

УДК 612.821.6

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СИНХРОННОСТИ И АМПЛИТУДНЫХ СООТНОШЕНИЙ ЭЭГ В НОЧНОМ СНЕ

© 2012 г. А. П. Кулаичев

*Кафедра высшей нервной деятельности*

*Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,*

*e-mail: akula-@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.01.2011 г.

Принята в печать 10.10.2011 г.

В работе использован новый методический подход к оценке синхронности ЭЭГ, основанный на корреляциях между процессами амплитудной модуляции ЭЭГ (огигающими). Выявлены: левополушарное доминирование во всех стадиях сна, доминирование лобных областей над затылочными, различия в соотношениях синхронности по стадиям сна в разных частотных диапазонах, различия в закономерностях изменения синхронности в межполушарных связях от лба к затылку, топографические особенности локализации высокосинхронных связей по стадиям сна и частотным диапазонам. При анализе амплитудной топографии также выявлены левополушарное доминирование и многочисленные значимые различия в соотношениях и закономерностях изменения ЭЭГ-активности по парасагитальным цепочкам электродов (меридианам) как в отношении стадий сна, так и в отношении частотных диапазонов. Сочетание оценок корреляционной синхронности ЭЭГ с амплитудными спектральными оценками позволило осуществить надежное дискриминантное распознавание пяти стадий сна с числом ошибок в диапазоне 3–20%.

*Ключевые слова: стадии сна, синхронность ЭЭГ, огигающая, топографический паттерн, профиль синхронности, частотные диапазоны, амплитудный спектр, полушарное доминирование, соотношения лоб–затылок, дискриминантный анализ, классификация.*

## Comparative Analysis of EEG Correlation Synchronism and EEG Amplitude Relationships in All-Night Sleep

A. P. Kulaichev

*Department of Higher Nervous Activity, Moscow State University,*

*e-mail: akula-@mail.ru*

We used a new methodological approach to the evaluation of EEG synchronization based on correlation between amplitude modulation processes (EEG envelopes). We revealed: left-hemispheric dominance and dominance of frontal over occipital regions characteristic of all sleep stages; differences in synchronization in frequency bands and their patterns characteristic of a specific sleep stage; stage-dependent differences in inter-hemispheric synchrony and patterns of their changes from the frontal to occipital regions; and stage-dependent topographical distributions of high synchronization foci with respect to frequency domains. Analysis of amplitude topography also revealed left-hemispheric dominance and many significant differences in activity distribution patterns over parasagittal chains of electrodes (meridians) depending on sleep stages and frequency domains. The combination of EEG synchrony estimates with the amplitude spectral estimates made it possible to perform a reliable discriminant recognition of five sleep stages with errors in the range of 3–20%.

*Keywords: sleep stages, EEG synchronism, envelope, topographical pattern, profile of synchronism, frequency domain, amplitude spectrum, hemispheric dominance, frontal-occipital relations, discriminant analysis, classification.*

В обширной литературе, посвященной исследованию сна, имеется сравнительно мало работ, связанных с оценкой синхронности ЭЭГ. В основном обращает на себя внимание разнородность и отсутствие системности в исследованиях и их отношении к частным, различным, подчас несопоставимым аспектам: с упоминанием лишь избранных стадий сна, частотных диапазонов и поддиапазонов, избранных областей мозга и отведений [4, 6, 7, 9–11, 13–17, 27, 30]. Наиболее общим выводом является увеличение и близость синхронности ЭЭГ в трех стадиях сна с возрастанием медленноволновой активности в отличие от расслабленного бодрствования [7, 9, 10, 16, 20, 23]. Наибольшая неопределенность и противоречивость относится к межполушарной асимметрии в оценках синхронности и мощности ЭЭГ: отмечается как правополушарное доминирование [12, 16, 21], так и левополушарное [15, 21, 24], а также различное доминирование в разных стадиях сна и областях скальпа [1, 7, 26, 27] или же отсутствие асимметрии [11, 18]. Сходная неопределенность касается и возрастания или уменьшения межполушарных когерентных связей (см. обзор [23]).

Поэтому представляется актуальным комплексное исследование данного вопроса с использованием нового подхода, изложенного в работе [3]. В настоящем исследовании, в дополнение к работе [3], мы далее продолжаем прикладное развитие методологии комплексной системной аналитики, подробно изложенной и иллюстрированной в монографии [2].

## 1. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Основой нашего подхода является анализ корреляционной синхронности ЭЭГ (АКС), который подробно изложен в работе [3] и в которой показаны его высокая эффективность и плодотворность применительно к дифференциации нормы и шизофрении. Поэтому в настоящей статье напомним лишь основные положения метода АКС. Предварительные операции этого метода включают: 1) фильтрацию методом быстрого Фурье-преобразования в выбранном частотном диапазоне; 2) вычисление огибающей отфильтрованных ЭЭГ-записей; 3) вычисление коэффициентов корреляции Пирсона между огибающими ЭЭГ близле-

жащих пар отведений\*. Упорядоченная по парам отведений последовательность коэффициентов корреляции между огибающими ЭЭГ для близлежащих пар отведений названа *профилем синхронности*, и именно эти профили являются исходным материалом для последующих этапов и направлений анализа. В частности, корреляции между такими профилями служат оценками топографической согласованности ЭЭГ-синхронизма.

*Исходные данные.* В качестве исходного материала использованы фрагменты записей сна 15 праворуких мужчин (от 18 до 34 лет), выполненные по системе 10–20% для 16 нецентральных отведений с частотой регистрации 200 Гц, фильтрацией в полосе 0.5–40 Гц (усилитель BioTop 6R12, NEC, Япония, референт  $A_2$ , эти записи ранее уже обсуждались в работе [5])\*\*. Для каждого испытуемого и каждой стадии сна – REM (фаза быстрых движений глаз, rapid eyes movements), 1, 2, 3/4 и стадии расслабленного бодрствования с закрытыми глазами (стадия W, регистрировалась до и сразу после сна) – имеется по пять 20-секундных фрагментов записей ЭЭГ, оцениваемых визуально по критериям Рехтшафена–Кале и случайно выбранных из разных циклов сна, т. е. для каждой стадии сна исходный объем анализируемой выборки составляет 75 таких записей. Для этих стадий и четырех стандартных частотных диапазонов (дельта, тета, альфа, бета1) были вычислены  $5 \times 4 = 20$  матриц профилей синхронности огибающих ЭЭГ (столбцы – 43 пары близлежащих отведений; строки – профили синхронности для 75 записей). Эти матрицы являются исходным материалом для последующего анализа.

*Статистические оценки.* В связи с часто имеющим место небольшим объемом сравниваемых выборок и отличиям их распределений от нормального парные различия выявляются с использованием одно- или двухвыборочного критерия Вилкоксона (уровни значимости ниже обозначены  $p_w$ ), а оценка факторных эффектов осуществляется с использованием методов однофакторного непараметрического дисперсионного анализа

\* Как выяснилось в ходе последующего литературного поиска, предложение подобных вычислений применительно ко сну было озвучено в докладе [8], а в работах [13, 22] использовались оценки корреляций между нативными ЭЭГ.

\*\* Автор выражает глубокую признательность сотруднику ИВНД и НФ РАН – Р.А. Марагю за предоставленные для анализа полисомнограммы ночного сна.

