

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
ИНСТИТУТ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ФИЗИОЛОГИИ И БИОХИМИИ
ИМ. И.М. СЕЧЕНОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
СЕКЦИЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ПРОБЛЕМ НАУКИ
И ОБРАЗОВАНИЯ

В. С. Новиков, С. И. Сороко

**ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Политехника-принт
Санкт-Петербург
2017

УДК 612.014.4; 612.017.2; 613.16

ББК 52.5

Н731

Рецензенты:

академик РАН, доктор медицинских наук, профессор **Н. П. Веселкин**,
член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор **Н. Н. Каркищенко**

Новиков В. С., Сороко С. И.

Н731 Физиологические основы жизнедеятельности человека в экстремальных условиях / В. С. Новиков, С. И. Сороко. – СПб: Политехника-принт, 2017. – 476 с.

ISBN 978-5-906931-26-9

В монографии представлены литературные и собственные данные об особенностях реакции организма человека на низкие и высокие температуры, гипоксию, гиподинамию, изолированные и комбинированные воздействия гелиогеофизических и метеорологических факторов, социальную изоляцию малочисленных коллективов. Особое внимание уделено оценке экологической значимости природных, техногенных и социальных факторов для нормальной жизнедеятельности человека, определению степени риска для состояния здоровья при нахождении в экстремальных зонах обитания (Арктике, Антарктике, горах, пустыне, на море и др.). Рассмотрены нейрофизиологические, биохимические и психологические основы индивидуальной устойчивости человека к экстремальным воздействиям, возможные способы ее повышения. Описаны механизмы развития суперстрессовых (критических) состояний при возникновении чрезвычайных ситуаций при высотных полётах, моделировании кораблекрушений, резкой смене контрастных климатогеографических условий. Даны теоретические обоснования и приведены экспериментальные данные по прогнозированию и коррекции функциональных нарушений и дезадаптационных срывов, профилактике состояний, угрожающих срывом деятельности.

Издание предназначено для специалистов в области военной, авиакосмической, морской, спортивной физиологии и экстремальной медицины, а также для студентов и аспирантов медицинских, биологических и психологических факультетов.

Novikov V. S., Soroko S. I.

Physiological bases of human activity in the extreme conditions / V. S. Novikov, S. I. Soroko. – St.Petersburg, Politehnika-print, 2017. 476 p.

The book presents literature and own data about particularities of human organism reactions on low and high temperatures, hypoxia, hypodynamic conditions, isolated and the combined influences of heliogeophysical and meteorological factors, social isolation of small collectives. Special attention is paid to the assessment of the ecological significance of natural, technological and social factors for normal activity of the person, to definition of risk's degree for the human health in extreme zones of living (the Arctic, Antarctic, mountains, deserts, at the sea, etc.). Neurophysiological, biochemical and psychological basics of individual person resistance and possible ways of its increase to extreme influences are covered in the book. Mechanisms of excessive stressful (extreme) states development at emergency situations during high-rise flights, model operations of ship-wrecks, contrast sharp changes of climate geographic conditions are described. Theoretical justifications and the experimental data on prediction and correction of the functional violations and disadaptation failures, prophylaxis of the states menacing with activity failure are provided.

The book is intended for specialists in the field of military, aerospace, marine, sports physiology and extreme medicine, also for students and graduate students of medical, biological and psychological faculties.

УДК 612.014.4; 612.017.2; 613.16

ББК 52.5

ISBN 978-5-906931-26-9

© Новиков В. С., Сороко С. И., 2017

ионной проводимости каналов в зависимости от флюктуации окружающей среды (Bezrukov S. M., Vodyanoy I., Parsegian V. A., 1995; Pustovoyt M. A., Sibilev A. I., Bezrukov S. M., 1995). Во-вторых, временная задержка и ответы системной нервной регуляции могут быть причиной $1/f$ модуляций, например, флюктуации сердечного ритма и кровяного давления (Musha T., Yamamoto M., 1995).

Таким образом, приведенные выше исследования многолетней динамики биохимической системы, с одной стороны, и литературные сведения о физико-химических и биохимических механизмах, с другой стороны, доказывают очевидность многофакторного воздействия космогеофизических параметров на биохимический статус человека, который варьирует и модулируется сложной совокупностью глобальных физических факторов.

5.2. Амплитудно-частотные и пространственно-временные перестройки биоэлектрической активности мозга человека при сильных возмущениях геомагнитного поля

Биосфера Земли подвержена постоянному воздействию космических факторов, среди которых основное место занимают солнечная активность (электромагнитные излучения – видимый свет, ультрафиолетовое, радио, рентгеновское и др.) и корпускулярное излучение (солнечный ветер, солнечные космические лучи от вспышек), а также состояние межпланетного магнитного поля, галактических магнитных полей и галактические излучения. Эти факторы наиболее выражены в полярных районах нашей планеты, что объясняется структурой геомагнитного поля Земли. В настоящее время в научной литературе накоплено много данных о влиянии на человека комплекса гелиокосмических факторов, однако биофизические и физиологические механизмы их воздействия на живые системы в большинстве остаются неясными и во многом противоречивыми. Это в полной мере относится и к влиянию на человека геомагнитной активности.

Фоновые электромагнитные поля считаются одним из важнейших экологических параметров (Дубров Ф. П., 1974; Темурьянц Н. А., Владимирский Б. Л., Тишкин О. Г., 1992). Имеется в виду постоянно существующий на поверхности Земли фон электромагнитных колебаний на частотах ниже 103 Гц (низкие и сверхнизкие частоты). Он формирует-

ся несколькими источниками: микропульсациями геомагнитного поля, очень низкочастотными излучениями магнитосферы, атмосфериками (низкочастотная часть спектра излучения молниевых зарядов). Напряженность поля во всем этом диапазоне частот сильно варьирует в связи с солнечной активностью. Низкочастотные электромагнитные поля проникают с малым затуханием практически всюду – в почву, толщу воды, замкнутые помещения.

Имеются сложные взаимодействия солнечного ветра и межпланетного магнитного поля с магнитосферой, которые вызывают соответствующие возмущения ЭМП Земли. Существуют глобальные (планетарные) и локальные (в определенных областях Земли) возмущения ЭМП (магнитные бури). Различают два основных типа магнитных бурь: с внезапным и постепенным началом. Магнитные бури с внезапным началом мощнее и следуют после мощных вспышек на Солнце с запаздыванием порядка 1,5–2,0. Магнитные бури с постепенным началом, напротив, менее мощные и являются вкладом в регулярную ритмическую компоненту ЭМП. Этот тип периодических возмущений ЭМП тесно связан с секторами межпланетного магнитного поля и, по сути, он – высокоскоростные струи солнечного ветра в пределах сектора данной полярности. Магнитосфера нашей планеты очень четко реагирует на прохождение границ межпланетного сектора, что и находит отражение в изменении ЭМП. Прохождение границ сектора сопровождается масштабными изменениями электромагнитного фона на всей поверхности Земли. Изменения ЭМП, обусловленные волновым ионизирующим излучением (изменениями ионосферной проводимости), менее выражены по своим масштабам.

