

## Изучение пространственно-временной структуры электроэнцефалографической активности для объективизации оценки индивидуальных особенностей цикла сон — бодрствование

Путилов А.А., Донская О.Г., Верёвкин Е.Г., Путилов Д.А.

### Analysis of spatio-temporal structure of EEG-activity to form an objective assessment of the individual characteristics of the sleep-wake behavior

Putilov A.A., Donskaya O.G., Veryovkin Ye.G., Putilov D.A.

НИИ молекулярной биологии и биофизики СО РАМН, г. Новосибирск

© Путилов А.А., Донская О.Г., Верёвкин Е.Г., Путилов Д.А.

Описана структура индивидуальной изменчивости электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в процессе круглосуточного бодрствования 126 человек. Выявлены ее количественные связи с хронотипом (утренняя и вечерняя сонливость), сомнотипом (возможность уснуть в любое время) и трототипом (возможность бодрствовать в любое время суток). Обнаружено, что индивидуальные различия в чувствительности уровня бодрствования к лишению сна могут быть количественно предсказаны по структурным особенностям ЭЭГ как во время обычного дневного бодрствования, так и при депривации сна в ночные часы.

**Ключевые слова:** регуляция цикла сон — бодрствование, лишение сна, закономерности индивидуальной изменчивости, хронотип, сомнотип, трототип, электроэнцефалография бодрствования, альфа-активность, тета-активность.

The structure of individual variation in waking EEG was elaborated in 130 sleep deprived subjects. Its quantitative relationship with chronotype (morning and evening lateness), somnotype (daytime and anytime sleepability) and trototype (daytime and anytime wakeability) was described. The findings indicate that individual vulnerability of wakeability to sleep loss can serve as a quantitative predictor using the structures of waking EEG at daytime and during sleep deprivation.

**Key words:** regulation of the sleep-wake cycle, sleep deprivation, regularities of individual variability, chronotype, somnotype, trototype, waking EEG, alpha activity, theta activity.

УДК 616.831-073.7:612.821.7/.75

#### Введение

В обществе, живущем 24 ч в сутки, преимуществом является небольшая потребность во сне, хорошая сопротивляемость недосыпанию и возможность быстро адаптироваться к смене часовых поясов и меняющемуся графику работы. Возникает вопрос, может ли научное исследование предложить инструмент, позволяющий количественно различать людей по этим выгодным чертам? К сожалению, индивидуальные различия по потребности во сне, уязвимости к недосыпанию и циркадная адаптация продолжают оставаться

слабо изученными и редко рассматриваются в теоретических и практических работах [16]. В настоящее время все еще не известны процессы, которые могли бы предсказать наличие этих черт, а также возможные взаимоотношения между ними [17].

Существует согласие относительно маркеров циркадных фаз, которые могут быть получены путем регистрации суточной вариации температуры тела, мелатонина и (или) уровня секреции кортизола. Однако до настоящего времени нет единого суждения относительно биологических маркеров потребности во сне и уязвимости к потере сна. Известно, что депривация

сна оказывает значительное влияние на волновую активность головного мозга, особенно во время длительного бодрствования [3, 4, 6, 16, 17] и во время последующего восстановительного сна [6, 7, 11, 16, 17]. Эти факты побуждают исследователей определять количественные показатели электроэнцефалограммы (ЭЭГ) во время депривации сна, чтобы обнаружить электрофизиологические маркеры адаптивных возможностей цикла сон — бодрствование.

Большинство экспериментальных исследований влияния длительного бодрствования на субъективные и объективные показатели сонливости не принимали во внимание индивидуальные особенности цикла сон — бодрствование. Цель настоящей работы — исследование связи субъективных оценок состояния сонливости и показателей ЭЭГ-активности, указывающих на сонливость, с хронотипом (утренняя и вечерняя сонливость), сомнотипом (способность уснуть в любое время) и трототипом (умение бодрствовать в любое время суток). Еще одна задача исследования — поиск закономерностей изменения электрической активности головного мозга в процессе лишения ночного сна, позволяющих определить количественно потребность во сне и успешность преодоления депривации сна.

## Материал и методы

В исследовании приняли участие 126 здоровых добровольцев, из них 52 мужчины (средний возраст 26,98 года, от 16 до 55 лет) и 74 женщины (средний возраст 30,27, от 16 до 66 лет).

Участники приходили в институт между 08.30 и 09.30 и покидали его утром следующего дня с 09.00 до 10.30. Каждые 3 ч производилась регистрация ЭЭГ (всего девять измерений). Электроэнцефалограмма записывалась в двух отведениях — Fz и O2 в соответствии с международной системой «10—20» и для двух проб (2 мин с открытыми глазами и 2 мин с закрытыми глазами) с помощью 16-канального электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-2» фирмы «Нейрософт» (г. Иваново). После каждой записи испытуемые оценивали свое субъективное состояние, в промежутках между записями заполняли анкеты и опросники.