[2, с. 181–182]: Крускала–Уоллиса (уровни значимости обозначены  $p_{k-w}$ ) или Джонкхиера (при возрастании/уменьшении факторных эффектов, уровни значимости обозначены  $p_{jo}$ ).

## 2. АНАЛИЗ СОГЛАСОВАННОСТИ ДАННЫХ

*Методика.* Предварительно исходные данные были подвергнуты анализу на согласованность. Эта методика [3] включает вычисление квадратной корреляционной матрицы профилей синхронности огибающих ЭЭГ всех записей со всеми. По такой матрице вычисляется среднее значение коррелированности профиля каждого испытуемого с профилями всех других испытуемых и строится вариационный ряд, по которому выделяются выбросы, а также высокосогласованная и наиболее представительная группа записей.

*Обсуждение результатов.* В таких вариационных рядах (по стадиям сна и частотным диапазонам) вне высокосогласованных подгрупп оказалось большинство записей трех испытуемых. Их визуальный анализ показал отсутствие ЭЭГ-сигнала по одному из отведений у двух испытуемых. Записи третьего испытуемого отличались аномально низкой синхронностью в лобных и височных парах отведений и в правой затылочной области. Тем самым анализ на согласованность еще раз показал свою эффективность для удаления выбросов и артефактов из анализируемых данных. Записи трех выявленных испытуемых в дальнейшем анализе не использовались, т. е. объем анализируемой выборки по каждой стадии сна был сокращен до 60 записей.

Средняя коррелированность профилей синхронности огибающих ЭЭГ дифференцированно по частотным диапазонам с учетом стандартных отклонений составляет: дельта =  $0.304 \pm 0.052$ , тета =  $0.558 \pm 0.034$ , альфа =  $0.568 \pm 0.052$ , бета1 =  $0.537 \pm 0.045$ . Обращает на себя внимание: 1) сравнительно небольшие стандартные отклонения, свидетельствующие о достаточно узких доверительных интервалах средних оценок; 2) близкие уровни коррелированности в диапазонах тета, альфа и бета1 с отсутствием парных различий на уровне значимости  $p_w = 0.14–0.38$ ; 3) пониженный уровень коррелированности в диапазоне дельта с различиями относительно других диапазонов на уровне значимости  $p_w < 0.006$ .

Тем самым индивидуальная вариативность топографии ЭЭГ-синхронизма в диапазоне дельта достаточно велика по сравнению с другими диапазонами.

Что касается средних коррелированностей по стадиям сна, то они близки по своим значениям и составляют: REM = 0.48, 1 = 0.46, 2 = 0.47, 3/4 = 0.51, W = 0.54 с отсутствием попарных различий на уровне значимости  $p_w = 0.07–0.34$ . Тем самым индивидуальная вариативность топографии ЭЭГ-синхронизма во всех стадиях сна находится приблизительно на одинаковом уровне.

## 3. ТОПОГРАФИЯ ЭЭГ-СИНХРОНИЗМА

Обратимся к анализу топографии высокосинхронных связей, вычисленных методом АКС (раздел 1). Для этого оценим среднюю синхронность огибающих ЭЭГ по каждой паре отведений (столбцы в матрицах синхронности) дифференцированно по частотным диапазонам и стадиям сна.

*Соотношения по областям скальпа.* В верхней части табл. 1 приведены средние значения и стандартные отклонения таких средних оценок дифференцированно по областям головного мозга и частотным диапазонам для всех стадий сна. Прежде всего обращает на себя внимание следующее:

- левополушарное доминирование по всем частотным диапазонам (табл. 1, строки 2, 4, объем выборок 13 пар отведений) с различиями в диапазонах дельта и бета (табл. 1, строка 4); двухфакторный дисперсионный анализ (факторы: частотный диапазон и полушарие) выявляет влияние фактора полушария на уровне значимости  $p < 10^{-8}$ ; при этом левостороннее доминирование наблюдается не только в целом, но и в каждой стадии сна;

- более высокий синхронизм в лобно-центральной области по сравнению с теменно-затылочной областью (табл. 1, строки 5, 6, объем выборок 11 пар отведений) со статистически значимыми различиями в диапазонах тета и альфа (табл. 1, строка 7); двухфакторный дисперсионный анализ выявляет влияние фактора лобного доминирования на уровне значимости  $p < 10^{-9}$ ;

- средние синхронности в каждой группе отведений по частотным диапазонам близки по величине с отсутствием различий:  $p_w = 0.13–0.49$ .

*Соотношения по стадиям сна.* В нижней части табл. 1 приведены аналогичные оценки

**Таблица 1.** Усредненные по отведениям оценки корреляционной синхронности ( $\pm$  стандартное отклонение)  
**Table 1.** Estimations of correlation synchronism averaged over EEG electrodes ( $\pm$  standard deviation)

| №  | Отведения       | Дельта            | Тета              | Альфа             | Бета1             |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1  | Все             | 0.658 $\pm$ 0.084 | 0.648 $\pm$ 0.101 | 0.656 $\pm$ 0.108 | 0.644 $\pm$ 0.091 |
| 2  | Левополушарные  | 0.690 $\pm$ 0.074 | 0.691 $\pm$ 0.086 | 0.705 $\pm$ 0.089 | 0.712 $\pm$ 0.069 |
| 3  | Правополушарные | 0.636 $\pm$ 0.094 | 0.647 $\pm$ 0.110 | 0.659 $\pm$ 0.112 | 0.639 $\pm$ 0.085 |
| 4  | Различия        | $p = 0.05$        | $p = 0.09$        | $p = 0.1$         | $p = 0.006$       |
| 5  | Лоб             | 0.666 $\pm$ 0.084 | 0.684 $\pm$ 0.096 | 0.701 $\pm$ 0.103 | 0.657 $\pm$ 0.095 |
| 6  | Темя–затылок    | 0.642 $\pm$ 0.087 | 0.607 $\pm$ 0.099 | 0.607 $\pm$ 0.101 | 0.632 $\pm$ 0.093 |
| 7  | Различия        | $p = 0.16$        | $p = 0.01$        | $p = 0.004$       | $p = 0.16$        |
| 8  | Стадии сна      | Дельта            | Тета              | Альфа             | Бета1             |
| 9  | REM             | 0.649 $\pm$ 0.093 | 0.642 $\pm$ 0.102 | 0.627 $\pm$ 0.121 | 0.652 $\pm$ 0.096 |
| 10 | 1               | 0.643 $\pm$ 0.084 | 0.649 $\pm$ 0.099 | 0.649 $\pm$ 0.108 | 0.648 $\pm$ 0.092 |
| 11 | 2               | 0.691 $\pm$ 0.087 | 0.656 $\pm$ 0.099 | 0.675 $\pm$ 0.092 | 0.659 $\pm$ 0.088 |
| 12 | 3/4             | 0.688 $\pm$ 0.091 | 0.628 $\pm$ 0.110 | 0.687 $\pm$ 0.093 | 0.652 $\pm$ 0.091 |
| 13 | W               | 0.617 $\pm$ 0.119 | 0.664 $\pm$ 0.108 | 0.639 $\pm$ 0.162 | 0.611 $\pm$ 0.116 |

*Примечание.* REM – стадия быстрых движений глаз; 1, 2, 3/4 – стадии в порядке углубления сна; W – стадия пассивного бодрствования.

