stress-strain state of the periodontal complex mandible // *Naukoemkie tekhnologii*. 2001. № 1. V. 2. P. 49–60.
5. Коллинз Р. Течение в пористых средах. М., 1974.
Kollinz P. Flow in porous materials. Moscow, 1974.
6. Левченко С.К., Древал О.Н., Ильин А.А. и др. Экспериментально-анатомическое исследование функциональной транспедикулярной стабилизации позвоночника // Вopr. нейрохирургии. 2011. № 1. С. 20–26.
Levchenko S.K., Dreval O.N., Ilyin A.A. et al. Experimental functional anatomical study of transpedicular stabilization of the spine // *Voprosy neyrokhirurgii*. 2011. № 1. P. 20–26.
7. Ступаков Г.П., Воложин А.И., Поляков А.Н. и др. Значение состояния минерального компонента кости для ее прочностных характеристик при гиподинамии // Механика композитных материалов. 1982. № 2. С. 315–321.
Stupakov G.P., Volozhin A.I., Polyakov A.N. et al. The status value of the mineral component of bone strength characteristics for its inactivity // *Mekhanika kompozitnykh materialov*. 1982. № 2. P. 315–321.
8. Belytschko T., Kulak R.F., Schultz A.B., Galante J.O. Finite element stress analysis of an intervertebral disc // J. Biomech. 1974. V. 7. № 3. P. 277–285.
9. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М., 1974.
Kachanov L.M. Fundamentals of Fracture Mechanics. Moscow, 1974.

CALCULATION OF THE STRAIN-DEFORMATION CONDITION OF THE SPINAL MOTOR SEGMENT DURING LOADING

Chumachenko E.N., Logashina I.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 51–57

A mathematical model is proposed to analyze the spinal strain-deformation condition resulting from axial and lateral g-loads generated by changes in the gravity field and/or pilot's maneuvering high-performance aircraft. The solution algorithm takes into account changes in the intervertebral disk pressure and the fibrous ring shape at the time of close-to-critical g values.

Calculation of the spinal strain-deformation condition was implemented by the instrumentality of computer system SPLEN (KOMMEK Ltd., Russia).

Analysis of the spinal strain-deformation condition was made for 2 types of external loads, i.e. normal and unilateral with a bending moment.

Maximum permissible loads on a spinal segment were evaluated, as well as distribution of strain intensity, mean strains, spinal deformation and destruction field was described. The constructed computer models could be used as a basis for developing a technique of predicting characteristic spinal injuries in consequence of specific extreme loads and pathologies.

Key words: mechanics, biomechanics, mathematical modeling, spinal column.

Поступила 30.06.2014

КЛИНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 616-009+612.8

ПРИМЕНЕНИЕ ИНГАЛЯЦИИ СУБНАРКОТИЧЕСКИХ ДОЗ КСЕНОНА В САНАТОРНОМ ЛЕЧЕНИИ ПОСТТРАВМАТИЧЕСКИХ СТРЕССОВЫХ РАССТРОЙСТВ

Игошина Т.В.^{1,2}, Котровская Т.И.¹, Бубеев Ю.А.¹, Счастливцева Д.В.¹, Потапов А.В.³

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем, Москва

²Клинический санаторий «Барвиха», Московская область

³ООО «Акела-Н», Московская область

E-mail: kotrovska@imbp.ru

Цель работы – исследование эффективности лечения невротических расстройств, связанных со стрессом, ксенонотерапией (экспериментальная группа) по сравнению с традиционным лечением (контрольная группа) в условиях санатория. Пациентам обеих групп, которыми являлись лица опасных профессий, назначали медикаментозную терапию, сеансы психотерапии и физиотерапевтическое лечение; кроме того, в экспериментальной группе назначали процедуры ингаляции терапевтических доз медицинского ксенона. Проведен сравнительный анализ качественных и количественных показателей электроэнцефалограммы (ЭЭГ), индекса сатурации крови кислородом, частоты сердечных сокращений и параметров артериального давления у членов обеих групп до и после лечения. Нормализация функций центральной нервной системы, активация парасимпатической нервной системы, уменьшение проявлений основных психопатологических и соматовегетативных расстройств, отмеченных у пациентов экспериментальной группы, рассматривались как признаки улучшения психического состояния и восстановления адекватных целостных форм поведения.

Ключевые слова: посттравматическое стрессовое расстройство, ингаляция терапевтических доз ксенона, электроэнцефалография, пульсоксиметрия, частота сердечных сокращений.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 58–63.

Профессиональная деятельность специалистов опасных профессий (военных, полицейских, пожарных, летчиков, спасателей и др.) характеризуется возникновением условий 2 типов. К 1-му типу можно отнести повседневную напряженную деятельность, приводящую к профессиональному истощению. Второй тип условий составляют так называемые критические инциденты. Во время критических инцидентов представители опасных профессий сталкиваются с реальной опасностью

для своей жизни, здоровья, благополучия окружающих, с массовыми человеческими жертвами и значительными материальными потерями. Вследствие реализации вышеописанных условий профессиональной деятельности у лиц опасных профессий нередко развивается синдром посттравматических стрессовых расстройств (ПТСР) [1–4].