Отметим, что любые изменения на Солнце, сопровождающиеся вариациями ионизирующего излучения, немедленно обнаруживаются во флуктуациях ГМП, даже 5-минутные акустические собственные солнечные колебания.

Однако до сих пор считается, что эти флуктуации не имеют экологической значимости для живых организмов (Владимирский Б. М., Норманский В. Я., Темурыянц Н. А., 1994).

В исследованиях космофизических корреляций и реакций живых организмов важно учитывать периоды и амплитуды изменений этих явлений. Это связано с возможностью взаимодействия природных факторов и колебательных процессов биологических систем. Предполагаем, что чем ближе величина их периодов, тем сильнее взаимодействие. Явление захвата частоты и согласования фаз (синхронизация), воз-

возникновения резонанса – наиболее вероятный механизм наблюдаемых эффектов (Владимирский Б. М., 1982; Кисловский Л. Д., 1982). Очевидно, при этом могут меняться, и величина реакции живых систем (амплитудная модуляция), и перестройки биоритмики физиологических процессов (частотная модуляция). Такие изменения в информационно-регуляционных процессах организма могут создавать не только повышенное напряжение регулирующих систем, но и вызывать дизрегуляторные расстройства, сопровождаемые нарушением общего функционального состояния и патологическими отклонениями в работе различных систем. Последние часто возникают у метеочувствительных людей и людей с явной или скрытой патологией (Шеповальников В. И., Сороко С. И., 1992).

В то же время на периодические фоновые колебания гелиофизических факторов накладываются нерегулярные возмущения, в основном связанные с изменением хромосферной активности Солнца. Эти возмущения, в частности магнитные бури, могут на порядок превышать фоновые периодические колебания ГМП. Если живые организмы чувствительны к периодическим колебаниям ГМП, погоды (о чем имеются многочисленные экспериментальные данные), то как они реагируют на отдельные сильные возмущения? Учитывая физическую природу геомагнитных полей и эндогенных магнитных полей организма (в частности, магнитоэнцефалограммы), можно предположить, что взаимодействие ЭМП с биоэлектрическими процессами живых существ может происходить даже на уровне слабых информационно-регуляционных взаимодействий.

В литературе есть данные об особенностях влияния электромагнитных полей на организм человека и животных (Мизун Ю. Г., 1998, Холодов Ю. А., 1982; Archer V. E., 1978; Becker R. O., 1963; Persinger M. A., 1984; Presman A. S., 1970; Shepard A. R., Eisenbud M., 1977; Villosesi G., Kopitenko Y. A., Plitsyna N.G., 1994), в том числе на высшую нервную деятельность (Белишева Н. К, Попов А. Н., Петухова Н. В., 1995; Григорьев П. Е., 2008; Grigoryev P., Valserman A., Rozanov V., 2009) и электрическую активность головного мозга (Холодов Ю. А., 1982; Холодов Ю. А., Лебедева Н. Н., 1975; Холодов Ю. А., Шишло М. А., 1979; Adey W. R., Bawin S. M., 1977; Bhashara D. S., Srivastava V. I., 1970). В экспериментальных исследованиях с использованием искусственных ЭМП показано, что под влиянием ЭМП выход Ca^{2+} из тканей мозга может увеличиваться (Акоев И. Г., Каранова М. В., Кузнецов В. И., 1985; Adey W. R., Bawin S. B., Lamence A. F., 1982). При воздействии низкочастотных ЭМП

или попадании частоты модуляции СВЧ в спектр собственной ритмической активности, например, мозга, амплитуда отдельных ритмов ЭЭГ может увеличиться (Холодов Ю. А., 1982).

Геомагнитная активность и ее периодические и внезапные возмущения сильнее всего проявляются в высоких широтах («полярные шапки»). Для этих областей характерно протекание особых явлений, а глобальные возмущения выглядят здесь несколько по-иному, чем на средних или умеренных широтах. Для полярных широт существует особый вид возмущений ионосферы, наступающих после больших хромосферных вспышек на Солнце и обусловленных солнечными космическими лучами, – «поглощение (космических радишумов) в полярной шапке». Эти явления наступают, спустя несколько часов после начала вспышки на Солнце (Владимирский Б. М., Норманский В. Я., Темурьянц Н. А., 1994).

Большинство работ, посвященных влиянию электромагнитного, постоянного и переменного магнитных полей на организм, выполнены на животных в экспериментальных условиях с использованием искусственных электромагнитных полей. Работы же, в которых исследуется влияние геомагнитного поля Земли на биоэлектрическую активность головного мозга человека, и в частности на ЭЭГ, немногочисленны, разбросаны по нерегулярным публикациям, где изучаются, как правило, вторичные показатели ЭЭГ, такие как корреляции между отведениями ЭЭГ (Белов Д. Р., Кануников И. Е., Киселев Б. В., 1998) или межполушарная асимметрия (Раевская О. С., Рыжиков Г. В., 1984), либо представлены примеры отдельных наблюдений (Парфенов В. А., Доронин В. Н., Тлеулин С. Ж., 1998). В силу больших трудностей при сборе экспериментального материала и сложности при выделении «чистых» эффектов влияния на характеристики ЭЭГ именно фактора изменяющегося геомагнитного поля от других факторов проблема сопряженных ответов биоэлектрической активности остается открытой. До сих пор неясно, влияют ли возмущения геомагнитного поля преимущественно на амплитуду отдельных ритмов ЭЭГ, их частотные характеристики или при этом меняется и пространственно-временная организация суммарной биоэлектрической активности. В литературе мы не нашли сведений об индивидуальных особенностях этих реакций, их связи с пластичностью и устойчивостью механизмов саморегуляции мозга, метеочувствительностью человека.

В связи с этим цель исследования – выявление общих и индивидуальных особенностей, сопряженных амплитудно-частотных и временных перестроек ЭЭГ у лиц, проживающих в Заполярье, и резкими колебаниями уровней напряженности ГМП.