После каждой записи испытуемые оценивали настроение от очень плохого до очень хорошего и энергичность от очень низкой до очень высокой по 100-миллиметровой визуальной аналоговой шкале и сон-

ливость и бодрость по 9-балльной вербальной шкале Karolinska Sleepiness Scale (KSS) [8].

Опросник Sleep-Wake-Pattern Assessment Questionnaire (SWPAQ) для оценки индивидуальных особенностей цикла сон — бодрствование предъявлялся дважды: за 1 нед до эксперимента и утром в день исследования [1, 13].

Для каждого испытуемого определялись особенности утреннего и вечернего поведения — шкалы M (утреннее запаздывание) и E (вечернее запаздывание), качество ночного сна (шкала S), способность бодрствовать днем в провоцирующих сон условиях — шкала V (бодрствование днем) и способность спать или бодрствовать в любое время — шкалы F (сон в любое время) и W (бодрствование в любое время).

Следуя терминологическому различию, предложенному P. Lavie и A. Zwuluni [11] и в дальнейшем модифицированному van Dongen [17], способность бодрствовать (шкалы V и W) можно интерпретировать как индивидуальный трототип (чувствительность к потере сна), умение засыпать (шкалы F и S) — как индивидуальный сомнотип (склонность к засыпанию днем и ночью) и запаздывание (шкалы E и M) — как индивидуальный хронотип (фазовые различия в динамике бодрствования и сна).

Суммируя баллы соответствующей пары шкал, можно оценивать способность бодрствовать (толерантность к засыпанию), засыпать (умение засыпать легко и спать крепко) и запаздывание (утренне-вечернее предпочтение) [12, 14].

В течение 1 нед перед исследованием испытуемые придерживались привычного времени отхода ко сну и пробуждения, каждый участник предоставил отчет своей истории сна за 6 дней до эксперимента.

Анализ записей ЭЭГ по каждому отведению осуществлялся отдельно для закрытых и открытых глаз, исключая 10-секундные периоды перехода. Спектральный анализ проводился по 2-секундным эпохам, исключая артефакты. Данные по каждому отведению и каждому условию содержали усредненный спектр, рассчитанный не менее чем на 50-секундный интервал.

Абсолютная мощность рассчитывалась для диапазона в 1 Гц от 1,00 до 32,99 Гц. Далее эти оценки были усреднены для 10 частично перекрывающихся частотных диапазонов: медленный дельта (DS) (1,00—2,99), быстрый дельта (DF) (3,00—4,99), медленный тета

(TS) (4,00—5,99), быстрый тета (TF) (6,00—8,99), медленный альфа (AS) (8,00—9,99), быстрый альфа (AF) (10,00—12,99), сигма (SI) (12,00—15,99), медленный бета (BS) (15,00—18,99), быстрый бета (BF) (19,00—24,99) и медленный гамма (GS) (25,00—32,99).

Так как индивидуальные различия мощности ЭЭГ могут быть обусловлены факторами, не относящимися к процессу сон — бодрствование, использовалась нормализация абсолютной мощности: для каждой точки и для среднего значения двух последних измерений рассчитывались ипсатизированные значения абсолютной мощности (ипсатизированная, или межиндивидуальная, стандартизация предполагает приведение данных к нулевому среднему и стандартному отклонению, равному единице для каждого участника). Дополнительно рассчитывалась разница между значениями низкочастотного тета-ритма и высокочастотного альфа-ритма — индекс Teta Alpha Difference (TAD).

Использовался статистический пакет SPSS 16.0. Для анализа данных применялись парный *t*-критерий Стьюдента, непараметрический коэффициент корреляции Спирмена, коэффициент Пирсона. Для субъективных оценок и ипсатизированных значений пара-

метров ЭЭГ использовался факторный анализ. Сравнение изменений субъективных оценок состояния и индексов ЭЭГ по подгруппам в ночное время осуществлялось с помощью двухфакторного ANOVA.

## Результаты

**Вклад индексов ЭЭГ в информацию о субъективной сонливости.** Результаты факторного анализа (лобные отведения, закрытые глаза) с ротацией двух наиболее выраженных факторов показаны в таблице. Были выявлены два фактора различной природы. Высокая нагрузка десяти ЭЭГ-индексов (0,4 и выше) наблюдалась на первый наиболее выраженный фактор, в то время как нагрузки субъективных оценок были незначительными. Второй фактор характеризовался очень высокими нагрузками показателей сонливости и уровня энергичности (0,4 и выше или -0,4 и ниже) практически для всех временных точек и незначительной нагрузкой со стороны индексов ЭЭГ. Однако в трех последних измерениях нагрузка дельта- и тета-индексов ЭЭГ была очень высокой. Нагрузка медленноволновых индексов (особенно тета) была даже выше, чем нагрузка показателей сонливости утром второго дня.

