

УДК 613.166:612.014.43

## АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА ЧЕЛОВЕКА ПРИ СИЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

С. И. Сороко<sup>1</sup>, С. С. Бекшаев<sup>1</sup>, Н. К. Белишева<sup>2</sup>, С. В. Пряничников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Межинститутская лаборатория сравнительных эколого-физиологических исследований Института эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН, г. Санкт-Петербург и Научно-исследовательского центра «Арктика» ДВО РАН, г. Магадан

E-mail: soroko@iephb.ru

<sup>2</sup>Кольский научный центр РАН, г. Апатиты

E-mail: natalybelisheva@mail.ru

В результате анализа ЭЭГ, зарегистрированной у 10 здоровых добровольцев на протяжении 25 дн, получены новые данные о реакции биоэлектрической активности мозга на изменения геомагнитной активности. Показано, что ответ спектра мощности ритмов ЭЭГ на резкое увеличение локального трехчасового геомагнитного индекса К происходит практически мгновенно (в пределах трехчасового интервала). Обнаружены узкие частотные диапазоны внутри каждого ритма ЭЭГ, наиболее чувствительные к резким скачкам индекса К. Изменения в этих диапазонах происходят синхронно у разных испытуемых. Кроме «амплитудной модуляции» основных ритмов, обнаружены перестройки структуры паттерна ЭЭГ, отражающие изменения межцентральных отношений. У лиц с высоким уровнем пластичности нейродинамических процессов изменения паттерна ЭЭГ не выходят за пределы диапазона устойчивой саморегуляции мозга, в то время как у лиц с низким уровнем пластичности возникают существенные нарушения временной и пространственной организации паттерна ЭЭГ, сохраняющиеся на протяжении 5–6 дн после магнитной бури.

**Ключевые слова:** ЭЭГ, геомагнитное поле, центральная нервная система, адаптация.

### ВВЕДЕНИЕ

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, 1974; Темурьянц и др., 1992). Имеется в виду

постоянно существующий на поверхности Земли фон электромагнитных колебаний на частотах ниже  $\sim 10^3$  Гц (низкие и сверхнизкие частоты). Он формируется 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 (ЭМП) 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  $1^d, 5-2^d, 0$ . 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 флюктуациях ГМП, даже 5-минутные акустические собственные солнечные колебания. Однако до сих пор считается, что эти флюктуации не имеют экологической значимости для живых организмов (Владимирский и др., 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), возможности возникновения резонанса – наиболее вероятный механизм наблюдаемых эффектов (Владимирский, 1982; Кисловский, 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, Сороко, 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, 1998; Холодов, 1982; Archer, 1978; Becker, 1963; Persinger, 1984; Presman, 1970; Shepard, Eisenbud, 1977; Villosesi et al., 1994; и др.), в том числе на высшую нервную деятельность (Белишева и др., 1995; Григорьев, 2008; Grigoryev et al., 2009) и электрическую активность головного мозга (Холодов, 1982; Холодов, Лебедева, 1975; Холодов, Шишло, 1979; Adey, Bawin, 1977; Bhashara, Srivastava, 1970). В экспериментальных исследованиях с использованием искусственных ЭМП показано, что под влиянием ЭМП выход  $Ca^{2+}$  из тканей мозга может увеличиваться (Акоев и др., 1985; Adey et al., 1982). При воздействии низкочастотных ЭМП или попадании частоты модуляции СВЧ в спектр собственной ритмической активности, например мозга, амплитуда отдельных ритмов ЭЭГ может увеличиться (Холодов, 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 радиозумов) в полярной шапке». Эти явления наступают, спустя несколько часов после начала вспышки на Солнце (Владимирский и др., 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 и др., 1998) или межполушарная асимметрия (Раевская, Рыжиков, 1984), либо представлены примеры отдельных наблюдений (Парфенов, 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 механиз-

мов 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 резких колебаниями уровней напряженности ГМП.

### МЕТОДИКА

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) в восьми отведениях: F3, F4, C3, C4, P1, P2, O1, O2 в соответствии со схемой 10–20 монополярно с объединенным референтным электродом на мочках ушей. 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 FFT из 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 и др., 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, бета1 – 17–12 Гц, альфа2 – 12–9 Гц, альфа1 – 9–7 Гц, тета2 – 7–5 Гц, тета1 – 5–3,5 Гц, дель-

та – 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 (ГМА) с официального сайта Sodankyla Geophysical Observatory (67°22' с. ш., 26°38' в. д.) (<http://www.sgo.fi>), полученные из компонент Z, H, D геомагнитного поля, и Ak 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 Ak 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».

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

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 (sfе-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 ( $\lambda$ ) оказался значим на уровне  $p < 0,002$  и равен 0,29. Известно (Крамер, 1975), что  $\lambda$  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  $\lambda$  является весомым основанием для более подробного и детального анализа полученных экспериментальных данных.

В табл. 1 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. 1 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. 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 (см. табл. 1) значимые отличия спектров выявляются только при практически невозмущенном ГМП ( $K = 0, 1, 2, 3$ ) и, начиная с  $K > 4$ , статистически не отличимы 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. 1, значения спектра при высокой напряженности ГМП ( $K = 7$ ) статисти-

чески значимо отличаются от таковых 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. 1 и 2, то мы увидим, что спектр мощности в частотной полосе альфа-ритма в отведении с максимальной его выраженностью (в данном случае правое теменное отведение P4) 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 P3) 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, Рыжиков, 1984). О. С. Раевская и Г. В. Рыжиков обнаружили изменения в соотношениях ритмов, доминирующих в каждой области коры головного мозга при изменении дисперсии суточной вариации индекса  $K$ .