дифференцированно по стадиям сна (объем выборки 43 пары отведений). Здесь можно отметить следующее:

- снижение синхронности огибающих ЭЭГ в диапазоне альфа REM-стадии относительно других диапазонов и стадий ( $p_w < 0.019$ );

- практически одинаковая синхронность в стадии 1 по всем диапазонам;

- повышение синхронности в диапазонах дельта и альфа в стадиях 2 и 3/4 относительно других стадий и диапазонов без статистически значимых различий;

- снижение синхронности в диапазоне тета для стадии 3/4 относительно других стадий и диапазонов ( $p_w < 0.05$ );

- снижение синхронности в диапазонах дельта и бета в стадии W относительно других стадий и диапазонов ( $p_w < 0.019$ ) с более высокой синхронностью в диапазоне тета для этой стадии ( $p_w < 0.05$ ).

Тем самым распространенный в публикациях общий вывод об увеличении и близости ЭЭГ-синхронизма в трех стадиях сна по сравнению с расслабленным бодрствованием подтверждается лишь частично, за исключением диапазона тета и стадии 1 для диапазонов дельта и альфа.

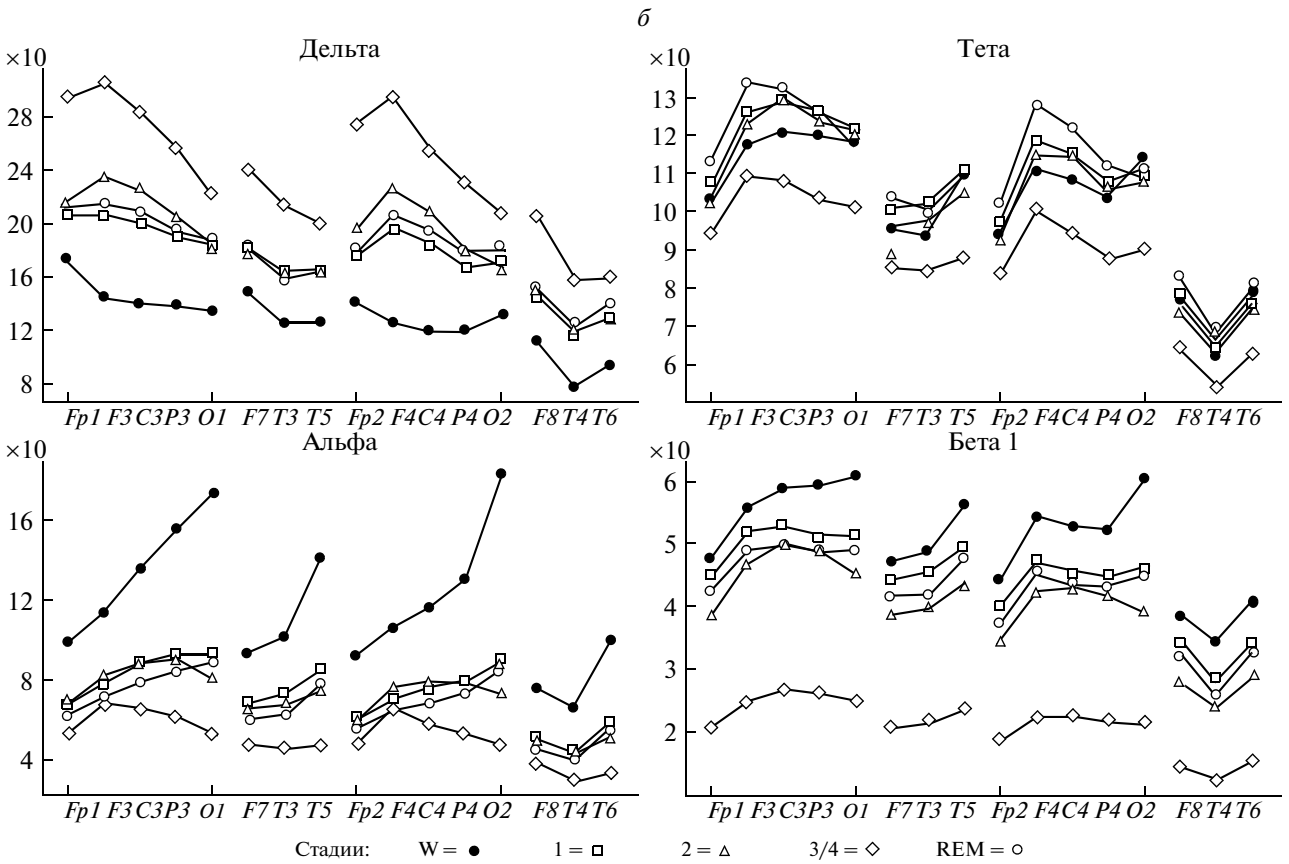
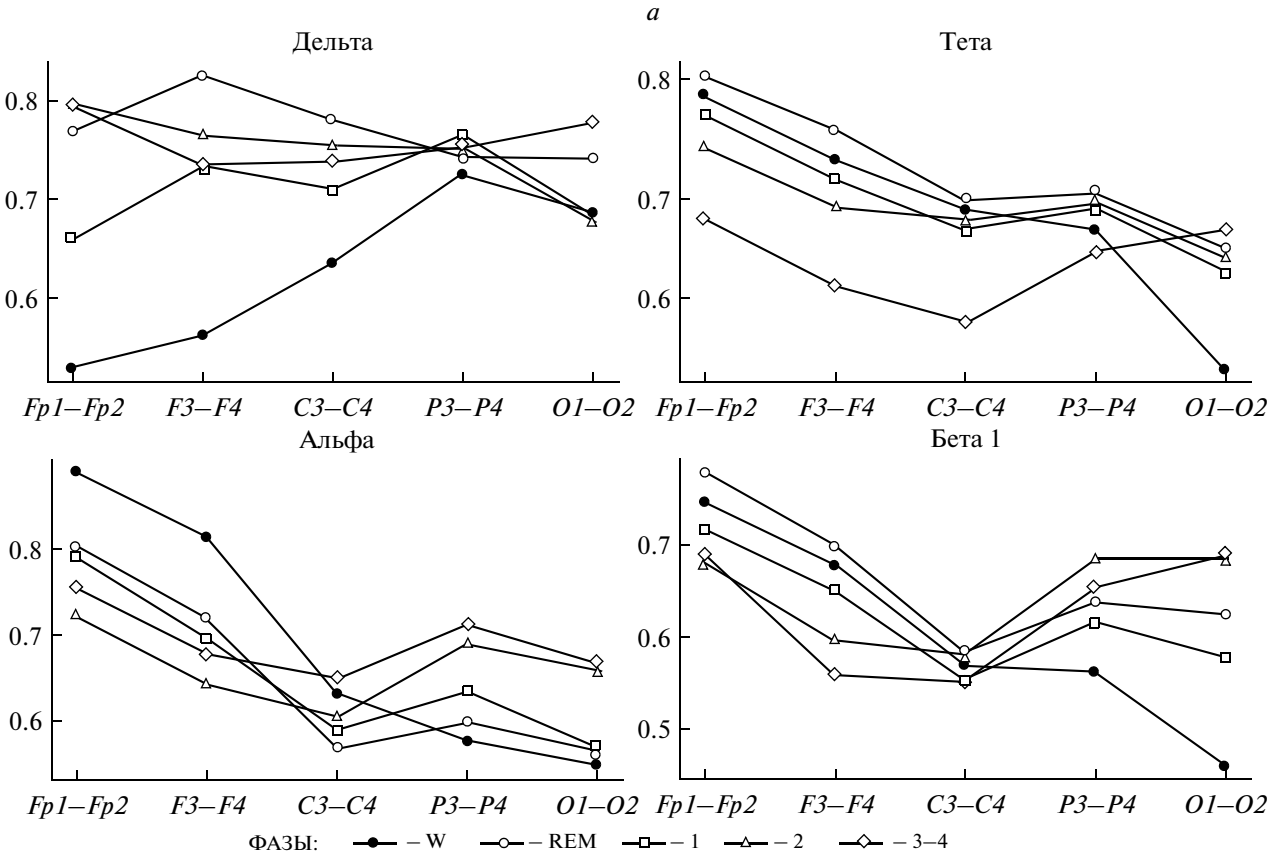
*Межполушарные связи.* Обратимся теперь к рассмотрению соотношений близлежащих межполушарных связей (рис. 1, а), где выявляются следующие закономерности.