Используемый в медицинской практике комплексный подход к коррекции посттравматических стрессовых расстройств с применением психофармакологических средств и немедикаментозных методов имеет целью воздействие на различные звенья патогенеза. Несмотря на то что общие закономерности возникновения и развития ПТСР не зависят от того, какие конкретные травматические события послужили этиологическим фактором [5], изучение характеристик конкретного пациента для выбора адекватной индивидуальной терапевтической тактики имеет несомненную значимость для достижения положительных результатов лечения. Санаторная медицинская помощь может существенно повысить эффективность профилактики и традиционного лечения аффективных расстройств. В связи с тем что сроки пребывания больного в санатории невелики, метод ингаляции ксенон-кислородной смеси позволяет при краткосрочной терапии, сочетающейся с курортными факторами, способствовать улучшению психического состояния пациентов, купированию патологических реакций, созданию мотивации к адекватному поведению, необходимому для повышения качества жизни.

Целью работы являлось сравнение эффективности лечения в условиях санатория невротических расстройств, связанных со стрессом, с применением ксенонотерапии (экспериментальная группа) по сравнению с традиционным лечением (контрольная группа).

Методика

Пациентами, поступившими на лечение в клинический санаторий и принявшими участие в исследовании, являлись работники силовых структур, военнослужащие, профессиональные спортсмены – представители экстремальных видов спорта, летчики гражданской авиации. Всего было обследовано 40 человек мужского пола в возрасте 30–42 лет с давностью невротических расстройств от 6 мес до 2 лет. Данные анамнеза пациентов, динамика их психического, соматовегетативного статусов в процессе лечения фиксировались в их индивидуальных картах.

Работа выполнена в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации, с соблюдением этических принципов проведения медицинских исследований, включающих людей в качестве испытуемых; у пациентов получено информированное согласие на эксперимент.

Были сформированы 2 сопоставимые по возрасту и клиническим проявлениям группы – контрольная и экспериментальная, в каждую из которых включили по 20 пациентов. У 8 человек в каждой из групп наблюдали тревожные расстройства, из них у 4 пациентов – панические атаки с выраженной вегетативной симптоматикой в виде гипергидроза, тахикардии, дискомфорта в области сердца, ощущения нехватки воздуха, головных болей, слабости, тошноты, кишечной дискинезии, у 4 человек тревожная симптоматика сочеталась с астенией, нарушениями сна, снижением работоспособности. У 5 обследуемых в каждой из групп наблюдали депрессивное состояние, из них у 3 пациентов отмечали депрессию средней тяжести с тревожным радикалом, тоскливым фоном настроения, ангедонией, идеаторной заторможенностью, нарушениями сна, у 2 пациентов депрессия носила астено-невротический характер с дистимией, ангедонией, симптомом раздражительной слабости. В каждой группе у 7 обследуемых был выражен астенический синдром, проявляющийся снижением концентрации внимания и объема воспринимаемой информации, рассеянностью, эпизодами раздражительности, вспыльчивости, ощущением внутреннего напряжения, головными болями, нарушениями сна.

Медикаментозная терапия в обеих группах осуществлялась по показаниям: при невротических расстройствах назначали ноотропный препарат – кортексин, витамины, дневные транквилизаторы. Для лечения тревожных расстройств и панических атак применяли кортексин, витамины, в некоторых случаях транквилизаторы бензодиазепинового ряда и антидепрессанты. При депрессивных состояниях назначали антидепрессанты, транквилизаторы, витамины, кортексин. Следует подчеркнуть, что ноотропный препарат кортексин регулирует

соотношение аминокислот, процессы торможения и возбуждения в мозге и, не оказывая избыточного активирующего влияния, восстанавливает биоэлектрическую активность головного мозга. Эти свойства ноотропного препарата кортексина особенно важны при терапии панических атак.

Во всех случаях проводили психотерапию в следующих модальностях: рациональная, телесно-ориентированная, когнитивная. В обеих группах проводили физиотерапевтическое лечение, включающее в себя ванны кислородные, общие углекислые, подводный душ-массаж, светотерапию с применением аппарата «Биоптрон». Пациентам назначался 10-дневный курс лечебной физкультуры и медицинского массажа.

Кроме вышеназванных мероприятий, пациентам экспериментальной группы назначали курс процедур ингаляции ксенон-кислородной смеси [6].

Обследование выполняли в день поступления в санаторий и на 14-й день пребывания в санатории.

Сравнение эффективности проводимой в 2 группах терапии оценивали по следующим методикам. Определяли степень насыщения крови кислородом, измеряя сатурацию артериальной крови кислородом (SpO_2) и частоту сердечных сокращений с применением пульсоксиметра 9500 ONYX. Прибор показывает средний процент насыщения кислородом молекул гемоглобина в определенном объеме крови. Измеряли параметры систолического (САД), диастолического (ДАД) и пульсового (П) давления. Нейрофизиологическую динамику прослеживали по показателям относительных значений мощности (ОЗМ) основных ритмов ЭЭГ-спектра суммарно для 14 отведений, регистрируя электроэнцефалограмму (ЭЭГ) по международной системе 10–20.

Полученные данные подвергались вторичной обработке по стандартным статистическим методикам (Statistica, 8).

Результаты и обсуждение

Гемодинамические показатели до и после лечения пациентов контрольной и экспериментальной групп представлены в табл. 1, 2.