Нарушение межполушарной асимметрии может привести 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 (см. рис. 2). Как видно на рис. 1 и 2, когда индекс  $K$  принимает значение 4, наблюдается регулярный скачок мощности по всем ритмам в соответствующих им доминирующих отведениях. Если индекс  $K$  следует усредненному планетарному индексу  $K_p$ , и, следовательно, индексу магнитных бурь  $G$ , то становится понятно, что указанные скачки мощно-

**Таблица 1. 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)**

**Table 1. Differences of averaged on sample group ( $n = 10$ ) spectral powers at different levels of  $K$  factor – «local 3-hour index of GMF» from the spectra value at  $K = 7$  (by results of the analysis of variance)**

Диапазон частот ЭЭГ	Отведения ЭЭГ											
	F3		C3		P3		F4		C4		P4	
	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  $K = 7$ .

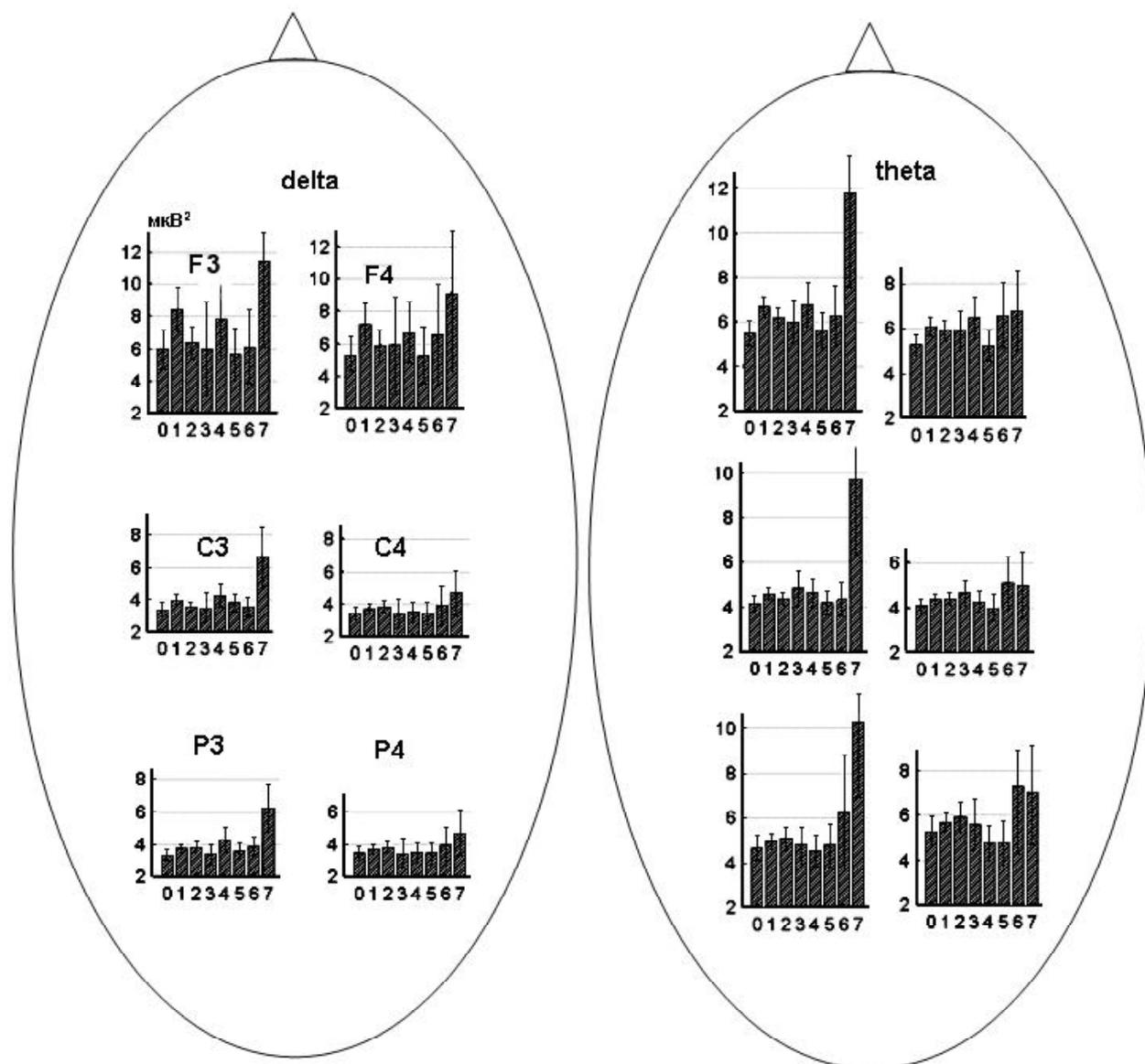


Рис. 1. Распределение усредненных по испытуемым спектров мощности дельта- и тета-ритмов ЭЭГ в различных отведениях в зависимости от значения локального трехчасового геомагнитного индекса К. Ось абсцисс – значение локального трехчасового геомагнитного индекса К в моменты регистрации ЭЭГ, ось ординат – средние значения ( $n = 10$ ) спектра мощности,  $\mu\text{В}^2$ , тонкие вертикальные отрезки – 95%-ные доверительные интервалы для соответствующих средних значений