Результаты факторного анализа субъективных оценок и индексов ЭЭГ

Шкала	8-я/9-я	Девять самооценок и ЭЭГ-записей								
		Время								
		09.00	12.00	15.00	18.00	21.00	24.00	03.00	06.00	09.00
		Номер записи								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Нагрузки на второй фактор по трем самооценкам состояния</i>										
KSS	<b>0,635</b>	<b>0,759</b>	<b>-0,697</b>	<b>0,673</b>	<b>-0,772</b>	<b>-0,750</b>	<b>-0,815</b>	<b>-0,640</b>	<b>-0,622</b>	<b>0,556</b>
Энергичность	<b>-0,591</b>	<b>-0,775</b>	<b>0,756</b>	<b>-0,782</b>	<b>0,836</b>	<b>0,777</b>	<b>0,849</b>	<b>0,712</b>	<b>0,637</b>	<b>-0,471</b>
Настроение	-0,348	<b>-0,608</b>	<b>0,618</b>	<b>-0,628</b>	<b>0,704</b>	<b>0,618</b>	<b>0,607</b>	<b>0,442</b>	<b>0,482</b>	-0,230
<i>Нагрузки на второй фактор по шести самооцениваемым чертам</i>										
E	-0,004	0,382	-0,161	0,341	-0,060	0,353	0,526	0,388	0,161	-0,070
M	0,283	<b>0,605</b>	<b>-0,431</b>	0,269	-0,187	-0,100	0,176	0,132	-0,231	0,038
W	<b>-0,421</b>	-0,169	0,132	0,253	0,044	0,218	0,292	0,221	<b>0,481</b>	-0,346
V	<b>-0,434</b>	-0,369	<b>0,466</b>	-0,268	0,360	<b>0,548</b>	0,364	0,263	<b>0,490</b>	-0,296
F	0,125	0,190	-0,245	0,348	-0,283	<b>-0,443</b>	-0,196	-0,205	-0,126	0,051
S	0,035	0,310	-0,278	0,336	-0,116	-0,074	0,042	-0,022	0,091	0,023
<i>Нагрузки на второй фактор по 10 ипсатизированным значениям удельной мощности</i>										
DS	<b>0,487</b>	-0,199	0,311	-0,291	-0,071	0,031	-0,147	<b>-0,457</b>	-0,323	<b>0,658</b>
DF	<b>0,755</b>	-0,127	0,368	-0,390	-0,158	-0,020	-0,056	<b>-0,517</b>	<b>-0,567</b>	<b>0,823</b>
TS	<b>0,761</b>	-0,128	0,318	-0,339	-0,121	0,023	0,006	<b>-0,547</b>	<b>-0,562</b>	<b>0,840</b>
TF	0,300	0,079	-0,011	0,000	0,023	0,005	0,104	-0,233	-0,190	<b>0,520</b>
AS	-0,260	0,269	-0,048	0,109	0,216	0,027	0,038	0,010	0,327	0,110
AF	-0,239	0,068	-0,094	-0,017	0,350	0,073	-0,050	0,087	0,293	-0,098
SI	0,030	-0,022	-0,064	0,036	0,319	0,028	-0,134	0,059	0,054	0,162
BS	-0,069	0,214	-0,191	0,139	0,130	0,046	-0,119	0,221	0,144	0,073

BF	-0,051	0,066	-0,190	0,297	-0,014	0,042	-0,099	0,249	0,140	-0,090
GS	0,099	0,029	-0,155	0,237	-0,074	-0,008	0,001	0,243	-0,058	-0,013
<i>Объясненная вариация двумя наибольшими факторами после varimax вращения, %</i>										
1 + 2	360,89	430,37	430,83	400,92	350,74	470,52	410,48	390,45	370,46	370,50
2	150,56	130,49	120,99	130,40	120,59	110,82	120,64	120,90	130,77	150,53

Примечание. Субъективные оценки и индексы ЭЭГ, полученные для каждой из девяти временных точек. Дополнительные оценки были подсчитаны усреднением значений 9-й и 8-й временных точек (8-я/9-я). ЭЭГ-данные с фронтального отведения с закрытыми глазами. Нагрузки более 0,4 и ниже -0,4 напечатаны жирным шрифтом.