У обследуемых экспериментальной группы по окончании лечения в среднем снизилась на 4,6 % ($p \leq 0,01$) ЧСС и одновременно с этим повысилась SpO_2 , хотя и незначительно (1 %), но с высокой степенью достоверности ($p \leq 0,01$). Кроме того, достоверно ($p \leq 0,05$) уменьшился средний по группе параметр САД и ДАД на 2,5 и 3,7 % соответственно. У пациентов контрольной группы достоверных изменений изучаемых параметров не выявлено.

Наблюдаемые после ингаляции ксенона сдвиги гемодинамических показателей и насыщения крови кислородом у пациентов экспериментальной группы происходят, вероятно,

Таблица 1

Показатели ЧСС и SpO₂ у пациентов обеих групп до и после лечения

Группа	ЧСС, мин ⁻¹		SpO ₂ , %	
	До лечения	После лечения	До лечения	После лечения
Контрольная	71,9 ± 1,39	71,7 ± 1,28	96,8 ± 0,21	96,75 ± 0,19
Экспериментальная	72,35 ± 1,59	68,8 ± 0,99	96,95 ± 0,23	97,8 ± 0,19

Таблица 2

Показатели систолического, диастолического, пульсового давления, у пациентов обеих групп до и после лечения

Группа	САД, мм рт. ст.		ДАД, мм рт. ст.		ПД, мм рт. ст.	
	До лечения	После лечения	До лечения	После лечения	До лечения	После лечения
Контрольная	125,5 ± 2,8	125,3 ± 2,6	80,5 ± 2,8	79,8 ± 2,7	45 ± 1,3	45,5 ± 1,2
Экспериментальная	124 ± 2,1	120,8 ± 2,1	80 ± 2,6	76,5 ± 1,8	44 ± 1,7	44,3 ± 1,7

вследствие симпатолитического действия ксенона, который понижает уровень адреналина в организме. Небольшая величина изменений этих параметров, возможно, обусловлена тем, что пациенты – соматически здоровые люди, имеющие пограничные психические расстройства. При этом известно, что величина SpO₂ в норме у пациентов молодого и среднего возраста, не имеющих легочной патологии, составляет 96–98 %.

Возникшие на фоне стрессовых ситуаций и связанные с усилением активности симпатической нервной системы изменения функционального характера уменьшаются за счет активизации парасимпатической нервной системы при ингаляции ксенона. Полученные результаты согласуются с данными изменения вариабельности сердечного ритма при ингаляции спортсменами ксенона после экстремальных физических нагрузок. Эти изменения свидетельствовали об увеличении активности парасимпатического звена нервной регуляции и о стабилизации вагосимпатического баланса спортсменов, что приводило к восстановлению уровня функционального состояния сердечно-сосудистой системы и поддержанию ее функциональных резервов на адекватном уровне [7].

Улучшение состояния пациентов экспериментальной группы происходило на фоне изменений нейрофизиологических показателей – относительных значений мощности основных ритмов ЭЭГ-спектра и альфа-индекса. Динамика относительных значений мощности спектра основных ритмов ЭЭГ у пациентов контрольной и экспериментальной групп представлена в табл. 3, 4. Данные приведены для 12 членов каждой группы, поскольку не все обследуемые были согласны на проведение ЭЭГ-обследования. При этом статистическая обработка

параметров проводилась по минимальной границе количества ЭЭГ пациентов контрольной группы.

Из представленных данных следует, что в экспериментальной группе пациентов происходило достоверное ($p \leq 0,05$) снижение ОЗМ дельта-диапазона на 11 % и тета-диапазона на 12 %, а также наблюдалась тенденция к уменьшению на 7 % ОЗМ бета-диапазона при одновременном увеличении на 12 % ОЗМ альфа-диапазона, тогда как в контрольной группе через две недели традиционной терапии не наблюдалось статистически достоверных изменений (рисунок).

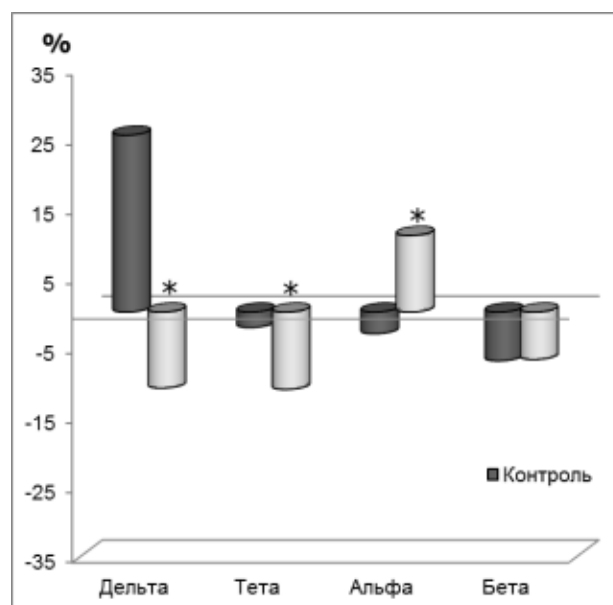


Рисунок. Нормированные к фону показатели ОЗМ основных ЭЭГ-диапазонов у пациентов 2 групп после лечения