Учитывая, что самые сильные возмущения ГМП регистрируются в полярных областях Земли и что в 2012 г. Солнце находилось в фазе повышенной активности, мы проводили исследования в Заполярье в г. Апатиты Мурманской области (67°57' с. ш., 33°39' в. д.). В эксперименте приняли участие 12 практически здоровых мужчин в возрасте от 19 до 37 лет. Исследования были специально приурочены к периоду с 24.09 по 18.10.2012 г., когда по прогнозу ожидалось повышение солнечной активности с сильными магнитными возмущениями (магнитные бури). Чтобы по возможности захватить периоды фоновой активности, момент наивысшей активности и прекращения магнитной бури, ЭЭГ регистрировали ежедневно в течение указанного промежутка времени у всех 12 испытуемых. Регистрацию ЭЭГ осуществляли на электроэнцефалографе «Энцефалан-ЭЭГ 19/26» (фирмы «Медиком МТД», г. Таганрог) Исследование выполнено совместно с С. С. Бекшаевым, Н. К. Белишевой и С. В. Пряничниковым.

Анализу подвергались записи ЭЭГ длительностью 3 мин в спокойном состоянии с закрытыми глазами. Из трехминутной записи выбирали непрерывный безартефактный отрезок длительностью 1 мин, который и подвергали дальнейшей обработке. Частота оцифровки ЭЭГ составляла 250 Гц. Используя средства программного обеспечения электроэнцефалографа «Энцефалан-131-3», предварительно оценивали спектральную мощность (во всех отведениях) в традиционных частотных диапазонах: дельта- (0,5–4 Гц), тета- (4–8 Гц), альфа- (8–13 Гц) и бета-ритмов (13–30 Гц). Для оценки спектральной мощности с высоким частотным разрешением использовали модуль FFTиз пакета «Statistica 6» (для записи ЭЭГ длительностью 1 мин минимальный шаг по частоте составлял 0,017 Гц). Анализировали ЭЭГ с помощью метода изучения динамической структуры взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ (Сороко С. И., Бекшаев С. С., Сидоров Ю. А., 1990).

Временную организацию волновой структуры ЭЭГ, отражающую характер межцентральных взаимоотношений, оценивали по взаимодействию компонентов ЭЭГ. Метод основан на анализе матриц переходных вероятностей между волнами ЭЭГ различных диапазонов частот в их временной последовательности.

По матрице переходных вероятностей строили вероятностный ориентированный граф, вершинам которого соответствуют ритмы ЭЭГ (бета2 – 30–17 Гц, бета 1 – 17–12 Гц, альфа2 – 12–9 Гц, альфа1 – 9–7 Гц, тета2 – 7–5 Гц, тета1 – 5–3,5 Гц, дельта- 3,5–0,5 Гц), а ребрам графа – вероятности переходов между соответствующими компонентами ЭЭГ,

при этом толщина ребра пропорциональна значению соответствующей вероятности перехода.

Для получения информации о геомагнитных вариациях использовали локальные трехчасовые индексы $K(zhd)$ геомагнитной активности с официального сайта Sodankylä Geophysical Observatory (67°22' с. ш., 26°38' в. д.) (<http://www.sgo.fi>), полученные из компонент Z, H, D геомагнитного поля, и Ак индексы, полученные усреднением индексов $K(zhd)$ (среднесуточный индекс возмущенности ГМП). Для данной обсерватории локальный максимальный трехчасовой геомагнитный индекс $K=9$ соответствует напряженности магнитного поля 1500 нТ. Обсерватория находится практически на той же широте, что и г. Апатиты, и это позволяет считать, что гелиомагнитные изменения для города и обсерватории идентичны. Уникальность этих экспериментальных данных в том, что в промежутке с 24.09.2012 г. (первый день регистрации ЭЭГ) по 18.10.2012 г. (последний день регистрации ЭЭГ) геомагнитные вариации в некоторые дни достигали величин, соответствующих геомагнитным бурям. Так 1, 8, 9, 13, 14 октября индекс Ак достигал значений 54, 60, 69, 64, 56 соответственно. При этом локальный трехчасовой индекс ГМА в эти дни достигал значений 5, 6, 7 в моменты регистрации ЭЭГ, что свидетельствует о высоком уровне напряженности геомагнитного поля. Для изучения реакций ЭЭГ на изменения ГМП применяли методы дисперсионного анализа ANOVA и MANOVA, а также использовали обобщенные линейные модели из пакета «Statistica 6».

В соответствии с основной целью нашего исследования одним из наиболее информативных показателей вариаций именно геомагнитного поля, позволяющим в реальном времени (on-line) проследить его динамическое влияние на характер ЭЭГ, является локальный трехчасовой геомагнитный индекс K , поскольку его значение можно приурочить ко времени регистрации ЭЭГ с точностью в 3 ч. По методике построения индекса K (Биогенный..., 1989), из его значения вычитают эффекты, связанные с солнечной Sq и лунной L суточными вариациями магнитного поля. Исключают также и эффекты, связанные с влиянием электромагнитного излучения солнечных вспышек на магнитосферу Земли (sfe-эффект солнечных вспышек). Таким образом, индекс K можно выбирать в качестве независимой переменной как во множественных регрессионных моделях, так и в многомерном дисперсионном анализе, не опасаясь эффектов влияния на индекс K других «независимых» гелио- и геомагнитных факторов, если они учитываются в обработке экспериментальных данных.

Результаты множественного дисперсионного анализа, в котором предиктором являлся локальный трехчасовой индекс ГМП, а в качестве зависимых переменных выбирались спектры мощности в частотных диапазонах, соответствующих дельта-, тета-, альфа-, бета-ритмов ЭЭГ во всех отведениях, показали, что имеется статистически значимое влияние выбранного предиктора (ГМП) на спектр мощности ЭЭГ. Многомерный критерий лямбда-Уилкса (λ) оказался значим на уровне $p < 0,002$ и равен 0,29. Известно (Крамер Г., 1975), что λ является аналогом коэффициента детерминации R^2 в одномерных моделях и $1-\lambda$ интерпретируется как доля объясненной предикторами обобщенной дисперсии (в данном случае 70%). Полученное в результате проведенных вычислений значение λ является весомым основанием для более подробного и детального анализа полученных экспериментальных данных.

В табл. 25 сведены апостериорные оценки значимости групповых средних по критерию Фишера (критерия наименьших значимых разностей) проведенного дисперсионного анализа спектров мощности отдельно по каждому ритму ЭЭГ во всех отведениях.

Из табл. 25 видно, что значимые отличия спектров мощности ЭЭГ, зарегистрированной во временные промежутки с сильно возмущенным ГМП ($K = 7$), от спектров, полученных в моменты с меньшими напряжениями ГМП, обнаруживаются только в левом полушарии мозга.