Индивидуальные особенности также иногда имели высокие нагрузки на второй фактор, которые соответствовали ожиданиям. Например, высокий уровень бодрствования (высокие значения W и V) были связаны с низкой сонливостью и высокой энергичностью. Показатель утреннего запаздывания (M) характеризовался той же направленностью нагрузки, что и сонливость утром, а значения вечернего запаздывания (E) были противоположны паттерну нагрузки сонливости в полночь.

Интересно, что умеренные нагрузки (между 0,2 и 0,4 или -0,4 и -0,2) на второй фактор для индексов ЭЭГ не соответствовали результатам их высоких нагрузок. В дневное время параметры ЭЭГ нагружали второй фактор противоположным образом, что предполагает наличие связи более высокой сонливости с более низкой дельта- и тета-активностью и более высокой активностью высокочастотного альфа-ритма.

Сходные результаты были получены для затылочного отведения при закрытых глазах. Для пробы с открытыми глазами существенное влияние медленноволновой активности на фактор сонливости было отмечено только для лобного отведения и только в девятом измерении.

В целом результаты факторного анализа показывают, что у испытуемых при лишении сна ЭЭГ-активность коварирует с субъективными ощущениями, отражая факт снижения бодрости (роста сонливости). Чем интенсивнее снижалась бодрость, тем сильнее росла активность в дельта-, тета-диапазонах.

**Распределение во времени индексов ЭЭГ в целом по выборке.** Исследование временного профиля ипсатизированных значений ЭЭГ в тета- и альфа-диапазонах показало, что в условиях депривации сна эти значения стремятся к возрастанию. Во фронтальных областях показатели повышения мощности были наибольшими в диапазоне быстрого тета (TF), а в затылочных областях максимальное повышение наблюдалось в диапазоне медленного тета (TS). В лобном отведении отмечалось снижение быстрого альфа (AF), а в затылочном незначительное снижение медленного и быстрого альфа-ритма (AS и AF).

Из рис. 1 видно, что, во-первых, изменение мощности в ночное время при лишении сна может идти в двух направлениях — изменяется тета либо AF при закрытых глазах или AF при открытых либо закрытых глазах.