* – $p \leq 0,05$

Таблица 3

Динамика ОЗМ основных ритмов ЭЭГ у пациентов контрольной группы

Обследуемый	Фоновые показатели				После лечения			
	Дельта	Тета	Альфа	Бета	Дельта	Тета	Альфа	Бета
1	20,91	19,82	26,79	18,29	23,72	19,36	28,16	14,47
2	16,62	17,81	58,25	10,20	10,24	15,10	59,95	6,81
3	15,25	19,05	49,04	15,19	13,41	15,79	50,58	12,11
4	30,61	18,34	24,18	10,61	24,27	15,66	32,13	14,43
5	17,22	12,60	35,05	19,89	24,56	11,52	42,53	20,45
6	12,02	12,66	59,45	7,35	11,66	11,46	63,91	6,05
7	17,07	18,80	25,90	18,33	26,10	18,77	16,51	16,08
8	27,82	27,29	28,63	10,83	30,12	30,79	24,05	13,05
9	22,15	20,97	39,31	14,52	19,97	19,01	45,36	12,30
10	6,80	40,10	46,18	9,63	15,94	37,84	36,88	6,27
11	19,68	17,00	45,00	14,88	26,66	26,08	25,64	18,45
12	10,54	24,65	43,08	19,73	21,19	21,78	38,69	17,13

Таблица 4

Динамика ОЗМ основных ритмов ЭЭГ у пациентов экспериментальной группы

Обследуемый	Фоновые показатели				После лечения			
	Дельта	Тета	Альфа	Бета	Дельта	Тета	Альфа	Бета
1	11,58	9,29	68,68	11,33	10,55	8,23	71,51	8,57
2	13,24	20,97	59,13	8,31	13,04	20,64	60,21	5,83
3	17,59	13,39	44,93	11,17	11,25	10,86	60,55	15,06
4	9,49	10,90	59,09	19,04	9,45	10,32	60,14	18,28
5	16,10	17,76	39,14	26,98	11,60	11,75	46,12	29,05
6	15,05	18,19	44,96	10,93	13,51	15,06	50,24	8,04
7	18,62	13,81	58,25	8,20	15,68	14,27	60,22	7,71
8	17,25	19,35	49,40	13,09	15,70	17,32	50,18	14,20
9	19,45	19,16	44,42	12,99	17,36	17,93	51,59	10,38
10	23,12	27,73	32,89	12,60	21,51	18,43	42,06	10,89
11	20,56	27,60	38,71	9,75	21,93	22,29	42,00	10,05
12	13,04	12,97	60,95	10,78	11,82	14,83	60,92	9,51

Ранее у этих пациентов по окончании лечения было выявлено достоверное ($p \leq 0,05$) превышение альфа-индекса на 20 % в экспериментальной группе по сравнению с контрольной [6].

Экспертный (качественный) анализ ЭЭГ пациентов обеих групп до лечения выявил следующие виды паттернов: 1) с преобладанием моноритмичного альфа-ритма (до 100 мкВ), практически не снижающегося по амплитуде при пробе «глаза открыты», и нарушением затылочно-лобного градиента; 2) с нерегулярным альфа-ритмом амплитудой до 40 мкВ и большим количеством полиморфных медленных волн; 3) десинхронизированную ЭЭГ с преобладанием бета-активности по всем областям мозга. Пароксизмальные вспышки медленноволновой активности присутствовали во всех фоновых ЭЭГ пациентов обеих групп в той или иной мере. Полученные результаты согласуются с данными

других авторов, отмечавших нарушения функционирования неспецифических интегративных систем мозга [8, 9] при исследовании нейрофизиологических характеристик лиц, страдающих невротическими расстройствами постстрессового характера. После лечения в контрольной группе количество лиц с десинхронизированной, так называемой плоской ЭЭГ, не уменьшилось. У пациентов, в ЭЭГ паттернах которых преобладал альфа-ритм, наблюдалось небольшое увеличение его амплитуды и степени организованности. При этом у всех лиц в этой группе пароксизмальные вспышки медленноволновой активности сохранялись, хотя их количество существенно уменьшилось. В экспериментальной группе у подавляющего большинства пациентов после лечения наблюдали достаточно регулярные колебания биопотенциалов с доминированием зонально-дифференцированного альфа-ритма

с затылочно-лобным градиентом параметров и средней амплитудой до 80 мкВ, умеренно выраженная бета-активность и небольшая представленность тета- и дельта-активности в виде отдельных волн.

Таким образом, восстановление основного ритма и достоверное снижение медленноволнового компонента ЭЭГ (по показателям качественного и количественного анализа), а также уменьшение симпатического компонента (по параметрам ЧСС и АД) в экспериментальной группе после лечения позволяет говорить об уменьшении степени регуляторной дисфункции нервной системы.

Анализ нейрофизиологических показателей и психологических свойств личности, подвергшейся воздействию травмирующих событий, дает возможность судить об адаптивной функции организма. Действие травматического события вызвало у пациентов декомпенсацию функциональных процессов в центральной нервной системе в связи с ее истощенностью, функциональной перегруженностью и уязвимостью в результате влияния экстремальных факторов как неустраимых элементов профессиональной среды. У пациентов обеих групп до начала лечения отмечали вегетативные расстройства и ухудшение общего самочувствия как при депрессивных состояниях, так и при невротических расстройствах.