Таблица 25

Отличие усредненных по обследованной выборке испытуемых ($n = 10$) спектров мощности ритмов ЭЭГ на разных уровнях фактора K «локальный трехчасовой индекс ГМП» от значения спектра при $K = 7$ (по результатам дисперсионного анализа)

Диапазон частот ЭЭГ	Отведения ЭЭГ											
	1-3		СЗ		РЗ		F4		С4		Р4	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Бета	6,2	>0,1	5,1	>0,2	9,1	>0,08	5,9	>0,1	5,6	>0,2	8,5	>0,3
Альфа	9,5	>0,8	8,0	>0,7	26	>0,7	10,4	>0,7	8,1	>0,6	28,4	>0,5
Тета	11,8** 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6		9,7** 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6		10,3** 0, 1, 2, 3, 4, 5		6,8	>0,6	5,0	>0,3	7,0	>0,3
Дельта	11,5 $p > 0,3$		6,7* 0, 1, 2, 3		6,3* 0, 1, 2, 3, 5		9,1	>0,5	4,2	>0,4	4,7	>0,3

Примечание: В каждой ячейке таблицы указано значение F-критерия, уровни значимости различий между спектрами при $K = 7$ в сравнении с остальными: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$. Вторая строка в ячейках – значения индексов K , для которых спектр мощности значимо отличается от спектра при $K = 7$.

При этом значимые отличия выявляются в низкочастотных составляющих спектра мощности ЭЭГ (в диапазонах тета- и дельта-ритмов). Более выраженная реакция происходит в частотном диапазоне тета-ритма, она распространяется на левые лобные, центральные и теменные области мозга. Для частотного диапазона дельта-ритма значимые отличия спектров выявляются только при практически невозмущенном ГМП ($K = 0, 1, 2, 3$) и, начиная с $K > 4$, статистически неотличимы от максимально возмущенного ГМП ($K = 7$). Это означает, что спектры ЭЭГ в дельта-диапазоне частот имеют высокую чувствительность к изменению напряженности ГМП.

Вместе с тем этого нельзя утверждать о мощности в тета-диапазоне частот, поскольку, как видно из табл. 25, значения спектра при высокой напряженности ГМП ($K=7$) статистически значимо отличаются от таких при меньших значениях K . Этот факт свидетельствует о пороговом характере реакции ЭЭГ на повышение локального трехчасового геомагнитного индекса в диапазоне частот тета-ритма. В правом полушарии изменения спектра различных ритмов ЭЭГ также происходят, но не достигают статистически значимого уровня.

Однако если рассмотреть общую картину распределения спектров мощности по ритмам и отведениям, представленную на рис. 54 и 55, то мы увидим, что спектр мощности в частотной полосе альфа-ритма в отведении с максимальной его выраженностью (в данном случае правое теменное отведение Р4) имеет регулярную тенденцию к уменьшению при увеличении напряженности ГМП, начиная с $K = 4$, и при максимальном значении $K = 7$ резко уменьшается, достигая значений, характерных для левого полушария (отведение Р3) при невозмущенном ГМП.

Это означает уменьшение межполушарной асимметрии в частотном диапазоне альфа-ритма, что согласуется с данными, полученными при исследовании межполушарной асимметрии в условиях изменения напряженности ГМП (Раевская О. С., Рыжиков Г. В., 1984). Авторы обнаружили изменения в соотношениях ритмов, доминирующих в каждой области коры головного мозга при изменении дисперсии суточной вариации индекса K .

Нарушение межполушарной асимметрии может приводить к изменению функциональной асимметрии и, как следствие, к нарушению функционирования ЦНС. Отметим, что реакции бета-ритма как в левом, так и в правом полушарии однотипны: наблюдается резкое усиление спектральной мощности при максимальном индексе ГМП ($K = 7$). При этом более выраженная реакция обнаружена в правом полушарии (рис. 54).

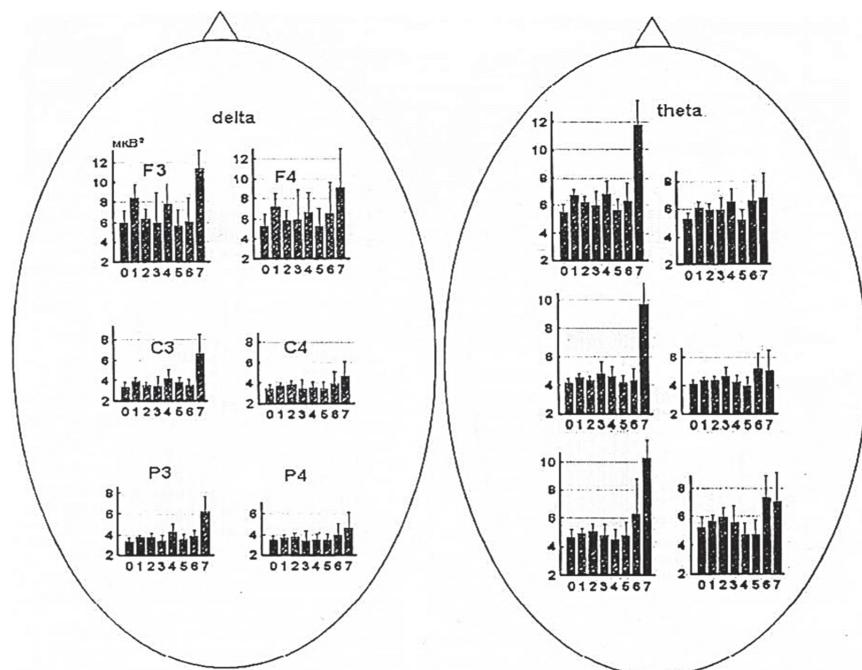


Рис. 53. Распределение усредненных по испытуемым спектров мощности дельта- и тета-ритмов ЭЭГ в различных отведениях в зависимости от значения локального трехчасового геомагнитного индекса К. По ось абсцисс – значение локального трехчасового геомагнитного индекса К в моменты регистрации ЭЭГ, по оси ординат – средние значения ($n = 10$) спектра мощности, мкВ², тонкие вертикальные отрезки – 95%-ные доверительные интервалы для соответствующих средних значений.

Как видно на рис. 53 и 54, когда индекс К принимает значение 4, наблюдается регулярный скачок мощности по всем ритмам в соответствующих им доминирующих отведениях. Если индекс К следует усредненному планетарному индексу K_p , и, следовательно, индексу магнитных бурь G , то становится понятно, что указанные скачки мощности происходят в моменты перехода к магнитной буре, поскольку G -индекс вычисляется как $K_p - 4$. Значению индекса $K_p = 5$ соответствует $G1$ (слабая буря).