1. Диапазон дельта существенно отличается от других частотных диапазонов: в стадии W имеет место увеличение межполушарной синхронности огибающих ЭЭГ от лба к затылку ( $p_{jo} < 0.0002$ ) с меньшей синхронностью в лобных и центральных отведениях по сравнению с четырьмя стадиями сна ( $p_w < 0.04$ ), которые не имеют значимых тенденций лоб–затылок ( $p_{jo} > 0.15$ ) и мало различаются между собой ( $p_w > 0.05$ ).

2. Для других частотных диапазонов показательно последовательное уменьшение синхронности от лобных к центральным отведениям ( $p_{jo} < 0.00005$ ), а для диапазона тета (кроме стадии 3/4) – и от теменных к затылочным отведениям ( $p_w < 0.00001$ ).

3. Понижение синхронности в центральной паре отведений, проявляющееся во всех четырех стадиях сна и особенно ярко – в стадии 3/4: а) по сравнению с лобными отведениями ( $p_{jo} < 0.00003$ ); б) по сравнению с теменными отведениями в диапазонах альфа и бета ( $p_w < 0.03$ ); в) по сравнению с затылочными отведениями в диапазоне бета ( $p_w < 0.005$ , кроме стадии 1); такие тенденции могут быть связаны со снижением двигательной активности и мышечной афферентации.

4. Последовательное уменьшение синхронности от лба к затылку в стадии W ( $p_{jo} < 0.00001$ ). Аналогичная закономерность была обнаружена нами на совершенно другом экспериментальном материале [3]: под-



**Рис. 1.** Числовые соотношения оценок синхронности и амплитуд спектра. *a* – средние межполушарные корреляции по частотным диапазонам в зависимости от стадии сна: по вертикали – значения коэффициентов корреляции, по горизонтали – пары отведений; *b* – средние нормированные амплитуды спектра по частотным диапазонам, отведениям и стадиям сна: по вертикали – амплитуды спектра, по горизонтали – отведения.

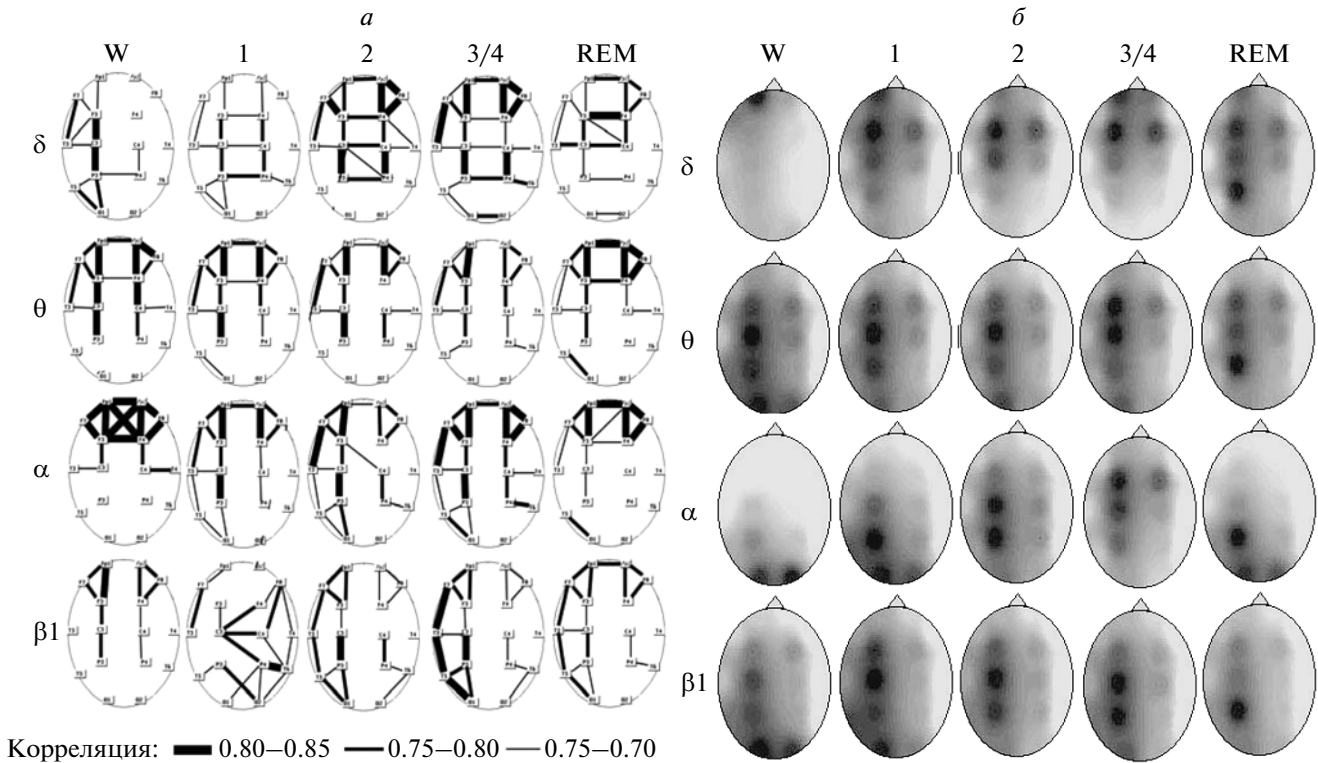
**Fig. 1.** Numerical dependencies of synchronism estimates and spectral amplitudes. *a* – an averaged interhemispheric correlation over frequency domains depending on the stage of sleep, vertical axis – correlation values, horizontal axis – pairs of electrodes; *b* – an averaged normalized spectral amplitudes over frequency domains, electrodes and sleep stages, vertical axis – spectral amplitudes, horizontal axis – electrodes.