Ранее у этих пациентов авторами были описаны результаты, свидетельствовавшие об уменьшении проявления основных психопатологических и соматовегетативных расстройств в экспериментальной группе по сравнению с контролем, при этом терапия проходила эффективнее и в более краткие сроки [6].

Известно, что в основе травматического стресса лежит сверхсильная активация стресс-реализующих систем, которая формирует устойчивые симптомы физиологической гиперактивации при участии неспецифических систем головного мозга, функциональным ядром которых является лимбико-ретикулярный комплекс, ответственный за процессы адаптации и организации целостных форм поведения. ЭЭГ паттерны обследуемых экспериментальной группы после лечения позволяют говорить об уменьшении степени дисфункции неспецифических церебральных структур и о нормализации корково-подкорковых взаимодействий.

Выводы

Сочетанное с ксенотерапией лечение невротических расстройств, связанных со стрессом, является более эффективным по сравнению с традиционным лечением в условиях санатория. Улучшение психического состояния пациентов и восстановление адекватных целостных форм поведения происходит на фоне редукции у них основных психопатологических и соматовегетативных

расстройств наряду с активацией парасимпатической нервной системы и нормализацией церебральных функций.

Применение ингаляции ксенон-кислородной смеси при осуществлении санаторной медицинской помощи может повысить эффективность не только лечения и реабилитации пациентов с невротическими расстройствами, но также профилактики подобных заболеваний, сохранения и повышения уровня здоровья в условиях значительного роста аффективных расстройств, обусловленных высоким уровнем стрессогенности жизни.

Работа выполнена по проекту «Нейропластические процессы мозга при коррекции расстройств, связанных со стрессом смертельно опасных состояний» по программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине».

Список литературы

1. Котенёв И.О. Психологическая диагностика постстрессовых состояний у сотрудников органов внутренних дел: Метод. пос. для практ. психологов. М., 1997.
Kotenev I.O. Psychological diagnostics of police officers' poststress states: Practical handbook for psychologists. Moscow, 1997.
2. Соловьева С.Л. Психология экстремальных состояний. СПб., 2003.
Soloveva S.L. Psychology of extreme states. Saint-Petersburg, 2003.
3. Тарабрина Н.В. Практикум по психологии посттравматического стресса. СПб., 2001.
Tarabrina N.V. A practical guide of post-traumatic stress psychology. Saint-Petersburg, 2001.
4. Тарабрина Н.В. Психология посттравматического стресса. М., 2009.
Tarabrina N.V. Posttraumatic stress psychology. Moscow, 2009.
5. Тарабрина Н.В., Соколова Е.Д., Лазебная Е.О., Зеленова М.Е. Посттравматическое стрессовое расстройство: психологические и клинические особенности, вопросы терапии // *Materia Medica*. 1996. № 1(9). С. 57–68.
Tarabrina N.V., Sokolova E.D., Lazebnaya E.O., Zelenova M.E. Posttraumatic stress disorder: psychological and clinical peculiarity, matters of therapy // Materia Medica. 1996. № 1(9). P. 57–68.
6. Игошина Т.В. Коррекция связанных со стрессом невротических расстройств методом ингаляции субнаркологических доз ксенона в условиях санатория // *Кремлевская медицина. Клин. вестн.* 2013. № 4. С. 37.
Igoshina T.V. Stress-related neurosis correction by method of inhalation of subnarcotic xenon doses in health centre // Kremlevskaya meditsina. Klinicheskiy vestnik. 2013. № 4. P. 37.

7. Ачкасов Е.Е., Рошин И.Н. Ксенон-кислородная смесь как средство восстановления спортивной работоспособности // Восстановительная медицина и реабилитация: Тез. 2011. Т. 2.

Achkasov E.E., Roshchin I.N. Xenon-oxygen mixture as means of sport performance restoring // Vosstanovitel'naya meditsina i reabilitatsiya: Tezisy. 2011. V. 2.

8. Мороз С.М., Мотрий Н.В., Вишневская Н.Г., Дукельский А.А. ЭЭГ-характеристики пароксизмальных состояний невротического регистра // Мед. исследования. 2001. Т. 1. Вып. 1. С. 61–62.

Moroz S.M., Motriy N.V., Vishnevskaya N.G., Dukelskiy A.A. EEG features of paroxysmal states of neurotic register // Meditsinskie issledovaniya. 2001. V. 1. № 1. P. 61–62.

9. Ларикова Т.И., Черевикова Г.М. Церебролизин – корректор адаптации при посттравматическом стрессовом расстройстве // Психиатрия и психофармакотерапия. 2003. № 1. С. 15–17.

Larikova T.I., Cherevikova G.M. Cerebrolysin as adaptation corrector of posttraumatic stress disorder // Psikhatriya i psikhofarmakoterapiya. 2003. № 1. P. 15–17.

Поступила 14.06.2014

PRACTICING SUBNARCOTIC XENON DOSE INHALATION IN SPA TREATMENT OF POSTTRAUMATIC STRESS-INDUCED DISORDERS

Igoshina T.V., Kotrovskaya T.I., Bubeev Yu.A., Schastlivtseva D.V., Potapov A.V.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 58–63

Purpose of the investigation was to compare and contrast effectiveness of xenon therapy of stress-induced neurotic disorders and traditional spa-based therapy. Patients of the experimental and control groups were people of risky professions who received drug therapy, psychotherapy and physiotherapy. The experimental group was additionally treated by inhalation therapeutic doses of medical xenon. Comparative analysis of qualitative and quantitative parameters of electroencephalogram (EEG), blood oxygen level, heart rate and blood pressure were compared in the groups before and after treatment. Recovery of the central nervous system functions, activation of parasympathetic involvement, abatement of main psychopathological and somatovegetative disorders in the experimental group were considered as signs of psychic improvement and return to the gestalt behavior.