Fig. 1. Distribution of spectral powers of delta and theta EEG rhythms in different derivations, averaged by subjects, depending on the value of a local 3-hour geomagnetic index K. Abscissa axis – value of the local 3-hour geomagnetic index K at the moments of EEG registration, ordinate axis – averaged values ( $n = 10$ ) of spectral power in  $\mu\text{V}^2$ , thin vertical lines – 95% confidential intervals for the corresponding mean values

сти 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. 1, на рис. 1 и 2, можно утверждать, что усреднение полученных изменений спектральных характеристик ЭЭГ по всей группе лиц для фиксированных индексов 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 про-

анализировали 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 К в момент регистрации ЭЭГ. При этом значение К разбивали на два уровня: низкий (К находится в пределах от 0 до 3) и

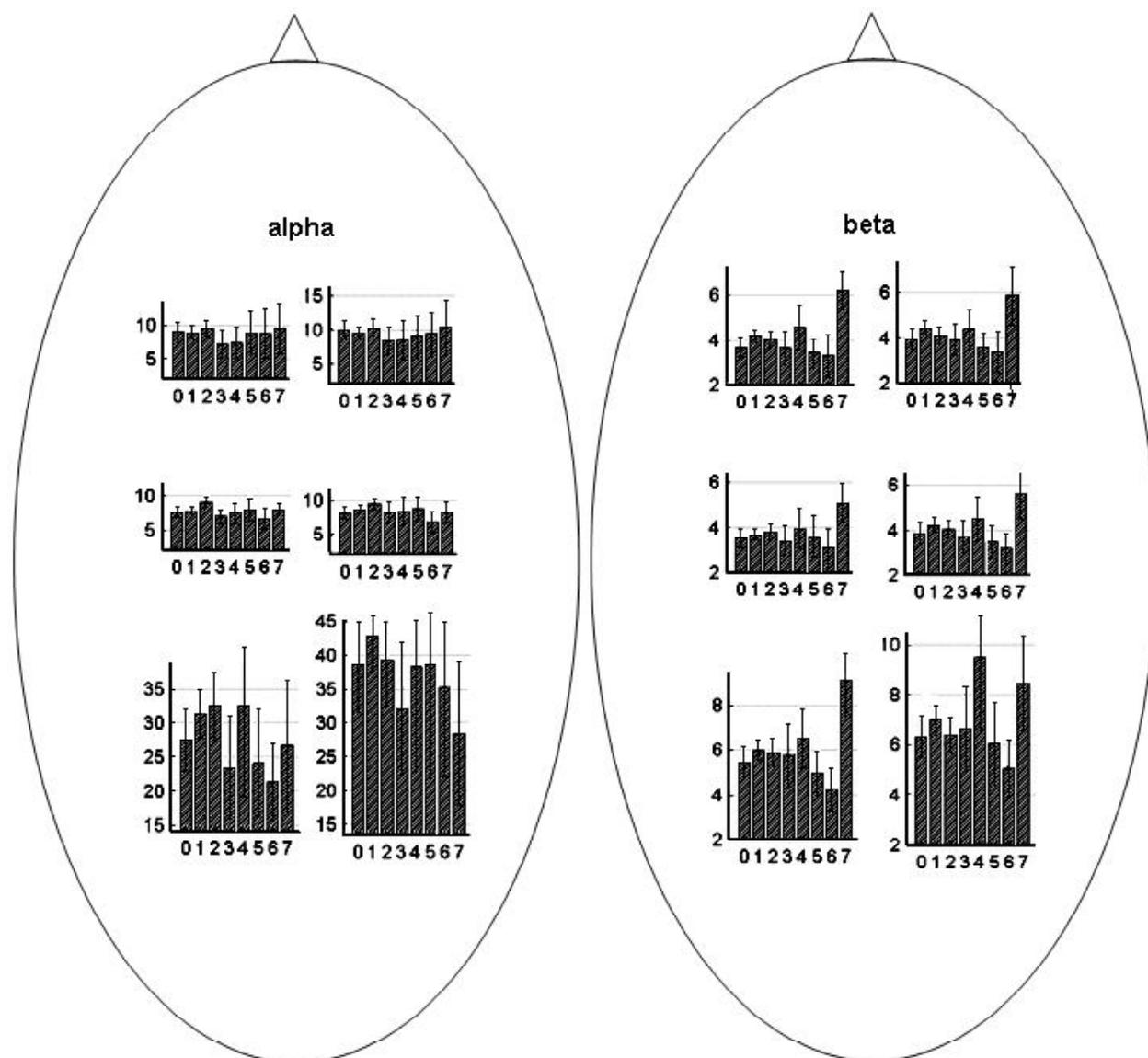


Рис. 2. Распределение усредненных по испытуемым спектров мощности альфа- и бета-ритмов ЭЭГ в различных отведениях в зависимости от значения локального трехчасового геомагнитного индекса К. Обозначения см. рис. 1

Fig. 2. Distribution of spectral powers of alpha and beta EEG rhythms, averaged through subjects, in different derivations depending on the value of a local 3-hour geomagnetic index K. For the legend, see Fig. 1

высокий (К находится в пределах от 4 до 7). Результаты анализа представлены в табл. 2. 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. 2 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. 2, 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) 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. 3).