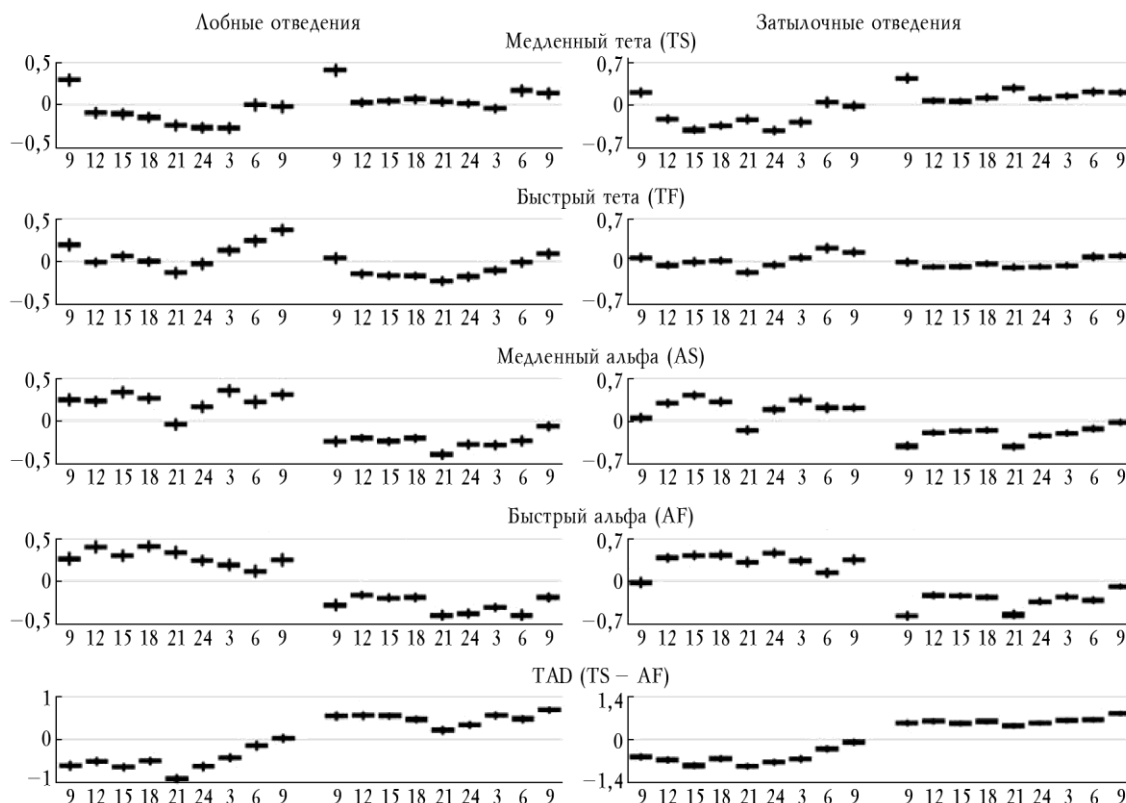


Рис. 1. Суточные изменения альфа- и тета-индексов во фронтальных и затылочных отведениях: каждое значение рассчитывалось как отклонение от оценки, усредненной по 10 частотным интервалам; левая часть каждого графика — закрытые глаза, правая часть — открытые глаза

Во-вторых, тенденция к увеличению мощности может быть больше или меньше выраженной (TF либо TS); в-третьих, тенденция к понижению мощности проявляется в большей или меньшей степени (AF во фронтальных областях либо в затылочных областях); в-четвертых, тенденция к повышению или понижению является продолжительной либо превращается в противоположную после начала утреннего улучшения показателя бодрствования (фронтальный либо затылочный TF при закрытых глазах или фронтальный TF либо TS при открытых глазах).

Если рассматривать индекс TAD (разница между оценками медленного тета- и быстрого альфа-ритмов), то видно, что он возрастает в ответ на воздействие лишения сна в обоих отведениях при закрытых глазах. В целом влияние продолжительного бодрствования более всего проявилось для фронтального TAD при закрытых глазах.

**Распределение во времени корреляций индексов ЭЭГ с субъективными оценками.** Индексы ЭЭГ наиболее коррелировали со значениями бодрствования (V и W) и запаздыванием (M и E). Под влиянием ли-

шения сна паттерны корреляций сменились на противоположные. Индекс TAD коррелировал со способностью бодрствовать (W + V) положительно для первой точки и отрицательно для двух последних измерений. Показатель дневного бодрствования (V) также показывал рост коэффициента корреляции с индексом AS, в то время как для утреннего запаздывания (M) он менялся в противоположном направлении.

Наибольшая корреляция самооценки состояния (KSS и VAS) с ЭЭГ-параметрами была отмечена после одной ночи лишения сна. Корреляция с индексами альфа-ритма была противоположна таковой с индексами тета-ритма и, следовательно, имела высокую значимость для индексов TAD.

В целом самооценки состояния и оценки личностных особенностей цикла сон — бодрствование лучше всего коррелировали с индексами ЭЭГ в тех временных точках, где был отмечен рост сонливости и потребности в сне.

**Взаимосвязи субъективных оценок с частотными характеристиками ЭЭГ.** На рис. 2 и 3 представлено более детальное рассмотрение взаимосвязей между

самооценками состояний и личностных черт с частотными характеристиками ЭЭГ. На большинстве графиков присутствует волнообразный паттерн. Он отражает

эффект замедления активности ЭЭГ в условиях лишения сна.