Key words: posttraumatic stress-induced disorder, inhalation of therapeutic xenon dose, electroencephalography, pulse oximetry, heart rate.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 577:612.79

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДЕРМАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Лазарев А.О.

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва
E-mail: lazarev@icnet.ru

В исследовании, выполненном у 6 испытуемых, впервые показано, что 2 области кожи, находящиеся на большом расстоянии друг от друга, могут обладать одинаковой спонтанной электродермальной активностью (ЭДА) ($r = 0,98$). В то же время близко расположенные области кожи могут иметь разную ЭДА ($p = 0,001$). Установлена асимметрия в распределении ЭДА на поверхности тела человека. В большинстве случаев левая сторона туловища была заряжена отрицательно по отношению к правой. Для верхней части туловища такую особенность наблюдали в 59,2 % случаев, а для нижней – 87,3 %. В подавляющем числе наблюдений (98,6–100 %), верхняя часть туловища была заряжена отрицательно относительно нижней.

Ключевые слова: электродермальная активность, разность электрических потенциалов, базальная система.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2014. Т. 48. № 5. С. 64–67.

В электродермальной активности (ЭДА) можно выделить 2 различные по своей природе составляющие: фазическую, представляющую собой изменение электрических свойств кожи в ответ на стимул, и тоническую, или уровень электрических потенциалов. Предполагают наличие 2 независимых источников ЭДА: потовые железы и собственная электрическая активность эпителия. Общеизвестна роль потовых желез в этих процессах. Вместе с тем для объяснения электродермальных явлений, особенно тонической составляющей, недостаточно учитывать вклад потовых желез [1, 2]. В 2 общепризнанных гипотезах о механизмах ЭДА предполагается существование морфологической структуры, обладающей мембранными свойствами и являющейся эпителиальным источником электрической активности. Однако до сих пор нет единого мнения об источнике ЭДА и его локализации [1].

На основе анализа данных литературы и результатов собственных экспериментальных исследований автором была выдвинута гипотеза, что источником ЭДА может быть морфологическая структура, образованная базальной мембраной и

базальным слоем клеток эпителия. Этой структуре было дано название базальная система (БС). Согласно развиваемой гипотезе, ЭДА является результатом функциональной активности БС. Изменение функционального состояния организма сопровождается перераспределением электрических потенциалов на поверхности кожи, что обусловлено изменением электрохимической активности БС. БС – гетерогенная анизотропная структура, поэтому ее функциональная активность в разных областях может различаться, что должно отражаться на ЭДА [3].

Цель исследования: изучение топографических особенностей тонической эндосоматической составляющей ЭДА конечностей человека.

Методика

В исследованиях участвовали 6 испытуемых-добровольцев в возрасте от 27 до 38 лет. Все испытуемые прошли полное клиническое обследование, по результатам которого они были признаны здоровыми. Для изучения тонической составляющей ЭДА был использован метод регистрации разности электрических потенциалов (РЭП) между 2 областями поверхности кожи. Каждый испытуемый проходил 12 обследований. Для отведения электрической активности использовали неонатальные Ag/AgCl электроды фирмы Unilect. Эти электроды покрыты специальным двухслойным токопроводящим биоадгезивным гелем, что позволяет их использовать без применения электродных паст. Перед наложением электродов кожу не обрабатывали, так как имеются данные о влиянии спирта и детергентов на состояние эпидермиса [1]. Электроды помещали на ладонях (тенар), тыльной поверхности кисти левой руки, латеральной лодыжке левой ноги, латеральной лодыжке правой ноги и в области 6-го шейного позвонка. Регистрировали РЭП в 5 отведениях: 1 – тенар левой ладони – область 6-го шейного позвонка; 2 – тыльная поверхность левой кисти руки – область 6-го шейного позвонка; 3-тенар

Таблица 1

Характеристики РЭП по отведениям

Отведение	Среднее значение, мВ	Станд. ошибка	Максим. отрицат. значение, мВ	Максим. положит. значение, мВ	Положит. значение, %	Отрицат. значение, %
1	-6,5	0,73	-23,2	7,4	12,7	87,3
2	-0,3	0,72	-19,8	24,0	53,5	46,5
3	-5,6	0,72	-23,5	7,1	21,1	78,9
4	3,4	0,80	-18,8	17,3	80,3	19,7
5	5,8	0,83	-16,5	21,3	77,8	22,2

правой ладони – область 6-го шейного позвонка; 4 – латеральная лодыжка левой ноги – область 6-го шейного позвонка; 5 – латеральная лодыжка правой ноги – область 6-го шейного позвонка. Измерения РЭП проводили на автономном регистраторе постоянных потенциалов GL200. Во всех отведениях использовали один общий (референтный) электрод, расположенный в области 6-го шейного позвонка.