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

Таблица 2. Индивидуальные реакции спектра мощности ЭЭГ на повышение напряженности ГМП

Table 2. Individual reactions of the EEG spectral power to the increase of GMF intensity

Номер испытуемого	Диапазон частот ЭЭГ	Отведения ЭЭГ					
		F3	F4	C3	C4	P3	P4
1	Бета	<b>4,9*</b>	1,0	0,5	0,3	3,0	0,8
	Альфа	<b>6,9*</b>	0,0	0,1	0,0	1,8	0,2
	Тета	<b>6,1*</b>	2,0	1,2	0,0	0,1	0,0
2	Тета	2,1	0,9	1,5	3,5	1,5	<b>7,6*</b>
4	Дельта	<b>6,5*</b>	2,5	2,4	0,7	0,6	1,7
5	Тета	2,6	0,2	3,4	1,1	<b>4,4*</b>	0,4
6	Тета	2,6	2,0	0,1	<b>5,9*</b>	<b>5,9*</b>	2,9
7	Тета	0,2	1,0	<b>6,6*</b>	0,1	<b>4,7*</b>	0,0
8	Альфа	0,1	0,0	0,3	<b>5,0*</b>	0,0	0,9
9	Дельта	2,9	<b>6,4*</b>	3,1	2,4	1,0	0,3
10	Альфа	2,7	<b>4,7*</b>	4,3	3,7	<b>5,1*</b>	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.

всех обследованных лиц. Для каждого из них (см. табл. 2) 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 моз-

га. Целью этих перестроек является обеспечение работы центральных механизмов управления адекватной изменяющейся внешней средой, как и в случае адаптивных реакций организма (Сороко и др., 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. 4).

Запуском таких колебаний является момент резкого скачка локального геомагнитного индекса К от маленьких значений (0–2) до почти предельно больших (6,7) (в наших исследованиях). При этом

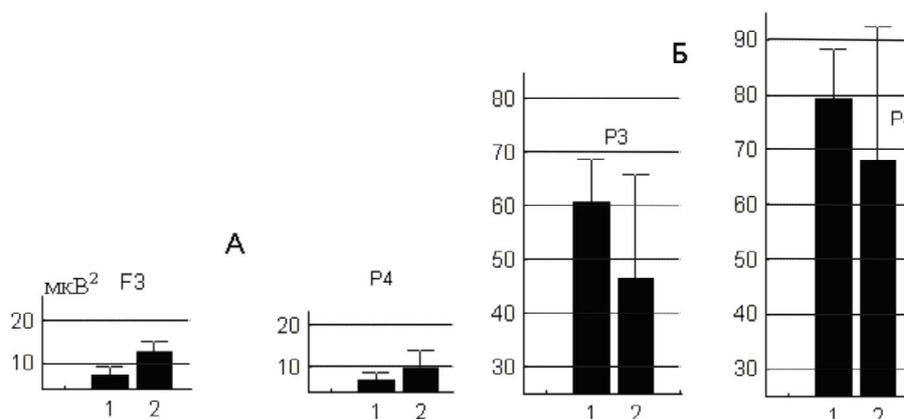


Рис. 3. Изменение мощности альфа-ритма у испытуемого с исходно низкоамплитудным (А) и высокоамплитудным (Б) альфа-ритмом на повышение геомагнитного индекса К. Ось абсцисс – уровень ГМП (1 – низкий, 2 – высокий), ось ординат – мощность ритма,  $\mu\text{В}^2$ . На А и Б: F3, P4, P3 – отведения ЭЭГ. Тонкие вертикальные отрезки – стандартные ошибки для соответствующих средних значений

Fig. 3. Changes of the alpha spectral power in the subject with initially low-amplitude (A) and high-amplitude (B) of alpha rhythm to the increase of the geomagnetic index K. Abscissa axis – the GMF level (1 – low, 2 – high), ordinate axis – spectral power in  $\mu\text{V}^2$ . On A and B pictures: F3, P4, P3 – EEG derivations. Thin vertical lines – standard mistakes for the corresponding averaged values

синхронные колебания сохраняются на протяжении 3–4 сут. На рис. 4 представлены примеры таких синхронизаций. Для испытуемых № 6, 8 (рис. 4,А, В) такие синхронные колебания обнаруживаются в диапазоне тета- (6–6,5 Гц; см. рис. 4,А) и дельта-ритма (3,5–4 Гц; см. рис. 4,В). 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 К исследование не про-

водилось, начиная со 2 октября, у него также наблюдалась синхронизация ответов ЭЭГ с изменением магнитной возмущенности (см. рис. 4,А). На рис. 4,Б представлен синхронный ответ у 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. 4,Г) на скачок индекса К, который произошел 8 и 9 октября 2012 г.