Сравнивая данные, представленные в табл. 25, на рис. 53 и 54, можно утверждать, что усреднение полученных изменений спектральных характеристик ЭЭГ по всей группе лиц для фиксированных индексов

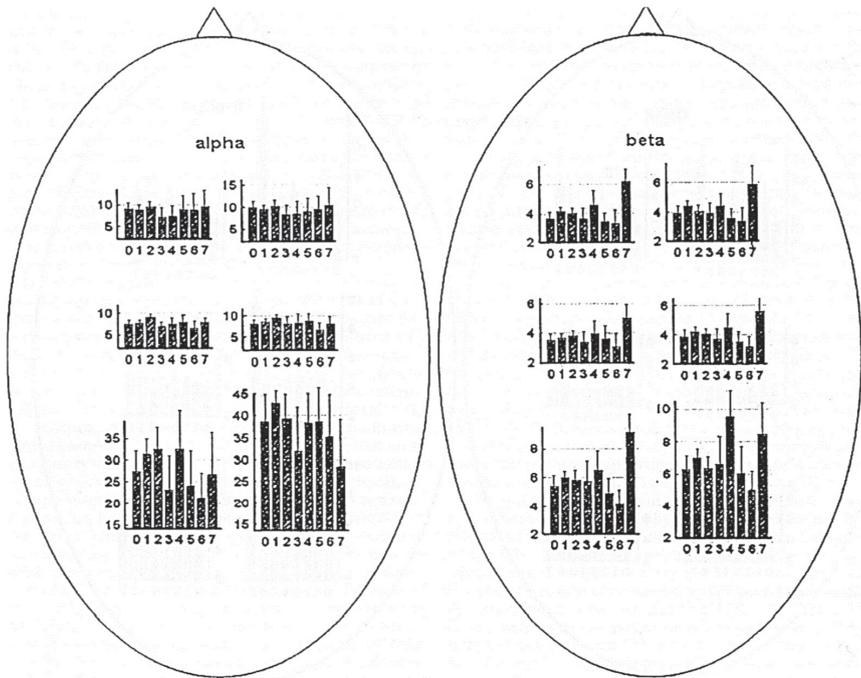


Рис. 54. Распределение усредненных по испытуемым спектров мощности альфа- и бетаритмов ЭЭГ в различных отведениях в зависимости от значения локального трехчасового геомагнитного индекса K . Обозначения см. рис. 53.

ГМП подвержено большой статистической ошибке вследствие малого количества наблюдений (для индексов, принимающих большое значение). Поэтому необходимо рассмотреть спектры мощности отдельно для каждого человека.

В связи с этим мы проанализировали индивидуальные реакции ЭЭГ на изменение ГМП всех испытуемых. Для выявления индивидуальных особенностей реакции испытуемых на ГМП разной степени выраженности проведен однофакторный дисперсионный анализ, в котором в качестве зависимых переменных выбиралось значение спектра мощности в традиционных частотных диапазонах ЭЭГ и в различных отведениях, в качестве независимой переменной выбиралось значение локального геомагнитного индекса K в момент регистрации ЭЭГ. При этом значение K разбивали на два уровня: низкий (K находится в пределах от 0 до 3) и высокий (K находится в пределах от 4 до 7). Результаты анализа пред-

Таблица 26

Индивидуальные реакции спектра мощности ЭЭГ на повышение напряженности ГМП

№ испытуемого	Диапазон частот ЭЭГ	Отведения ЭЭГ					
		F3	F4	C3	C4	P3	P4
1	Бета	4,9*	1,0	0,5	0,3	3,0	0,8
	Альфа	6,9*	0,0	0,1	0,0	1,8	0,2
	Тета	6,1*	2,0	1,2	0,0	0,1	0,0
2	Тета	2,1	0,9	1,5	3,5	1,5	7,6*
4	Дельта	6,5*	2,5	2,4	0,7	0,6	1,7
5	Тета	2,6	0,2	3,4	1,1	4,4*	0,4
6	Тета	2,6	2,0	0,1	5,9*	5,9*	2,9
7	Тета	0,2	1,0	6,6*	0,1	4,7*	0,0
8	Альфа	0,1	0,0	0,3	5,0*	0,0	0,9
9	Дельта	2,9	6,4*	3,1	2,4	1,0	0,3
10	Альфа	2,7	4,7*	4,3	3,7	5,1*	1,9

Примечание: В каждой ячейке таблицы указано значение F-критерия. Жирным шрифтом выделены значимые (* $p < 0,05$) различия между спектрами ЭЭГ при высоком и низком уровнях напряженности ГМП.

ставлены в табл. 26. Из нее видно, что испытуемых № 2 и 9 нет в таблице. Это объясняется тем, что время регистрации ЭЭГ у этих лиц не совпало с повышенным фоном ГМП.

Данные в табл. 26 показывают, что ответы ЭЭГ характеризуются высокой степенью индивидуальности как по частотным диапазонам, так и по отведениям. Наиболее статистически значимые ответы на повышение локального геомагнитного трехчасового индекса (К) обнаружены у испытуемых № 5, 6, 7.

Этим испытуемым свойственны наибольшие значения спектра мощности в частотных диапазонах тета- и альфа-ритмов по сравнению с остальными испытуемыми в периоды с небольшими значениями геомагнитного индекса К (при спокойном геомагнитном фоне). Как видно из табл. 26, статистически значимые различия в частотной полосе альфа-ритма наблюдаются у испытуемых № 1, 8 и 10. Испытуемые № 1 и 10 характеризуются самыми маленькими значениями спектра мощности в частотной полосе альфа-ритма, а с № 8 – принадлежит к группе испытуемых с высокоамплитудным альфа-ритмом. Оказалось, что у всех испытуемых с низкоамплитудным альфа-ритмом (испытуемые № 1, 2, 10)

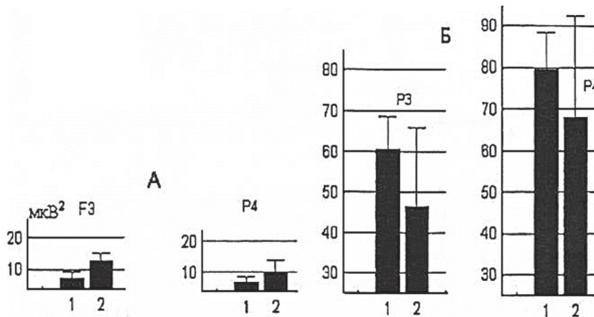


Рис. 55. Изменение мощности альфа-ритма у испытуемого с исходно низкоамплитудным (А) и высокоамплитудным (Б) альфа-ритмом на повышение геомагнитного индекса К. По оси абсцисс – уровень ГМП (1 – низкий, 2 – высокий), по оси ординат – мощность ритма, mkB^2 . На А и Б: F3, P4, P3 – отведения ЭЭГ. Тонкие вертикальные отрезки – стандартные ошибки для соответствующих средних значений.

происходило увеличение мощности при больших значениях индекса К, в то время как у испытуемых № 5, 7, 8 с исходно высокоамплитудным альфа-ритмом, наоборот, наблюдалось понижение мощности альфа-ритма (рис. 55).