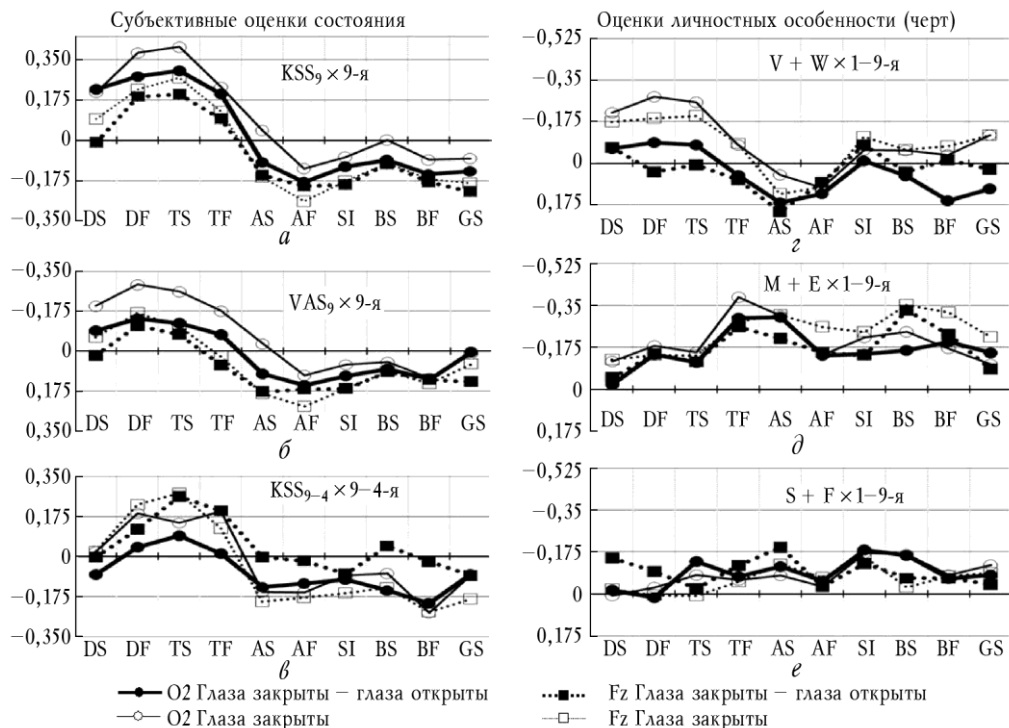


Рис. 2. Частотный профиль корреляции субъективных оценок с индексами ЭЭГ: V + W — способность бодрствовать в дневное и в любое время; M + E — утреннее и вечернее запаздывание; S + F — способность засыпать в ночное и в любое время; (1—9-я) — означает, что корреляции рассчитывались для разницы значений первого и девятого замеров

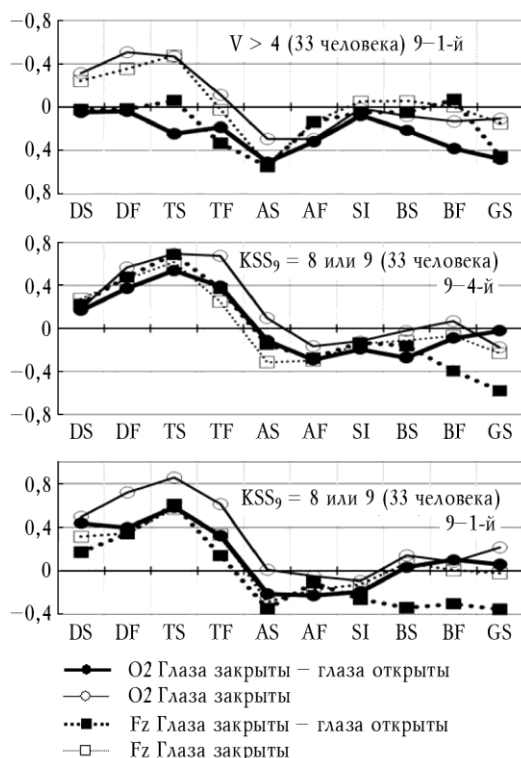


Рис. 3. Частотный профиль ЭЭГ после одной ночи без сна у испытуемых с крайними субъективными оценками состояния: значение для подвыборки субъектов определяется как отклонение от величины для всей выборки (126 человек); представлено отклонение различий между индентифицированными значениями мощности в 9-м и 1-м или 9-м и 4-м замерах

Эта тенденция прослеживается для показателей способности бодрствовать (рис. 2,з) и для всех самооценок состояния (рис. 2,а—в и рис. 3). Несколько отличный паттерн был выявлен для корреляций с величинами запаздывания (M + E) и способности засыпать (S + F) (рис. 2,з—е). Его характеризовало усиление мощности в альфа-, тета- и других частотных диапазонах.

Различие в паттернах может указывать на два явных эффекта лишения сна: замедление ЭЭГ происходит вследствие снижения уровня бодрости, который менее характерен для испытуемых с высокой способностью к бодрствованию, а однонаправленное повышение мощности ЭЭГ в широком диапазоне частот может быть отнесено на счет повышения потребности в сне у испытуемых с запаздыванием и у субъектов с высокой способностью к засыпанию.

**Изменение ЭЭГ индексов в ночное время по отношению к самооценке сонливости и индивидуальным особенностям цикла сон — бодрствование.** Для анализа данных (фронтальное отведение, закры-

тые глаза) был применен двухфакторный анализ ANOVA (главный фактор «подгруппа KSS в последней сессии, в 1—5-й, 6—7-й и 8—9-й» и повторная мера «ночное время, сессии с 6-й по 9-ю»), который выявил значимые взаимосвязи по всем тестируемым межиндивидуальным эффектам, пересечения (F = 11,78; df = 1; p < 0,001) и главного эффекта подгруппы (F = 9,43; df = 2; p < 0,001); внутрииндивидуальным эффектам, эффект ночного времени (F = 8,71; df = 3; p = 0,001) и эффект подгруппы по времени ночного взаимодействия (F = 3,99; df = 6; p = 0,001). Линейный тренд для этого взаимодействия был также значимым (F = 5,55; df = 2; p = 0,005). Результаты по шкале V (для низких, комбинированных и высоких значений) были также сходными (F = 9,04 и p = 0,003; F = 3,44 и p = 0,036; F = 7,55 и p < 0,001; F = 2,08 и p = 0,056; F = 3,81 и p = 0,025 для пересечения, подгруппы, ночного времени, эффекта взаимодействия и линейного тренда этого взаимодействия соответственно). Результаты теста ANOVA с затылочного отведения были сходными с результатами лобного отведения при закрытых глазах. Однако главный эффект подгруппы иногда оказывался не значимым.