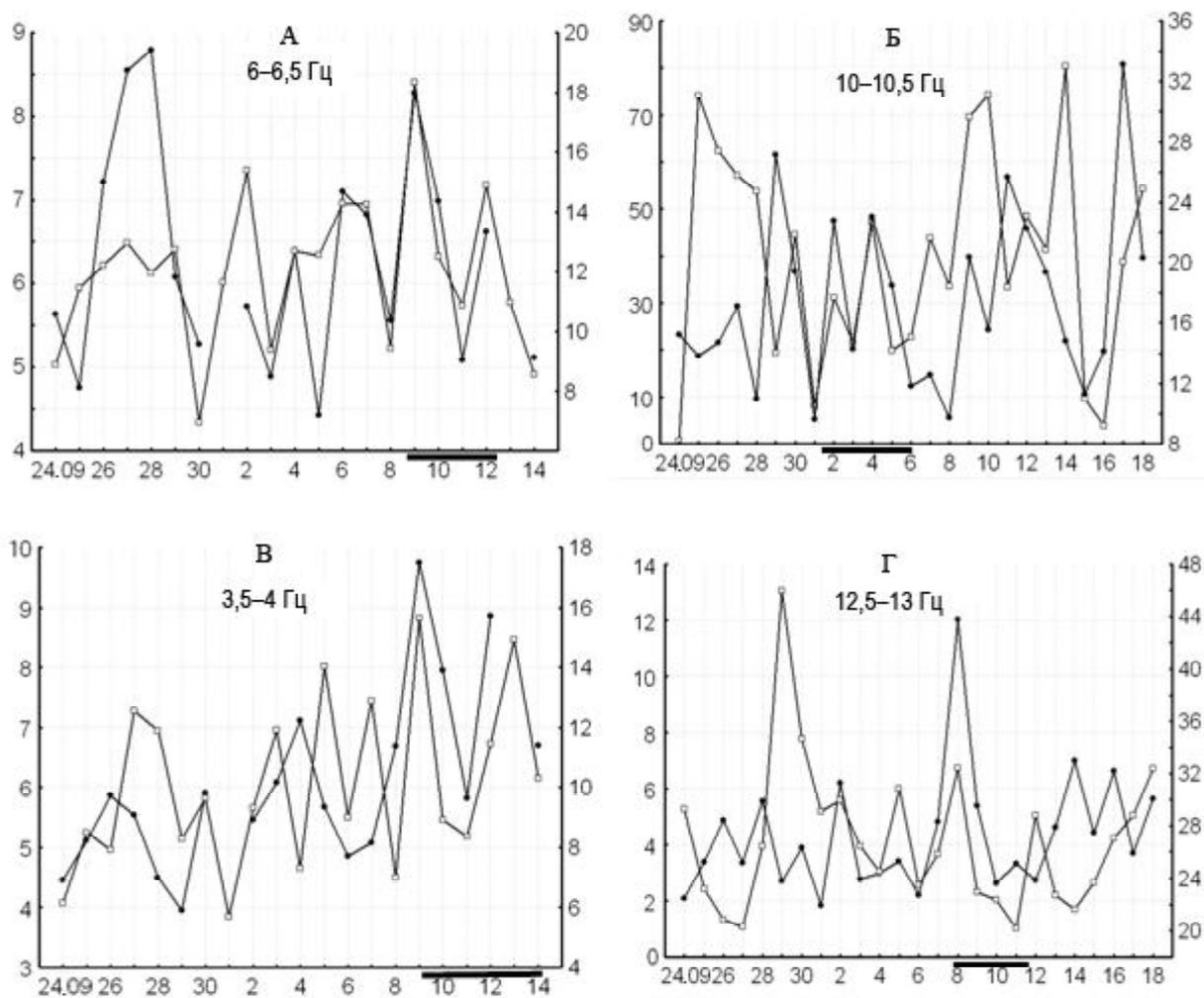


Рис. 4. Синхронные ответы спектра мощности ЭЭГ в отведении F3 разных людей (А, В – испытуемые № 6, 8), (Б, Г – испытуемые № 5, 7) в узких частотных диапазонах на резкое повышение локального трехчасового геомагнитного индекса К. Ось абсцисс – дни регистрации (начиная с 24.09 по 18.10.2012 г.), ось ординат – мощность ритма,  $\mu V^2$ . 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

Fig. 4. Synchronous responses of the EEG spectral power in F3 derivation of different people (A, B – subjects 6, 8), (B, – subjects 5, 7) in the narrow frequency bands to a sharp increase of the local 3-hour geomagnetic index K. Abscissa axis – days of registration (from 24.09 till 18.10.2012), ordinate axis – spectral power in  $\mu V^2$ . On A, B: subject 6 – the right ordinate axis (the graph - - -), subject 8 – the left ordinate axis (the graph - - -). On Б: subject 5 – the left ordinate axis (the graph - - -), subject 7 – the right ordinate axis (the graph - - -), on Г: subject 5 – the left ordinate axis (the schedule - - -), subject 7 – the right axis (the graph - - -). The thick lines on the abscissa axis mark days with synchronous responses. Frequency bands of EEG are specified on A – 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 и др., 1990), основанного на перераспределении межкомпонентного взаимодействия 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 и др., 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. 5 и 6 представлены вероятностные ориентированные графы, характеризующие структуру взаимодействий ЭЭГ компонентов и ее изменение