ростки 11–14 лет, две группы: норма и нозология аутизм, проба “закрытые глаза”. И это показывает, что метод АКС обладает достаточной точностью и чувствительностью, чтобы давать одинаковые результаты на принципиально разном экспериментальном материале.

5. Последовательное снижение синхронности в лобной области ( $p_{jo} < 0.0006$ ) и повышение синхронности в теменной-затылочной области ( $p_{jo} < 0.0003$ , кроме диапазона тета) как с углублением сна, так и по отношению к стадиям W и REM.

*Высокосинхронные связи.* В завершение данного раздела обратимся к сравнительному изучению топографии высоких средних корреляционных связей (0.7–0.85) огибающих ЭЭГ по частотным диапазонам и стадиям сна (рис. 2, *a*).

1. Диапазон дельта. В стадии REM преобладает межполушарная синхронность огибающих ЭЭГ и синхронность в лобно-центральных отведениях. В стадии 1 центр синхронности смещается к теменной зоне с небольшим преобладанием в левом полушарии. В стадии 2 подобное распределение син-



**Рис. 2.** Топографические соотношения по частотным диапазонам и стадиям сна. *a* – распределение высокосинхронных связей между парами отведений; *b* – распределение средних амплитуд спектра ЭЭГ.

**Fig. 2.** Topographical relations over sleep stages and frequency domains. *a* – distribution of high synchronization links between pairs of electrodes; *b* – distribution of averaged spectral amplitudes.

хронности усиливается. В стадии 3/4 топография стадии 2 распространяется на височно-затылочные отведения с небольшим доминированием в левом полушарии. В стадии W доминирует левосторонняя асимметрия по большинству пар отведений при отсутствии значительной межполушарной синхронности.

2. Диапазон тета. Для всех стадий сна топография высокосинхронных связей достаточно близка. Она характеризуется превалированием лобно-центрально-теменных связей при малой представимости межполушарных связей и с незначительной левополушарной асимметрией.

3. Диапазон альфа. Стадия REM характеризуется высокой синхронностью в лобных отведениях с некоторой асимметрией в левом полушарии в отношении лобно-височного, лобно-центрально-теменных и височно-затылочного отведений. Стадия W отличается аномальным усилением синхронности во всех лобных парах отведений, включая и редко встречающиеся диагональные связи при отсутствии высокой синхронности между центральными, теменными и затылочными отведениями. Стадии 1, 2 и 3/4 достаточно близки по топографии синхронизма с некоторым увеличением общей синхронности при углублении сна. Они характеризуются малым числом межполушарных связей, превалированием парасагиттальных связей по всему скальпу с некоторой левополушарной асимметрией.

4. Диапазон бета1. Стадии REM, 2, 3/4 имеют близкую топографию, характеризующуюся заметной левополушарной асимметрией, парасагиттальными связями при малых межполушарных связях, отсутствием преобладания лобных связей. В стадии W асимметрия снижается, а центр синхронности смещается к лобным и парасагиттальным лобно-центрально-теменным связям. Локализация синхронности в стадии 1 плохо выражена.

Отметим отдельные сходные закономерности, выявленные в некоторых из цитируемых исследований: высокая когерентность в диапазоне дельта и альфа стадий 2 и 3/4 [13], высокая когерентность в диапазоне альфа стадии 3/4 и в диапазоне бета1 стадии REM [16], минимальная когерентность в диапазоне бета1 стадии W, максимальная когерентность в диапазоне дельта стадии 3/4 с превалированием когерентности стадии 2 по сравнению со стадией 1 [22].

*Общие характеристики.* В качестве общих характеристик рассмотренной топографической картины синхронности огибающих ЭЭГ следует отметить: 1) из совпадающего с результатами табл. 1: а) уменьшение межполушарной синхронности в направлении от лобных к затылочным отведениям (14 топограмм из 20); б) повышенный лобно-центральный синхронизм (10 из 20 топограмм); в) повышенная левосторонняя синхронизация (12 из 20 топограмм); 2) пониженная межполушарная синхронность (64 из 100 корреляций) по сравнению с парасагиттальными связями; 3) малая синхронность между диагональными парами отведений (15 из 320 корреляций); 4) близкая топография высокосинхронных связей наблюдается: в диапазоне тета по всем стадиям; в стадиях 2 и 3/4 по всем частотным диапазонам; в диапазоне альфа по стадиям 1, 2, 3/4; в диапазоне бета по стадиям REM, 2, 3/4; 5) наибольшими различиями по всем частотным диапазонам характерна стадия W.

Особо отметим, что результат 3 показывает, что при оценке синхронности ЭЭГ методом АКС не выявляется нередко упоминаемый в публикациях эффект объемного поверхностного проведения потенциалов, в противном случае при наличии высокосинхронных сагиттальных и аксиальных связей между тремя отведениями диагональные связи были бы тоже высокими.

#### 4. ТОПОГРАФИЯ АМПЛИТУДНО-СПЕКТРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК

*Методика.* Приведенный выше анализ высокосинхронных связей огибающих ЭЭГ необходимо дополнить анализом топографии амплитудных характеристик ЭЭГ. Выберем для этого наиболее статистически устойчивый показатель — среднюю амплитуду спектра в частотном диапазоне. Амплитудные спектры вычислим для 16 отведений на всем 20-секундном временном интервале записей, что дает высокое разрешение по частоте 0.05 Гц, а это обеспечивает приемлемую статистическую устойчивость усредненных оценок с учетом наличия не менее 80 спектральных гармоник в каждом частотном диапазоне. Однако сами средние амплитуды спектра в частотных диапазонах подвержены значительной межиндивидуальной вариативности (в 2–3.5 раза), определенной индивидуальными особенностями ЭЭГ испытуемых и ин-

струментальными факторами. Для ее нивелирования произведем нормировку средних амплитуд спектра: каждое значение для конкретного испытуемого выражается в процентном отношении к средней для него амплитуде по всем отведениям и всем частотным диапазонам\*.

**Обсуждение результатов.** На рис. 1, б приведены средние амплитуды спектра, вычисленные дифференцированно по частотным диапазонам, отведениям и стадиям сна. Сравнительный анализ результатов представляется целесообразно производить по продольным “меридианам” или парасагиттальным цепочкам электродов: двум проксимальным  $Fp1, F3, C3, P3, O1$  (левый меридиан будем обозначать  $Fp1 - O1$ ) и  $Fp2, F3, C3, P3, O2$  (правый меридиан обозначим  $Fp2 - O2$ ) и двум дистальным  $F7, T3, T5$  (левый меридиан  $F7 - T5$ ) и  $F8, T4, T6$  (правый меридиан  $F8 - T6$ ). Именно такие меридианы выделены на рис. 1, б.

**Числовые закономерности.** Использованное меридианное представление позволяет четко визуально выявить числовые соотношения и закономерности (как в парасагиттальных, так и в аксиальных направлениях, а также по стадиям сна и диапазонам), которые затем статистически верифицируются.