Отметим некоторые отличия исходных спектров ЭЭГ у указанных лиц. Так, у испытуемых № 5, 6, 7 максимально выражен тета-ритм ЭЭГ, зарегистрированной в дни при невозмущенном ГМП среди всех обследованных лиц. Для каждого из них (см. табл. 26) достигается статистически значимое отличие мощности в частотном диапазоне тета-ритма в ответ на увеличение индекса К, при этом мощность тета-ритма при максимальном значении $K = 7$ максимальна. Это оказалось справедливым и для мощности бета-ритма.

Таким образом, повышение уровня напряженности геомагнитного поля влияет на ЭЭГ и характеризуется изменениями спектральной мощности во всех частотных диапазонах: для дельта-, тета- и бета-частот, наиболее выраженных в лобных областях, для альфа-диапазона в характерных для альфа-активности затылочных и теменных областях головного мозга. Эти изменения приводят к функциональной перестройке активности коры больших полушарий и подкорковых центров в соответствии с процессами саморегуляции функционального состояния мозга.

Целью этих перестроек является обеспечение работы центральных механизмов управления адекватной изменяющейся внешней средой,

как и в случае адаптивных реакций организма (Сороко С. И., Бекшаев С. С., Сидоров Ю. А., 1990). Эти перестройки носят индивидуальный характер и предполагают, в некотором смысле, обеспечение условий для «оптимального» возвращения системы к исходному состоянию.

Изучение спектров мощности с подробным шагом по частоте и их временной динамике показывает, что в каждом частотном диапазоне ритмов ЭЭГ существует довольно узкая частотная полоса, в которой у разных испытуемых наблюдаются одинаковые синхронные колебания (рис. 56).

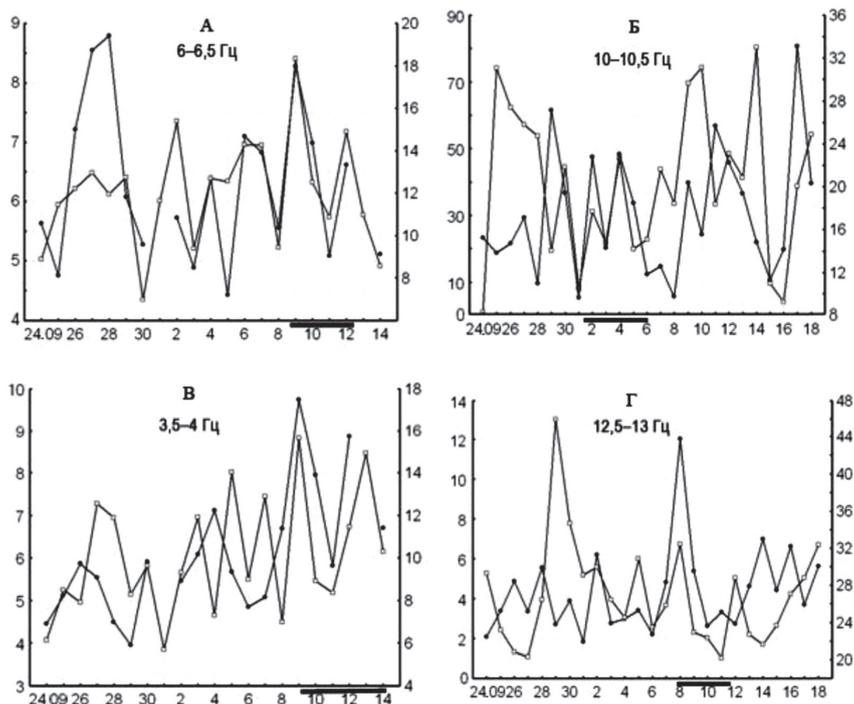


Рис. 56. Синхронные ответы спектра мощности ЭЭГ в отведении F3 разных людей (А, В – испытуемые № 6, 8); (Б, Г – испытуемые № 5, 7) в узких частотных диапазонах на резкое повышение локального трехчасового геомагнитного индекса К. По оси абсцисс – дни регистрации (начиная с 24.09 по 18.10.2012 г.), по оси ординат – мощность ритма, мкВ². На А, В: испытуемый № 6 – правая ось (график -.-), испытуемый № 8 – левая ось ординат (график -.-). На Б: испытуемый № 5 – левая ось (график ---), испытуемый № 7 – правая ось ординат (график -.-), на Г: испытуемый № 5 – левая ось (график -.-), испытуемый № 7 – правая ось ординат (график -.-). На оси абсцисс жирными отрезками помечены дни с синхронными ответами. Частотные диапазоны ЭЭГ указаны на рис. А–Г.

Запуском таких колебаний является момент резкого скачка локального геомагнитного индекса K от маленьких значений (0–2) до почти предельно больших (6, 7) (в наших исследованиях). При этом синхронные колебания сохраняются на протяжении 3–4 сут.

Для испытуемых № 6, 8 (рис. 55, *A, B*) такие синхронные колебания обнаруживаются в диапазоне тета- (6–6,5 Гц; см. рис. 56, *A*) и дельта-ритма (3,5–4 Гц; см. рис. 56, *B*). Исследования показали, что синхронная динамика перестроек спектров ЭЭГ и скачков ГМП начинается с момента резкого скачка геомагнитного индекса, произошедшего 8–9 октября. И хотя 1 октября у испытуемого № 8 в момент резкого скачка индекса K исследование не проводилось, начиная со 2 октября у него, также наблюдалась синхронизация ответов ЭЭГ с изменением магнитной возмущённости (см. рис. 56, *A*). На рис. 56, *B* представлен синхронный ответу испытуемых № 5 и 7 в диапазоне 10–10,5 Гц, продолжавшийся четыре дня с момента резкого скачка ГМП ($K = 7$), произошедшего 1 октября. У этих же испытуемых наблюдались синхронные ответы спектра мощности ЭЭГ в частотном диапазоне 12,5–13 Гц (см. рис. 56, *Г*) на скачок индекса K , который произошел 8 и 9 октября 2012 г.

По представленным результатам видно, что реакция ЭЭГ на внезапный скачок величины локального геомагнитного индекса до максимального значения следует практически немедленно и имеет длительное последствие. При этом внутри каждой из частотных полос основных (классических) ритмов ЭЭГ существует свой узкий частотный поддиапазон, наиболее чувствительный к скачкам геомагнитного поля. Однонаправленные синхронные колебания у разных испытуемых обнаружены нами именно в этих частотных поддиапазонах. В силу механизма, лежащего в основе поддержания динамической устойчивости частотного состава ЭЭГ (Сороко С. И., Бекшаев С. С., Сидоров Ю. А., 1990), основанного на перераспределении межкомпонентного взаимодействии волн ЭЭГ, существование внутри каждого ритма чувствительной частотной полосы позволяет возвращать частотный состав к исходному состоянию.