Схема регистрации ЭДА с одним общим электродом позволяла вычислить РЭП между любыми областями кожи, на которых находились электроды. Так, разность электрических потенциалов между ладонями вычисляли по формуле:

$$\Delta\varphi = (\varphi_{\text{рз}} - \varphi_{\text{лл}}) - (\varphi_{\text{рз}} - \varphi_{\text{пл}}) = \varphi_1 - \varphi_3,$$

где $\varphi_{\text{рз}}$ – электрический потенциал в области референтного электрода; $\varphi_{\text{лл}}$ – электрический потенциал в области измерительного электрода на ладони левой руке; $\varphi_{\text{пл}}$ – электрический потенциал в области измерительного электрода на ладони правой руке. Величины φ_1 и φ_3 регистрировались во время обследования: φ_1 – РЭП в 1-ом отведении, φ_3 – РЭП в 3-ем отведении.

Аналогичным образом вычисляли разность электрических потенциалов между другими областями тела.

Во время обследования испытался лежал с закрытыми глазами на кушетке в положении на животе. Регистрацию ЭДА проводили непрерывно в течение 15 мин. После проведения обследования измеряли разность потенциалов между референтным и остальными электродами. При обработке данных эта величина вычиталась из среднего значения РЭП, которое вычисляли за все время обследования. При обработке результатов использовали компьютерную программу Statistica 8.

Результаты и обсуждение

Как видно из результатов анализа ЭДА исследуемых областей тела, представленных в табл. 1,

дистальные отделы туловища могут быть как положительно, так и отрицательно заряжены относительно шейного отдела позвоночника. Так, ладони в подавляющем большинстве случаев (80–86 %) имели отрицательные значения и только в 14–20 % случаев – положительные. Обратная картина – большой процент положительных (77–80 %) и малый процент отрицательных значений РЭП (20–22%) – были обнаружены на лодыжках. ЭДА тыльной поверхности кисти левой руки менялась иначе, чем ЭДА ладони. Количество положительных и отрицательных значений РЭП было одинаково ($p = 0,41$). На кисти был зафиксирован максимальный диапазон изменения РЭП от -19,8 до 24,0 мВ и минимальная величина среднего значения РЭП, близкая к нулю.

Следует отметить, что характеристики ЭДА на симметричных областях тела верхних конечностей во многом совпадают, а на нижних – нет. Так, на руках (1-е и 3-е отведения) диапазоны изменения РЭП одинаковы и составляют 30,6 мВ. Одинаковы средние значения РЭП ($p = 0,41$) и количества положительных и отрицательных значений ($p = 0,18$). В то же время на ногах (4-е и 5-е отведения), несмотря на одинаковые диапазоны изменения РЭП и равные количества положительных и отрицательных значений ($p = 0,71$), существуют различия в средних величинах РЭП ($p = 0,04$).

Важно подчеркнуть, что средние значения РЭП в отведениях с рук имели отрицательное значение, тогда как в отведениях с ног – положительное. Таким образом, в среднем электрическая поляриность дистальных отделов рук имела обратный знак по отношению к дистальным отделам ног. Из 6 обследованных испытуемых только у 1 обследуемого отрицательные значения РЭП на ногах отмечали чаще, чем положительные.

Для изучения соотношения ЭДА на левой и правой стороне туловища [5] была исследована динамика ЭДА между симметрично расположенными областями тела, а именно между ладонями и между лодыжками.

Расчетные характеристики РЭП

Отведение	Среднее значение, мВ	Стандартная ошибка	Максимальное отрицательное значение, мВ	Максимальное положительное значение, мВ	Положительное значение, %	Отрицательное значение, %
Левая рука – правая рука	-0,9	0,3	-13,0	5,5	40,8	59,2
Левая нога – правая нога	-2,4	0,3	-10,0	8,8	12,7	87,3
Левая рука – левая нога	-9,9	0,6	-22,6	-0,5	0	100,0
Правая рука – правая нога	-11,5	0,6	-26,8	0,2	1,4	98,6

Результаты вычисления РЭП между симметричными областями тела (табл. 2) показывают, что левая сторона туловища в большинстве случаев заряжена отрицательно по отношению к правой. При этом процент таких случаев для верхней части туловища составляет 59,2 %, а для нижней – 87,3 %. В подавляющем большинстве случаев (98,6–100 %), верхняя часть туловища заряжена отрицательно по отношению к нижней и между ними были наиболее выражены различия в величинах РЭП ($p = 0,08$).

Таким образом, полученные данные указывают на то, что электрическая полярность тела человека имеет динамическую структуру, более сложную, чем считалось ранее [4, 6].