1. Тенденции последовательного увеличения амплитуд ЭЭГ по стадиям сна:

- в диапазоне дельта: W, REM-1-2, 3/4 ( $p_{k-w} < 10^{-5}$ ) с отсутствием различий стадий REM-1-2 ( $p_{k-w} = 0.56$ ); в этих соотношениях диапазон дельта противоположен диапазонам альфа и бета1, как это имело место и в отношении межполушарной синхронности (рис. 1, а);

- в диапазоне тета: 3/4, W, 1-2, REM ( $p_{k-w} = 0.007$ ) с отсутствием различий стадий 1-2 ( $p_{k-w} = 0.59$ ); в этих соотношениях диапазон тета занимает промежуточное положение, как это имело место и в отношении межполушарной синхронности (рис. 1, а);

- в диапазоне альфа: 3/4, REM-1-2, W ( $p_{k-w} < 10^{-5}$ ) с отсутствием различий стадий REM-1-2 ( $p_{k-w} = 0.43$ );

\* Было опробовано несколько различных нормировок, из которых использованный вариант показал наилучшие результаты в плане дифференциации стадий сна. В частности, данная нормировка уменьшает коэффициенты вариации амплитудных оценок испытуемых по отведениям и в рамках отдельных стадий сна и частотных диапазонов в 2.2–3.5 раза.

- в диапазоне бета1: 3/4, 2-REM-1, W ( $p_{k-w} < 10^{-5}$ ), различия стадий 2, REM, 1 выявляются с учетом упорядоченности факторных эффектов ( $p_{jo} = 0.012$ ).

2. Левополушарное доминирование, которое проявляется в обоих парах меридианов ( $p_w < 0.00015$ ), но по относительному соотношению амплитуд особенно выражено в дистальных меридианах (обратное соотношение наблюдается только в отведениях  $O1, O2$  для диапазона альфа стадии W без значимых различий  $p_w = 0.15$ ).

3. Соотношения лоб–затылок (за исключением меридиана  $F8 - T6$ ):

- последовательное возрастание амплитуд: в диапазоне альфа для всех меридианов ( $p_{jo} < 0.013$ ), кроме стадий 2 и 3/4; в диапазоне бета для меридиана  $F7 - T5$  ( $p_{jo} < 0.003$ ) и для меридиана  $Fp1 - O1$  в стадии W ( $p_{jo} < 10^{-9}$ );

- последовательное уменьшение амплитуд (за исключением отведений  $Fp1, Fp2$ ): в диапазоне дельта ( $p_{jo} < 0.007$ ); в диапазоне тета для обоих проксимальных меридианов в стадиях REM и 3/4 ( $p_{jo} < 0.01$ ); в диапазоне альфа для обоих проксимальных меридианов в стадии 3/4 ( $p_{jo} < 10^{-6}$ ).

4. Доминирование проксимальных меридианов над дистальными ( $p_w < 0.013$ ).

5. Частные закономерности: а) снижение амплитуд в отведениях  $Fp1, Fp2$  относительно  $F3, F4$  ( $p_w < 0.02$ ); б) более низкие амплитуды в  $T4$  по сравнению с соседними отведениями меридиана  $F8 - T6$  и последовательное увеличение амплитуд лоб–затылок в меридиане  $F7 - T5$  ( $p_w < 0.034$ ).

**Топографические характеристики.** Рассмотрим топографию средних амплитуд спектра ЭЭГ по стадиям сна и частотным диапазонам (рис. 2, б, для лучшей визуализации фокусов активности каждая карта представлена в собственной черно-белой шкале, поэтому для соотнесения уровней активации следует обращаться к рис. 1, б). В качестве общих характеристик следует отметить следующие: 1) идентичная топография наблюдается в non-REM-стадиях сна диапазона тета и в стадиях 2 и 3/4 диапазонов дельта и бета1; 2) существенное отличие топографии стадии REM и особенно стадии W от non-REM-стадий сна; 3) общие топографические различия последовательно увеличиваются в порядке частотных диапазонов: тета, бета1, дельта, альфа.



**Таблица 2.** Межполушарная асимметрия, вычисленная по формуле  $(лев - прав)/(лев + прав) \cdot 100\%$ : средние значения и стандартные отклонения

**Table 2.** Interhemispheric asymmetry calculated as  $(left - right)/(left + right) \cdot 100\%$ : mean values and standard deviations

| Стадии | <i>Fp1–Fp2</i> | <i>F7–F8</i> | <i>F3–F4</i> | <i>T3–T4</i> | <i>C3–C4</i> | <i>T5–T6</i> | <i>P3–P4</i> | <i>O1–O2</i> |
|--------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| REM    | 5.4 ± 3.3      | 13.1 ± 6.4   | 4.1 ± 4.2    | 21.5 ± 7.6   | 6.9 ± 5.3    | 17.9 ± 6.4   | 7.7 ± 4      | 3.6 ± 6.4    |
| 1      | 4.8 ± 3.2      | 12.6 ± 6.9   | 4.1 ± 4      | 21.7 ± 7.9   | 7.1 ± 5.1    | 17.5 ± 8     | 7.7 ± 5.1    | 3 ± 7.2      |
| 2      | 4.6 ± 3.9      | 11.8 ± 6.3   | 3.2 ± 4.9    | 21.1 ± 8.2   | 6.8 ± 5      | 18 ± 8.1     | 8 ± 4.9      | 2.7 ± 7.4    |
| 3/4    | 5.4 ± 3.7      | 12.5 ± 6.7   | 3.7 ± 4.3    | 22.2 ± 8.8   | 6.9 ± 5.2    | 16.8 ± 7.3   | 7.7 ± 5      | 2.2 ± 7.4    |
| W      | 4.9 ± 3.3      | 11.4 ± 6.5   | 3.6 ± 4.4    | 20.7 ± 7.2   | 6.6 ± 5.5    | 15.8 ± 8.1   | 6.8 ± 4.8    | 1.9 ± 6.4    |
| Общее  | 5 ± 3.5        | 12.3 ± 6.5   | 3.7 ± 4.4    | 21.4 ± 7.9   | 6.8 ± 5.2    | 17.2 ± 7.6   | 7.6 ± 4.7    | 2.7 ± 6.9    |

**Таблица 3.** Процентное соотношение правополушарной асимметрии

**Table 3.** Percentage ratio of right-hemispheric asymmetry

| Стадии  | <i>Fp1–Fp2</i> | <i>F7–F8</i> | <i>F3–F4</i> | <i>T3–T4</i> | <i>C3–C4</i> | <i>T5–T6</i> | <i>P3–P4</i> | <i>O1–O2</i> |
|---------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| REM     | 7.2            | 1.8          | 19.9         | 0            | 10.9         | 0            | 5.4          | 23.6         |
| 1       | 7.2            | 3.6          | 16.3         | 0            | 7.2          | 0            | 7.2          | 27.2         |
| 2       | 12.7           | 5.4          | 30.9         | 0            | 7.2          | 1.8          | 5.4          | 21.8         |
| 3/4     | 5.4            | 3.6          | 16.3         | 0            | 5.4          | 1.8          | 3.6          | 29           |
| W       | 3.6            | 5.4          | 16.3         | 0            | 10.9         | 3.6          | 7.2          | 34.5         |
| Среднее | 7.2            | 3.9          | 19.9         | 0            | 8.3          | 1.4          | 5.8          | 27.2         |

В диапазоне альфа в стадии W активность локализуется в затылочных отведениях, в стадии REM она захватывает и теменные отведения, а с углублением сна постепенно смещается вперед, захватывая сначала центральные, а затем и центрально-лобные отведения с уменьшением активности затылочных отведений. Такая тенденция, хотя и в менее выраженной степени, проявляется в диапазонах бета I и тета с учетом большего распространения активности на центральные и центрально-лобные отведения. В диапазоне дельта в стадии W фокус локализуется в переднефронтальных отведениях, в стадии REM активация охватывает большую область от центрально-лобных до теменных отведений, а с углублением сна такая широко распространенная активация постепенно смещается вперед.