До сих пор предметом рассмотрения были интенсивные характеристики ЭЭГ-изменения значения спектров мощности тех или иных ритмов и их модуляций, возникающих вследствие воздействия на структуры мозга резких изменений напряженности геомагнитного поля. Эти характеристики отражают уровень биоэлектрической активности мозга и оставляют в стороне вопросы, касающиеся влияния изменений ГМП на межцентральные отношения. Ранее мы показали (Сороко С. И., Бек-

шаев С. С., Сидоров Ю. А., 1990), что индивидуальные особенности основных алгоритмов механизмов саморегуляции мозга человека находят свое отражение в структуре взаимодействия основных компонентов (волн) ЭЭГ и коррелируют с пластичностью и устойчивостью нейродинамических процессов.

На рис. 57 и 58 представлены вероятностные ориентированные графы, характеризующие структуру взаимодействий ЭЭГ компонентов и ее изменение при сильных возмущениях напряженности геомагнитного поля, произошедшего 1 октября 2012 г., когда в момент регистрации ЭЭГ локальный геомагнитный индекс К равнялся 7.

Как видно на рис. 57, у этого испытуемого с низкой пластичностью нейродинамических процессов происходит разрушение исходной структуры взаимодействия компонент ЭЭГ в лобных отделах мозга, которое характеризуется малым количеством межкомпонентных связей, и исчезновением в этих отведениях взаимодействий между низко- и высокочастотными компонентами (см. рис. 57, А, В; отведения F3, F4), что может свидетельствовать о дестабилизирующем влиянии резкого повышения локального геомагнитного индекса К на интегративные процессы мозга. Параллельные исследования состояния вегетативной и психической сферы показали, что у данного испытуемого во время магнитной бури резко ухудшилось общее самочувствие, возникли симптомы выраженного нервно-психического напряжения, признаки вегетососудистой дистонии. Состояние функционального дискомфорта сохранялось у испытуемого в течение 5 дн после затухания магнитной бури.

Вместе с тем даже у лиц с высокой чувствительностью к влиянию ЭМП полной дезинтеграции системной деятельности мозга не происходит. Как видно на рис. 57, В, в процессе воздействия повышенной напряженности ГМП у испытуемого происходит более выраженное, чем в фоне (см. рис. 57, А), усиление взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ с альфа-диапазоном частот в центральных и париетальных отведениях (С3, С4, Р3, Р4). Это свидетельствует о включении адаптивных механизмов, направленных на поддержание устойчивости механизмов саморегуляции мозга в момент интенсивного воздействия ГМП.

Сравнивая на рис. 57 позиции А и В, можно утверждать, что эти процессы обратимы, поскольку структура межкомпонентного взаимодействия возвращается к исходной через 5 дн, кроме структуры взаимодействий в лобных отделах мозга (см. рис. 57, В; отведения F3, F4), где преобладающим остается взаимодействие основных ритмов ЭЭГ с высокочастотными компонентами (бета1 – и бета2-диапазоны), отража-

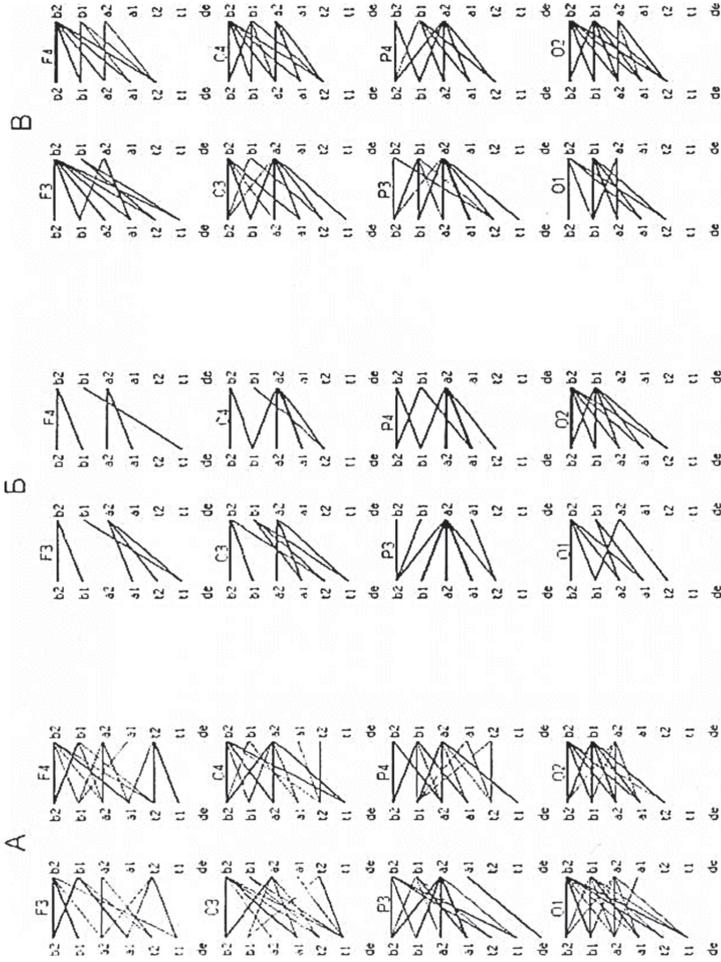


Рис. 57. Вероятностные графы взаимных переходов волн ЭЭГ различных диапазонов по отведениям ЭЭГ у испытуемого с низкой пластичностью нейродинамических процессов в период, предшествующий магнитной буре (А) ($K = 1$), во время бури (Б) ($K = 7$) и через пять дней после бури (В) ($K = 1$). На А, Б, В – линиями обозначены величины вероятностей переходов, превышающие порог 0,18, толщина линий пропорциональна величине вероятностей переходов. F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2 – отведения ЭЭГ.

Ритмы ЭЭГ обозначены как: b2 – бета2, b1 – бета1, a2 – альфа2, a1 – альфа1, t2 – тета2, t1 – тета1, de – дельта.