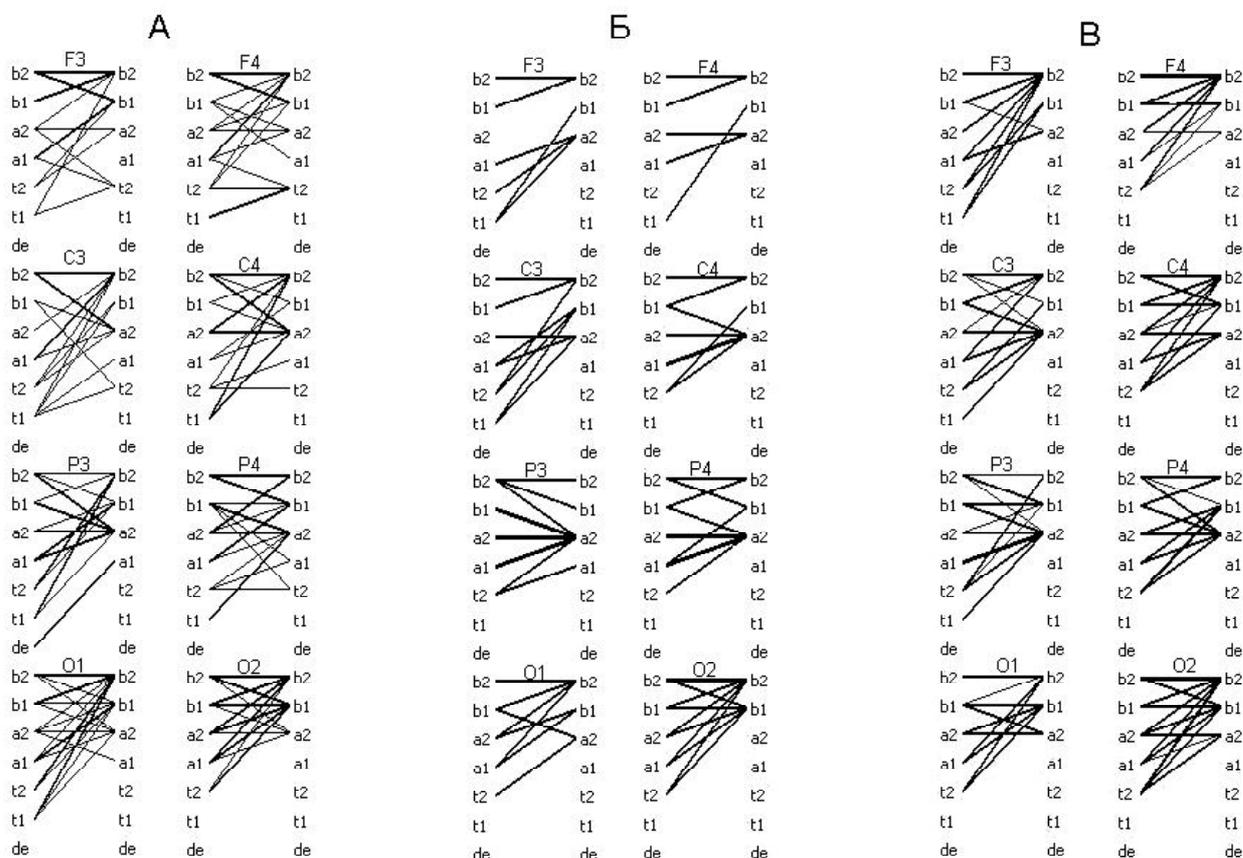


Рис. 5. Вероятностные графы взаимных переходов волн ЭЭГ различных диапазонов по отведениям ЭЭГ у испытуемого К-в с низкой пластичностью нейродинамических процессов в период, предшествующий магнитной буре (А) ( $K = 1$ ), во время бури (Б) ( $K = 7$ ) и через пять дней после бури (В) ( $K = 1$ ). На А, 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

Fig. 5. Probabilistic graphs of mutual transitions of EEG waves in different frequency bands and different derivations in subject K-v with low plasticity of neurodynamic processes. EEGs were registered before a magnetic storm (A) ( $K = 1$ ), during the storm (Б) ( $K = 7$ ), and five days after the storm (B) ( $K = 1$ ). On A, Б, В – lines show the sizes of transitions' probabilities with the threshold over 0.18, thickness of lines is proportional to the size of transition probabilities. F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2 – EEG derivations. EEG rhythms on the picture are designated as: b2 – beta2, b1 – beta1, a2 – alpha2, a1 – alpha1, t2 – theta2, t1 – theta1, de – delta

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. 5, у этого испытуемого с низкой пластичностью нейродинамических процессов происходит разрушение исходной структуры взаимодействия компонент ЭЭГ в лобных отделах мозга (см. рис. 5,Б; отведения F3, F4), которое характеризуется малым количеством межкомпонентных связей, и исчезновением в этих отведениях взаимодействий между низко- и высокочастотными компонентами (см. рис. 5,А, Б; 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, которые мы проводили у всех испытуемых (эти результаты будут представлены в другой статье), 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 К-ва 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. 5,Б, в процессе воздействия повышенной напряженности ГМП у испытуемого происходит более выраженное, чем в фоне (см. рис. 5,А), усиление взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ с альфа-диапазоном частот в центральных и парietальных 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. 5 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. 5,В; отведения F3, F4), где преобладающим остается взаимодействие основных ритмов ЭЭГ с высокочастотными компонентами (бета1- и бета2-диапазоны), отражающее остаточное повышенное напряжение механизмов саморегуляции мозга.