Отметим отдельные сходные закономерности, выявленные в некоторых из цитируемых исследований: расположение фокуса альфа-активности в стадии 1 в левой затылочной области с его смещением в центральную область в стадии 2 [6], максимальная дельта-активность в стадии 3/4 и бета-активность в стадии 1 [17], отличие стадии 1 от стадии REM более низкой активностью в дельта- и тета-диапазонах и более высокой активностью в диапазонах альфа и бета [14],

преобладание дельта-активности в лобно-центральной области [30].

**Межполушарная асимметрия.** В табл. 2 приведены статистические оценки межполушарной асимметрии дифференцированно по стадиям сна и симметричным парам отведений. Аналогично в табл. 3 показаны проценты случаев наблюдения правополушарной асимметрии. Эти данные позволяют сделать следующие выводы:

- по всем стадиям сна и симметричным парам отведений доминирует левополушарная асимметрия: правосторонняя асимметрия в среднем наблюдается лишь в 9.2% случаев (среднее от “Среднее” в табл. 3), глобальное среднее значение асимметрии составляет  $8.9 \pm 5.4$  (среднее от “Общее” в табл. 2);

- в порядке уменьшения левополушарной асимметрии симметричные пары отведений могут быть проранжированы следующим образом: *T3–T4*, *T5–T7*, *F7–F8*, *P3–P4*, *C3–C4*, *Fp1–Fp2*, *F3–F4*, *O1–O2*;

- тенденций закономерного или статистически значимого изменения асимметрии по стадиям сна не наблюдается.

**Общие закономерности.** Рассмотренные результаты спектрального анализа существенно дополняют результаты анализа синхронно-

**Таблица 4.** Число ошибок дискриминантной классификации стадий сна  
**Table 4.** Errors in discriminate classification of sleep stages

| №  | Диапазон | Показатель              | REM | 1  | 2  | 3/4 | W  | Средний процент |
|----|----------|-------------------------|-----|----|----|-----|----|-----------------|
| 1  | Альфа    | Синхронность            | 12  | 15 | 20 | 12  | 8  | 22.3            |
| 2  | Дельта   | »                       | 17  | 32 | 23 | 13  | 16 | 33.7            |
| 3  | Тета     | »                       | 14  | 25 | 28 | 16  | 12 | 31.7            |
| 4  | Бета I   | »                       | 20  | 24 | 24 | 22  | 16 | 35.3            |
| 5  | Альфа    | Спектр                  | 16  | 24 | 27 | 2   | 10 | 26.3            |
| 6  | Дельта   | »                       | 25  | 31 | 21 | 4   | 1  | 27.3            |
| 7  | Тета     | »                       | 26  | 44 | 27 | 18  | 28 | 47.7            |
| 8  | Бета I   | »                       | 24  | 35 | 21 | 4   | 21 | 35.2            |
| 9  | Альфа    | Синхронность + спектр   | 5   | 12 | 11 | 2   | 3  | 11.0            |
| 10 | »        | Контроль: дискриминация | 0   | 8  | 7  | 1   | 1  | 7.0             |
| 11 | »        | Контроль: классификация | 2   | 3  | 4  | 0   | 2  | 18.3            |

сти огибающих ЭЭГ, но совпадают в следующих своих общих характеристиках: 1) левополушарное доминирование; 2) существенное топографическое отличие стадии W от других стадий; 3) близкая топография наблюдается: в диапазоне тета по всем стадиям; в стадиях 2 и 3/4 по всем частотным диапазонам.

## 5. ДИСКРИМИНАНТНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

*Классификация по оценкам синхронности.* С целью автоматического распознавания стадий сна проведем общий дискриминантный классификационный анализ [2, с. 365–370] профилей синхронности огибающих ЭЭГ отдельно по частотным диапазонам, когда для каждой стадии сна исходно указывается номер ее класса. В табл. 4 (строки 1–4) приведено число ошибок такой классификации из 60 профилей синхронизма. Видно, что наилучшие результаты дает использование диапазона альфа для всех стадий сна, хотя средний процент ошибок 22.3 и здесь достаточно высок. Тем самым топография синхронности по стадиям сна значительно менее различается, чем в отношении нормы и шизофрении, где минимальное число ошибок дискриминантной классификации составило 1.5–6% [3]. В направлении ухудшения распознаваемости стадии сна ранжируются (по суммарному числу ошибок в четырех частотных диапазонах: 63, 96, 95, 63, 52) в следующем порядке: W, 3/4  $\approx$  REM, 2  $\approx$  1 (при других показателях [28] порядок ранжирования бли-

зок к рассмотренному: 3/4, W  $\approx$  REM, 2, 1). Тем самым стадии W, 3/4, REM заметно различаются по топографии ЭЭГ-синхронизма как между собой, так и от стадий 1, 2; при этом наиболее высокие различия имеют место для стадии W.

*Классификация по спектральным оценкам.* Далее для сравнения проведем классификацию стадий сна с использованием спектральных оценок. Здесь также лучшие результаты получены для диапазона альфа (табл. 4, строка 5), однако использование профилей синхронности (табл. 4, строка 1) более эффективно как в среднем, так и для распознавания стадий REM, 1, 2 и W, хотя спектральные оценки дают меньшее число ошибок при распознавании стадии 3/4.

*Объединенная классификация.* Теперь проведем дискриминантный анализ с расширенными матрицами данных, когда к показателям синхронности огибающих ЭЭГ добавляются амплитудные показатели. Как видно из табл. 4 (строка 9), это дает улучшение результатов со средним процентом ошибок 11, при этом ошибки классификации отдельных стадий лежат в диапазоне 3–20%.

*Классификация новых объектов.* Для обоснования устойчивости полученных результатов проведем контрольную классификацию, разбив записи каждой стадии сна каждого испытуемого на две группы в соотношении 80 к 20%. Построим дискриминантные функции для первой группы записей (*обучающая* выборка) и используем их для классификации записей второй группы (*классифицируемая*