Как ожидалось, изменения в ночное время контрастировали с началом ночи и с утром следующего дня, и, таким образом, выявлялись различия между ранними и поздними хронотипами как по значениям самооценки, так и по показателям ЭЭГ в добавление к уже упоминавшимся различиям между испытуемыми с высоким и низким бодрствованием в любое время.

В конечном счете можно выделить два различных эффекта — ограничения и депривации сна, регистрируемых на электроэнцефалограмме в состоянии бодрствования при закрытых глазах, которые наиболее отчетливо проявляются во фронтальных областях головного мозга. Рост мощности быстрого тета- и медленного альфа-ритма связан с повышением потребности во сне, в то время как увеличение активности медленного тета и снижение быстрого альфа связано с повышением сонливости. Это означает, что испытуемых можно дифференцировать по потребности в сне, однако они могут иметь сходную реакцию на возрастание накопленного желания спать. И наоборот, испытуемые могут различаться по чувствительности к лишению сна, но их нельзя различить по потребности в сне.

Рост активности в тета-диапазоне и снижение активности в диапазоне альфа-ритма, или, упрощенно,

замедление ЭЭГ, связаны с состоянием повышенной сонливости в период продолжительного бодрствования и с такой чертой, как способность бодрствовать в дневное время суток (трототип). Полученные результаты позволяют рассчитывать показатель замедления ЭЭГ как изменение индекса TAD от 4-го к 8-му, 9-му замерам. Замедление ЭЭГ количественно связано с ростом сонливости и с оценкой способности бодрствовать в дневное время суток. Испытуемые, у которых наблюдалось снижение уровня бодрости от состояния «очень бодр» к состоянию «очень сонлив» в течение эксперимента, и те, которые оценивали свое состояние от «очень сонлив» утром до «очень бодр» днем, также продемонстрировали более медленную ЭЭГ в состоянии «очень сонлив».

## Обсуждение

В научной литературе есть множество экспериментальных подтверждений существования индивидуальных вариаций чувствительности к депривации сна, имеющих устойчивый характер. Результаты данного исследования не ограничиваются подтверждением уже имеющихся наблюдений. Были выявлены два различных паттерна изменений в спектральной мощности ЭЭГ в ответ на лишение сна. Каждый из них, возможно, связан с одним из двух типов влияния депривации сна на регуляцию цикла сон — бодрствование, а именно с ростом потребности в сне и реакцией на лишение сна.

В научной литературе содержится множество указаний на то, что наилучшим объективным показателем увеличения потребности в сне или сонливости является мощность тета-ритма, в то время как альфа-ритм, несмотря на его преобладание в спектре ЭЭГ бодрствования, не получил четкой привязки к гомеостазу сна. Согласно С. Sajoche, D. Dijk [5], альфа-активность в состоянии бодрствования связана со стойкой циркадной регуляцией, и, таким образом, ее динамика может быть отнесена большей частью к циркадным процессам. Наоборот, активность в диапазоне 0,75—8,00 Гц не подвержена существенному влиянию циркадных фаз, и, таким образом, изменения в этом диапазоне могут быть связаны с процессами гомеостаза. Высокочастотный альфа-ритм предлагалось использовать как специфический маркер циркадного водителя бодрости [2]. Однако в литературе также есть множество наблюдений, говорящих о необходимости поиска в частотном диапазоне альфа-ритма

показателей гомеостатических изменений в накопленном желании спать или уровне бодрости.

Результаты настоящего исследования подтверждают все вышеперечисленные положения и вдобавок предоставляют объяснения, позволяющие рассматривать эти положения как не противоречащие друг другу, несмотря на отсутствие последовательно выделяемого паттерна взаимоотношений между ЭЭГ-активностью и самооценкой уровня бодрости.

Во-первых, разнообразие данных в литературе о влиянии лишения сна на альфа-активность может объясняться противоположным влиянием потребности в сне и восприимчивостью к лишению сна на мощность альфа-ритма в условиях лишения сна.

Во-вторых, можно предположить, что сходность взглядов на воздействие ограничения и лишения сна на тета-активность можно объяснить возрастанием мощности тета-ритма вследствие как растущей потребности в сне, так и ростом восприимчивости к лишению сна.