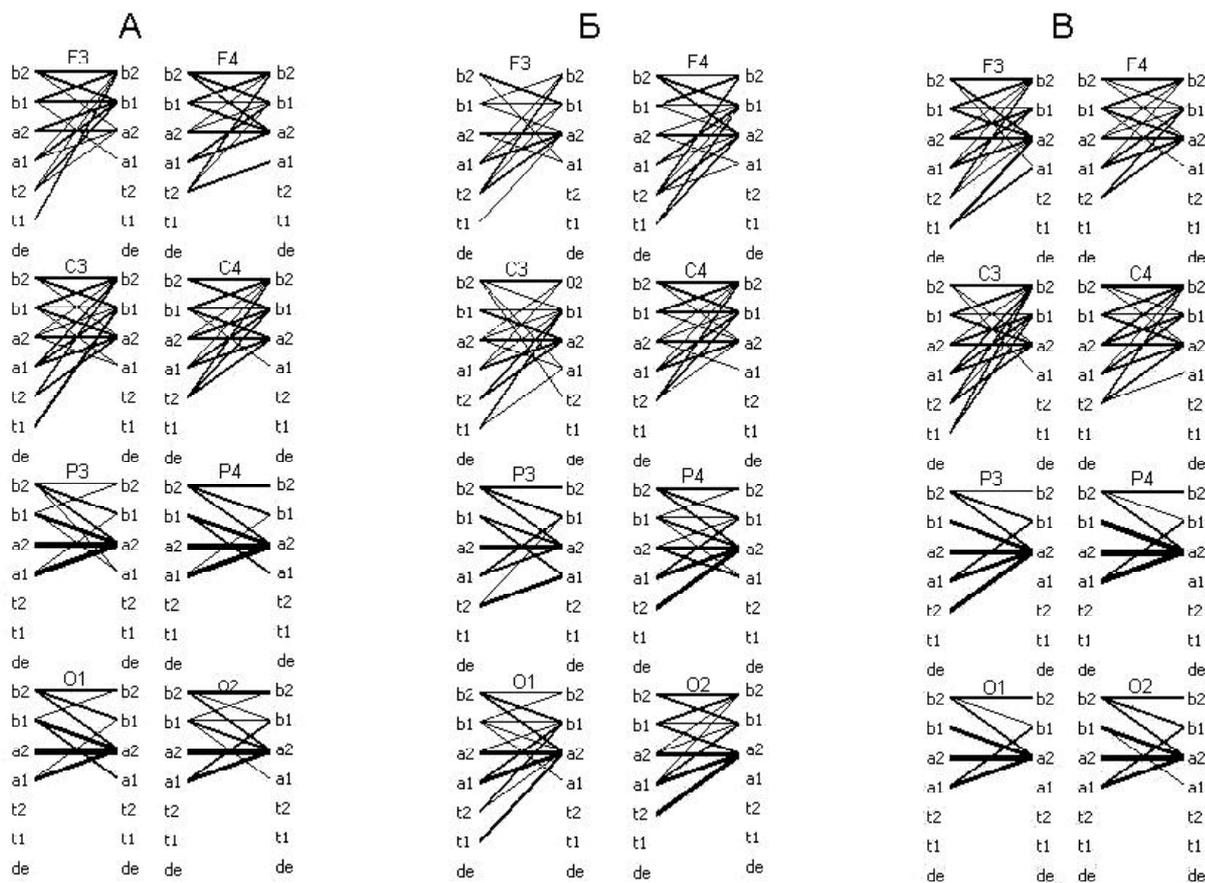


Рис. 6. Вероятностные графы взаимных переходов волн ЭЭГ различных диапазонов по отведениям ЭЭГ у испытуемого М-ва с высоким уровнем пластичности нейродинамических процессов перед магнитной бурей (А; К = 0), во время бури (Б; К = 7) и через пять дней после бури (В; К = 0). Обозначения см. рис. 5

Fig. 6. Probabilistic graphs of mutual transitions of EEG waves in different frequency bands and different derivations in subject K-v with high plasticity of neurodynamic processes. EEGs were registered before a magnetic storm (A; K = 0), during the storm (B; K = 7), and five days after the storm (B; K = 1). Other designations are same as at Fig. 5

В отличие от испытуемого К-ва структура межкомпонентных взаимодействий у испытуемого М-ва с высоким уровнем пластичности нейродинамических процессов (см. рис. 6) во время магнитной бури существенно не менялась (см. рис. 6,А, Б) и полностью восстанавливалась после окончания магнитной бури (см. рис. 6,В). У этого испытуемого, в отличие от испытуемого К-ва, не наблюдалось разрушения паттерна межкомпонентных взаимодействий компонентов ЭЭГ в лобных отведениях (см. рис. 6,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. 6,Б).

Особенно выражен этот процесс в париетальных и затылочных отведениях (см. рис. 6,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.

### ВЫВОДЫ

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

### ЛИТЕРАТУРА

Акоев И. Г., Каранова М. В., Кузнецов В. И., Коломыткин О. В. Действие СВЧ-поля на ГАМКэргические и ацетилхолинэргические системы синаптической передачи // Радиобиология. – 1985. – Т. 25. – Вып. 3. – С. 426–428.

Белишева Н. К., Попов А. Н., Петухова Н. В. и др. Качественная и количественная оценка воздействия вариаций геомагнитного поля на функциональное состояние мозга человека // Биофизика. – 1995. – Т. 40. – Вып. 5. – С. 1005–1012.

Белов Д. Р., Кануников И. Е., Киселев Б. В. Зависимость пространственной синхронизации ЭЭГ человека от геомагнитной активности в день опыта // Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. – 1998. – Т. 84, № 8. – С. 761–774.

Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое о биомагнетизме: в 2 т. /пер с англ., под ред. Дж. Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фаддена. – М.: Мир, 1989. – Т. 1. – 353 с.

Бреус Т. К. Космическая и земная погода и ее влияние на здоровье и самочувствие людей // Методы нелинейного анализа в кардиологии и онкологии: Физические подходы и клиническая практика. Вып. 2 / под ред. Р. Р. Назирова. – М.: КДУ, 2010. – С. 125–134.

Владимирский Б. М., Нарманский В. Я., Темуриянц Н. А. Космические ритмы в магнитосфере, атмосфере, среде обитания, био-, ноосферах, в земной коре. – Симферополь, 1994. – 176 с.