выборка). Результаты анализа (табл. 4, строки 10, 11) демонстрируют небольшое число ошибок для обучающей выборки (7%) и удовлетворительное распознавание стадий сна для классифицируемой выборки (18.3% ошибок).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достаточно подробные обзоры различных подходов к автоматическому распознаванию стадий сна содержатся в работах [19, 28, 29]. Оценки ошибок классификации различных стадий составляют: 10–42%, 5–37%, 15–25% [19], 6.9–12.5% [25], 7–39% [28], 18–21%, 12.3%, 23% [29]. Отсюда следует, что за прошедшие четверть века (с работы [19]), несмотря на внедрение множества новых вычислительных методов, в этом направлении не было достигнуто существенного продвижения. В таком сравнение полученные нами результаты выглядят несомненно перспективными. Тем самым сочетание оценок корреляционной синхронности огибающих ЭЭГ с амплитудными спектральными оценками может являться основой для высоконадежного автоматического распознавания стадий сна и дремотных состояний как непосредственно в ходе эксперимента, так и при постэкспериментальном анализе записей. С другой стороны, рассмотренные в разделах 2, 3, 5 многочисленные и многоплановые результаты (в дополнение к результатам работы [3]) свидетельствуют о физиологической валидности, инновационной эффективности, плодотворности и перспективности предложенного метода оценки синхронности ЭЭГ. Аналогичный вывод по результатам раздела 4 правомочен и в отношении предложенного метода нормировки амплитудно-спектральных показателей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаворонкова Л.А., Трофимова Е.В. Динамика когерентности ЭЭГ и двигательных реакций при засыпании у правшей и левшей. Физиология человека. 1997. 23(6): 18–26.
2. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. Учебное пособие для классического университетского образования. М.: ФОРУМ–ИНФРАМ, 2006. 512 с.
3. Кулаичев А.П. Метод анализа корреляционной синхронности ЭЭГ и его возможности. Журн. высш. нерв. деят. 2011. 61(4): 485–498.
4. Кураев Г.А., Сунцова Н.В. Межполушарные отношения на разных стадиях цикла бодрствования–сон человека. Физиология человека. 1998. 24(5):72–79.
5. Сулимов А.В., Марагей Р.А. Изучение ЭЭГ сна как нелинейного динамического процесса: сравнение глобальной корреляционной размерности ЭЭГ человека и мер линейной зависимости между каналами. Журн. высш. нерв. деят. 2003. 53(2): 151–155.
6. Сысоева Ю.Ю., Вербицкий Е.В. Исследование пространственно-временной организации ЭЭГ при развитии ночного сна лиц высокой и низкой тревожности. Материалы 3-й конференции “Сон – окно в мир бодрствования”. М., 2005: 97–98.
7. Шеповальников А.Н., Цицерошин М.Н., Рожков В.П., Гальперина Е.И., Зайцева Л.Г., Шеповаленков Р.А. Особенности межрегионального взаимодействия корковых полей при разных стадиях естественного и гипнотического сна (по данным ЭЭГ). Физиология человека. 2005. 31(2): 34–48.
8. Шишкин С.Л., Каплан А.Я., Дорохов В.Б. Корреляция между амплитудами огибающих частотных компонентов ЭЭГ как дополнительный инструмент для отслеживания динамики сна и дремотных состояний. Материалы 1-й конференции “Сон – окно в мир бодрствования”. М., 2001: 157–158.
9. Achermann P., Borbely A.A. Coherence spectra of all-night sleep EEG. Sleep Res. 1997. 26: 1.
10. Achermann P., Borbely A.A. Temporal evolution of coherence and power in the human sleep electroencephalogram. J. Sleep Res. 1998. 7 (Suppl. 1): 36–41.
11. Armitage R., Hoffmann R., Loewy D., Moffitt A. Variations in period-analysed EEG asymmetry in REM and NREM sleep. Psychophysiology. 1989. 26(3): 329–336.
12. Casagrande M., Bertin M. Night-time right hemisphere superiority and daytime left hemisphere superiority: a repatterning of laterality across wake-sleep-wake states. Biol. Psychol. 2008. 77(3): 337–342.
13. Corsi-Cabrera M., Guevara M., Arce C., Ramos J. Inter and intrahemispheric EEG correlation as a function of sleep cycles. Progr. Neuro-Psychopharmacol. Biol. Psychiat. 1996. 20(3): 387–405.
14. Corsi-Cabrera M., Munoz-Torres Z., Del Rio-Portilla Y., Guevara M. Power and coherent oscillations distinguish REM sleep, stage 1 and wakefulness. Int. J. Psychophysiol. 2006. 60(1): 59–66.
15. Duckrow H.P., Zaveri H.P. Coherence of the electroencephalogram during the first sleep cycle. Clin. Neurophysiol. 2005. 116(5): 1088–1095.
16. Dumermuth G., Lehmann D. EEG Power and coherence during non-REM and REM phases in humans in all-night sleep analyses. Eur. Neurol. 1981. 20: 429–434.
17. Dumermuth G., Langea B., Lehmann D., Meier C.A., Dinkelmann R., Molinari L. Spectral analysis of all-night sleep EEG in healthy adults. Eur. Neurol. 1983. 22(5): 322–339.

18. *Ehrlichman H., Antrobus J., Weiner M.* EEG asymmetry and sleep mentation during REM and NREM sleep. *Brain Cogn.* 1985. 4(4): 477–485.
19. *Fell J., Roschke J., Mann K., Schaffner C.* Discrimination of sleep stages: a comparison between spectral and nonlinear EEG measures. *EEG Clin. Neurophysiol.* 1996. 98(5): 401–410.
20. *Kaminski M., Blinowska K., Szelenberger W.* Topographic analysis of coherence and propagation of EEG activity during sleep and wakefulness. *EEG Clin. Neurophysiol.* 1997. 102(3): 216–227.
21. *Kobayashi T., Madokoro S., Misaki K., Murayama J., Nakagawa H., Wfda Y.* Interhemispheric differences of the correlation dimension in a human sleep electroencephalogram. *Psychiat. Clin. Neurosci.* 2002. 56(3): 265–266.
22. *Kuraev G., Suntsova N., Chernoval L., Pavlov I.* Interhemispheric relationships of the EEG activity during sleep-waking cycle in normal adults. *Sleep Res.* 1997. 26: 19.
23. *Nielsen T., Abel A., Lorrain D., Montplaisir J.* Interhemispheric EEG coherence during sleep and wakefulness in left- and right-handed subjects. *Brain Cogn.* 1990. 14(1): 113–125.
24. *Obermeyer W., Larson C., Yun B., Dolski I., Weber S., Davidson R., Benca R.* Comparison of frontal activation in sleep and wake. *Sleep Res.* 1997. 26: 232.
25. *Park Hae-Jeong, Oh Jung-Su, Jeong Do-Un, Park Kwang-Suk.* Automated sleep stage scoring using hybrid rule and case-based reasoning. *Comput. Biomed. Res.* 2000. 33(5): 330–349.
26. *Pereda E., Gamundi A., Nicolau M., Rial R., Gonzales J.* Interhemispheric differences in awake and sleep human EEG: a comparison between nonlinear and spectral measures. *Neurosci. Lett.* 1999. 263(1): 37–40.
27. *Roth C., Achermann P., Borbely A.A.* Frequency and state specific hemispheric asymmetries in the human sleep EEG. *Neurosci. Lett.* 1999. 271(3): 139–142.
28. *Susmakova K., Krakovska A.* Selection of measures for sleep stages classification. *Proc. 7th Int. Conf. Measurement.* Smolenice. 2009: 86–89.
29. *Susmakova K., Krakovska A.* Discrimination ability of individual measures used in sleep stages classification. *Art. Intel. Med. Arch.* 2008. 44(3): 261–277.
30. *Tanaka H., Hayashi M., Hori T.* Topographic mapping of EEG spectral power and coherence in delta activity during the transition from wakefulness to sleep. *Psychiat. Clin. Neurosci.* 1999. 53(2): 155–157.