Еще одна особенность ЭДА, которую необходимо отметить, – это наличие на поверхности кожи мест, удаленных друг от друга на значительное расстояние, но имеющих одинаковую динамику электрической активности. На рисунке показан фрагмент записи РЭП в 3 отведениях: 2 – с ладоней и 1 – с тыльной поверхности кисти руки. Как видно

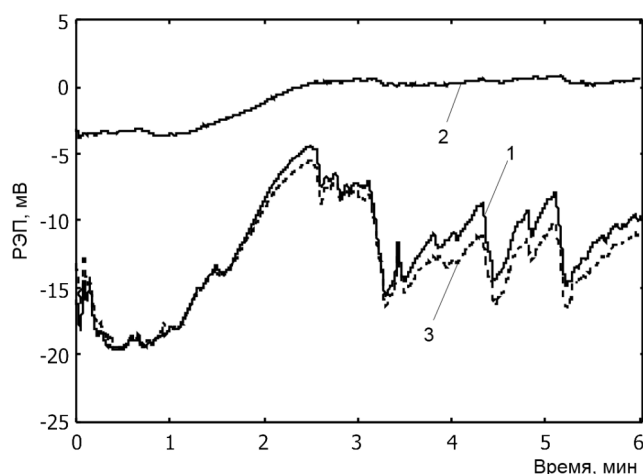


Рисунок. Фрагмент записи ЭДА в 3 отведениях у одного из участников эксперимента. 1 – 1-е отведение; 2 – 2-е отведение; 3 – 3-е отведение

на рисунке, динамика РЭП в отведениях с ладоней обеих рук идентична ($r = 0,98$). В то же время спонтанный характер РЭП, зарегистрированной в отведениях с ладоней, отсутствует при отведении с тыльной поверхности кисти. Следует учитывать, что расстояние между электродами, расположенными на ладонях, составляет 1,6–1,8 м, а между электродами, находящимися на 2 поверхностях кисти одной руки, – всего 4–5 см. При этом величины РЭП 2 поверхностей кисти одной руки различаются достоверно ($p = 0,001$), тогда как на ладонях рук, находящихся на большом расстоянии друг от друга, они не различаются ($p = 0,41$) и имеют один и тот же диапазон изменения РЭП. Кроме того, электрическое состояние тыльной поверхности кисти руки более нестабильно, чем ладони. Об этом свидетельствуют равные количества положительных и отрицательных значений РЭП ($p = 0,41$) и близкое к нулю среднее значение.

В развитие гипотезы о БС как источнике ЭДА можно отметить, что одинаковая спонтанная ЭДА удаленных областей кожи при различающейся ЭДА близко расположенных участков, различия в ЭДА верхней и нижней частей туловища свидетельствуют об анизотропности и гетерогенности источника ЭДА. Поскольку аналогичными свойствами обладает и БС, то полученные данные косвенно подтверждают гипотезу о том, что источником ЭДА является БС.

Выводы

Проведенное исследование показало, что ЭДА имеет ярко выраженные топографические особенности. Впервые показано, что 2 области кожи, находящиеся на большом расстоянии друг от друга, могут обладать одинаковой спонтанной ЭДА, т.е. электрическая активность этих областей может синхронизироваться. В то же время близко расположенные области кожи могут иметь достоверно различающуюся ЭДА. Установлена асимметрия в распределении ЭДА на поверхности тела человека.

В большинстве случаев левая сторона туловища заряжена отрицательно по отношению к правой. В подавляющем большинстве случаев верхняя часть туловища заряжена отрицательно относительно нижней. Между верхней и нижней частями туловища наиболее выражены различия в величинах РЭП.

Список литературы

1. Boucsein W. Electrodermal Activity. Second Edition. Springer, 2012. P. 618.
2. Edelberg R. Independence of galvanic skin response amplitude and sweat production // J. of Investigative Dermatology. 1964. № 42. P. 443–448.
3. Лазарев А.О. Постоянные электрические потенциалы кожи как интегральный показатель функционального состояния // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1993. № 4. С. 485–490.
4. Lazarev A.O. Direct current skin potentials as functional state index // Izvestiya AN SSSR. Seriya biologicheskaya. 1993. № 4. P. 485–490.
5. Becker R.O. The bioelectric factors in amphibian-limb regeneration // J. of Bone and Joint Surgery. 1961. V. 43-a. № 3. P. 643–656.
6. Baque E., Catteau M., Miossec Y. Asymmetry of electrodermal activity // Biol. Psychol. 1984. № 18. P. 219–239.
7. Barker A.T., Jaffe L.F., Venable J.W. The glabrous epidermis of cavies contains a powerful battery // Am. J. Physiol. 1982. № 242. P. 358–366.

Поступила 27.02.2014

TOPOGRAPHIC CHARACTERISTICS OF THE HUMAN ELECTRODERMAL ACTIVITY

Lazarev A.O.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2014. V. 48. № 5. P. 64–67

The investigation with participation of 6 test-subjects provided the first evidence that two dermal areas far apart from each other may possess identical spontaneous electrodermal activity (EDA) ($r = 0.98$) and, on the contrary, adjacent dermal areas may differ in EDA ($p = 0.001$). Asymmetry in EDA distribution across the human body was demonstrated. Most often the left part of the body was negatively charged relative to the right part. This held true also to the upper body in 59.2 % cases and the lower body in 87.3 % cases. In the vast majority of cases (98.6–100 %) the upper body was charged negatively relative to the lower body.

Key words: electrodermal activity, difference of electrical potentials, basal system.

Редколлегия журнала сердечно поздравляет
с юбилейными датами ведущих специалистов
в области космической медицины и биологии,
сотрудников ИМП:

Чекачеву Татьяну Ивановну

Комаревцева Владимира Николаевича

Чернову Елену Гелиевну

Епихина Валерия Ивановича

Берковича Юлия Александровича

Нидеккер Ирину Георгиевну

Добрые Вам пожелания и плодотворного сотрудничества
с нашим журналом!