Владимирский Б. М. Солнечно-земные связи в биологии и явления захвата частоты // Проблемы космической биологии. – 1982. – Т. 43. – С. 166–173.

Григорьев П. Е. Вклад гелиогеофизических факторов в динамику психических состояний // Геофизические процессы и биосфера. – 2008. – Т. 7, № 3. – С. 63–69.

Дубров Ф. П. Геомагнитные поля и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 175 с.

Кисловский Л. Д. Реакции биологической системы на адекватные ей слабые низкочастотные электромагнитные поля // Проблемы космической биологии. – М.: Наука, 1982. – Т. 43. – С. 148–166.

Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

Мизун Ю. Г. Космос и здоровье. – М.: Вече, АСЕ, 1998. – 368 с.

Парфенов В. А., Доронин В. Н., Тлеулин С. Ж. и др. Ритмы биоэлектрической активности мозга и ее корреляции с вариациями геомагнитного поля // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 2. Циклическая динамика в природе и обществе. – М.: Науч. Мир, 1998. – 432 с.

Пресман А. С. Электромагнитные поля в биосфере. – М.: Знание, 1971. – 64 с.

Раевская О. С., Рыжиков Г. В. Динамика межполушарной асимметрии при изменении геомагнитного поля // Физиология человека. – 1984. – Т. 10, № 3. – С. 471–473.

Сороко С. И., Бекшаев С. С., Сидоров Ю. А. Основные типы механизмов саморегуляции мозга. – Л.: Наука, 1990. – 152 с.

Темуриянц Н. А., Владимирский Б. М., Тишкин О. Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. – Киев: Наук. думка, 1992. – 187 с.

- Холодов Ю. А.* Мозг в электромагнитных полях. – М. : Наука, 1982. – 123 с.
- Холодов Ю. А., Лебедева Н. Н.* Реакции нервной системы человека на электромагнитные поля. – М. : Наука, 1975. – 208 с.
- Холодов Ю. А., Шишло М. А.* Электромагнитные поля в нейрофизиологии. – М. : Наука, 1979. – 168 с.
- Шеповальников В. Н., Сороко С. И.* Метеочувствительность человека. – Бишкек : Илим, 1992. – 248 с.
- Adey W. R., Bawin S. M.* Brain interactions with weak electric and magnetic fields // *Neurosci. Res. Program Bull.* – 1977. – Vol. 15, No. 1. – P. 255–270.
- Adey W. R., Bawin S. B., Lawrence A. F.* Effects of weak amplitude-modulated microwave fields on calcium efflux from awake cat cerebral cortex // *J. Bioelectromagnetics.* – 1982. – Vol. 3. – P. 295–307.
- Archer V. E.* Geomagnetism, cancer, weather and cosmic radiation // *Health Phys.* – 1978. – Vol. 34, No. 3. – P. 237–247.
- Becker R. O.* Relationship of geomagnetic environment to human biology // *J. Med.* – 1963. – Vol. 63, No. 15. – P. 2215–2219.
- Bhashara D. S., Srivastava B. I.* Influence of solar and geomagnetic disturbances on road traffic accidents // *Bull. Nat. Geophys. Res. Inst. (India).* – 1970. – Vol. 8, No. 1–2. – P. 32–47.
- Grigoryev P., Valserman A., Rozanov V., Vladimirskiy B.* Heliogeophysical factors as possible triggers of suicide terroristic acts // *Health.* – 2009. – Vol. 1, No. 2. – P. 63–92.
- Persinger M. A.* ELF and VLF electromagnetic field effects. – N. Y. : Plenum Press, 1974. – 316 p.
- Presman A. S.* Electromagnetic fields and life. – N. Y. ; London : Plenum-Press, 1984. – 302 p.
- Shepard A. R., Eisenbud M.* Biological effects of electric and magnetic fields of extremely low frequency. – N. Y. : Univ. press, 1977. – 213 p.
- Villoresi G., Kopitenko Y. A., Ptitsyna N. G.* The influence of geomagnetic storms and man-made magnetic field disturbances on the incidence of myocardial infarction in St. Petersburg // *Physica Medica.* – 1994. – Vol. 10. – P. 107–117.

*Поступила в редакцию 04.09.2013 г.*

## **AMPLITUDE-FREQUENCY AND SPATIO-TEMPORAL REORGANIZATIONS OF PERSONS' BRAIN BIOELECTRIC ACTIVITY AT STRONG INDIGNATIONS OF GEOMAGNETIC FIELD**

*S. I. Soroko, S. S. Bekshaev, N. K. Belisheva, S. V. Prjanichnikov*

As a result of the EEG analysis (EEGs had been registered in 10 healthy volunteers for 25 days), new data of brain bioelectric activity reactions to geomagnetic activity changes were obtained. It was shown that the EEG bands spectral power response to a sharp increase of 3-hour geomagnetic index K occurs almost instantly (within a three-hour interval). Revealed were narrow frequency bands in each EEG rhythm, the most sensitive to sharp jumps of the index K. It was also shown that the changes in these narrow frequency bands are synchronized among different subjects. Except for the «amplitude modulation» of main (basic) rhythms, reorganizations of EEG pattern structure were revealed to reflect changes of the inter-central relations. In persons with a high level of neurodynamic processes plasticity, changes of EEG pattern do not exceed the limit of the range of the brain steady self-control, while persons with a low level of plasticity have essential violations of the temporary and spatial organization of EEG patterns remaining for 5–6 days after a magnetic storm.

**Key words:** EEG, geomagnetic field, central nervous system, adaptation.