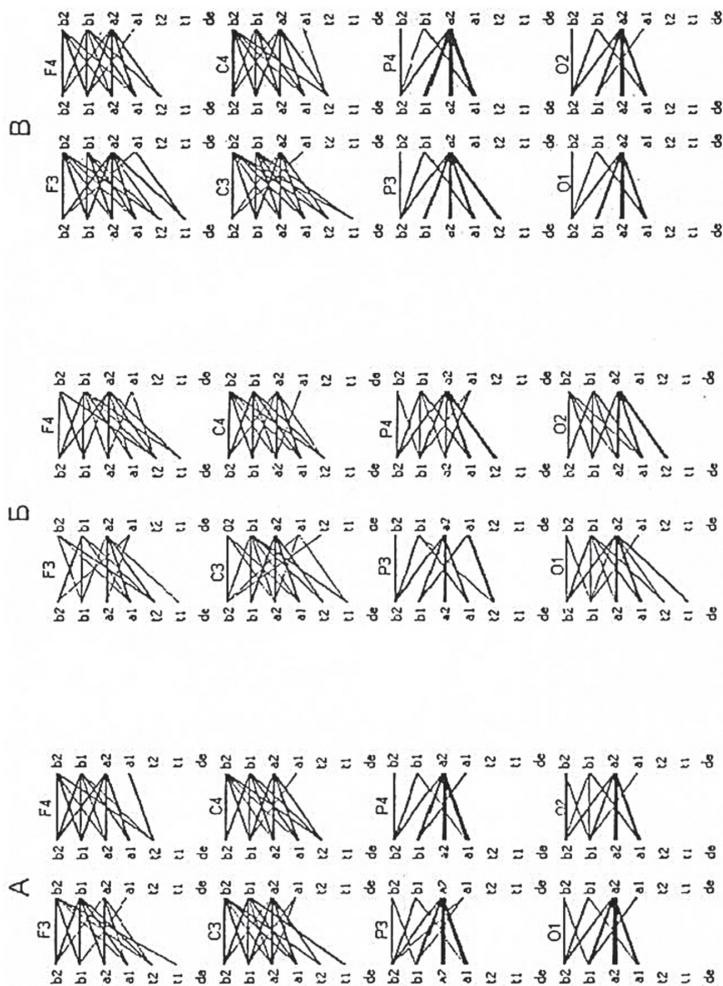


Рис. 58. Вероятностные графы взаимных переходов волн ЭЭГ различных диапазонов по отведениям ЭЭГ у испытуемого М-ва с высоким уровнем пластичности нейродинамических процессов перед магнитной бурей (А; К = 0), во время бури (Б; К = 7) и через пять дней после бури (В; К=0). Обозначения см. рис. 58.

ющее остаточное повышенное напряжение механизмов саморегуляции мозга.

Структура межкомпонентных взаимодействий у испытуемого с высоким уровнем пластичности нейродинамических процессов (рис. 58) во время магнитной бури существенно не менялась (см. рис. 58, А, Б) и полностью восстанавливалась после окончания магнитной бури (см. рис. 58, В). У этого испытуемого не наблюдалось разрушения паттерна межкомпонентных взаимодействий компонентов ЭЭГ в лобных отведениях (см. рис. 58, Б; отведения F3, F4). Из-за сильно выраженных взаимодействий основных частотных диапазонов с диапазоном альфа-ритма в фоне в момент повышения локального геомагнитного индекса происходит уменьшение этого взаимодействия с одновременным распространением его на более широкие частотные диапазоны (см. рис. 58, Б). Особенно выражен этот процесс в париетальных и затылочных отведениях (см. рис. 58, Б; отведения P3, P4, O1, O2). Отсутствие признаков нервно-психического напряжения, вегетососудистых расстройств и описанная выше динамика перестроек паттерна ЭЭГ свидетельствуют о высокой устойчивости центральных механизмов регуляции и низкой чувствительности испытуемого к воздействию возмущений ГМП.

Таким образом, резкие возмущения локального геомагнитного поля могут вызывать как повышение или понижение амплитуды основных ритмов ЭЭГ (амплитудная модуляция), так и перестройки частотного спектра (частотная модуляция). Изменениям подвержен весь диапазон частотного спектра ЭЭГ, однако самые выраженные изменения происходят в диапазоне альфа- и тета-ритмов.

У лиц с малой мощностью альфа-ритма магнитные бури вызывают увеличение его мощности, а у лиц с высокой мощностью альфа-ритма – снижение. Ослабление мощности спектра в диапазоне альфа-ритма сопровождается усилением мощности в диапазоне тета-ритма.

У испытуемых с высоким уровнем пластичности нейродинамических процессов временная структура паттерна и пространственная организация ЭЭГ в ответ на резкие возмущения ЭМП меняются незначительно и быстро возвращаются к исходному фону. У этих лиц не отмечены заметные нарушения функционального состояния и достоверные сдвиги психофизиологических параметров и показателей вегетативной регуляции. У лиц с низким уровнем пластичности нейродинамических процессов происходит дестабилизация паттерна ЭЭГ, наиболее выраженная в лобных зонах мозга, что сопровождается повышенным психоэмоциональным напряжением, астеновегетативными проявлениями, снижени-

ем физической и умственной работоспособности. Нарушения функционального состояния у этих лиц сохраняются до 5 дн после затухания магнитной бури.

5.3. Оценка комбинированного и изолированного влияния гелиогеофизических и метеорологических факторов на психосоматические и кардиогемодинамические параметры организма в периоды значительных возмущений геомагнитного поля

Проживание в высоких широтах, сопряженное с воздействием на организм суровых климатогеографических условий, приводит к возникновению у жителей Севера, так называемого «синдрома полярного напряжения» (Казначеев В. П., 1980). Этот синдром выражается в «полярной одышке», психоэмоциональной лабильности, астенизации, снижении работоспособности, депрессии (Казначеев В. П., 1980; Шеповальников В. Н., Сороко С. И., 1992; Natani K., Shurley J. T.). Однако до конца не ясен вклад отдельных компонентов сложного климатогеографического и геофизического комплекса в снижение адаптационного резерва у жителей высоких широт. Определенное влияние на психоэмоциональную и физиологическую лабильность могут оказывать метеорологические и гелиогеофизические факторы (Казначеев В. П., 1980; Шеповальников В. Н., Сороко С. И., 1992; Хаснулин В. И., Хаснулина А. В., 2013), колебания которых в высоких широтах достигают экстремальных значений (Пудовкин М. И., Распопов О. М., Клейменов Н. К., 1975). Можно полагать, что частые аperiodические и резкие колебания компонентов взаимообусловленного климатогеофизического комплекса создают предпосылки для десинхроноза, ведущего к истощению адаптационного резерва и сокращению продолжительности жизни северян (Хаснулин В. И., Хаснулина А. В., 2013; Кривошеков С. Г., 2012; Андропова Т. И., Деряпа Н. Р., Соломатин А. П., 1982).

Несмотря на то, что изучению зависимости организма человека от солнечной и геомагнитной активности посвящены многие работы (Владимирский Б. М. и совт., 1995; Cornelissen G. et al., 2010), полученные данные носят разрозненный и, отчасти, противоречивый характер. Это связано с тем, что в зависимости от фазы цикла солнечной активности, сезона года, широты, характер связи показателей функционального состояния организма с гелиогеофизическими факторами может суще-