В-третьих, было показано, что взаимосвязь тета-активности с сонливостью и (или) потребностью в сне может менять свое направление в течение 24 ч бодрствования.

В-четвертых, существуют различные проявления взаимоотношений между ЭЭГ-активностью и потребностью в сне, а также с восприимчивостью к лишению сна в зависимости от зоны и условий регистрации ЭЭГ.

Было показано, что в целом данные, полученные с фронтальных областей, дают более достоверную информацию об уровнях и кинетике потребности в сне и сонливости. Это подтверждает вывод о том, что фронтальные области головного мозга — это регион, особенно чувствительный к лишению сна [9, 11]. Однако данные с затылочного отведения дают дополнительную информацию об устойчивости к депривации сна. Их можно использовать, например, для количественной оценки тенденции к инверсным отношениям спектральной мощности альфа-ритма при открытых глазах к снижению бодрости по сравнению с взаимоотношением, которое демонстрирует мощность альфа-ритма при закрытых глазах [15, 18].

## Заключение

Показано, что хронотип и трототип составляют большую часть индивидуальной изменчивости средних уровней и динамики электроэнцефалографических показателей сонливости и потребности во сне. Обнаруже-



но также две особенности изменения тета- и альфа-активности в ответ на лишение испытуемых ночного сна. Первая — «замедление ЭЭГ» — выражается в повышении спектральной мощности в диапазоне медленных тета-волн с одновременным снижением в диапазоне быстрой альфа-активности. Полученный на основании этого эффекта индекс может служить объективным показателем измерения способности бодрствовать в любое время (определение трототипа). Вторая — согласованное повышение спектральной мощности в диапазоне быстрой тета-активности и низкочастотной альфа-активности. Это одновременное увеличение мощности ЭЭГ в указанных диапазонах является, по мнению авторов, более адекватной оценкой увеличения потребности в сне, чем оценки, основанные на повышении мощности исключительно в диапазоне тета-ритма.

*Исследования выполнены при поддержке Российского гуманитарного научного фонда, грант № 06-06-00375а, и Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 07-06-00263а и 10-06-00114.*

#### Литература

1. Путилов А.А. Опросник для оценки индивидуальных особенностей цикла сон — бодрствование // Бюл. АМН СССР. 1990. № 1. С. 22—25.
2. Aeschbach D., Matthews J.R., Postolache T.T. et al. Two circadian rhythms in the human electroencephalogram during wakefulness // Am. J. Physiol. 1999. № 277. P. 1771—1779.
3. Borbély A.A., Achermann P. Sleep homeostasis and models of sleep regulation // Principles and Practice of Sleep Medicine / M.H. Kryger, T. Roth, W.C. Dement (Eds.). Philadelphia: Elsevier/Saunders. 2005. P. 405—417.
4. Borbély A.A., Baumann F., Brandeis D. et al. Electroencephalogram // Clin. Neurophysiol. 1981. № 51. P. 483—493.
5. Cajochen C., Dijk D.J. Electroencephalographic activity during wakefulness, rapid eye movement, and non-rapid-eye movement sleep in humans: comparison of their circadian and homeostatic modulation // Sleep and Biol. Rhythms. 2003. № 2. P. 85—95.
6. Cajochen C., Foy R., Dijk D.J. Frontal predominance of a relative increase in sleep delta and theta EEG activity after sleep loss in humans // Sleep Res. Online. 1999. № 2 (3). P. 65—69.
7. Finelli L.A., Baumann H., Borbély A.A., Achermann P. Dual electroencephalogram markers of human sleep homeostasis: correlation between theta activity in waking and slow-wave activity in sleep // Neuroscience. 2000. № 101. P. 523—529.
8. Gillberg M., Kecklund G., Akerstedt T. Relation between performance and subjective ratings of sleepiness during a night awake // Sleep. 1994. № 17. P. 236—241.
9. Horne J.A. Human sleep, sleep loss and behavior. Implications for the prefrontal cortex and psychiatric disorder // Br. J. Psychiatry. 1993. № 1632. P. 413—419.
10. Lavie P., Zvuluni A. The 24-hour sleep propensity function: experimental bases for somnology // Psychophysiol. 1992. № 29. P. 566—575.
11. Münch M., Knoblauch V., Blatter K. et al. The frontal predominance in human EEG delta activity after sleep loss decreases with age // Eur. J. Neurosci. 2004. № 20. P. 1402—1410.
12. Putilov A. A. Association of morning and evening lateness with self-scored health: Late to bed and early to rise makes a man healthy in his own eyes // Biol. Rhythm Res. 2008. № 39(4). P. 321—333.
13. Putilov A.A., Verevkin E.G., Ivanova E., Donskaya O.G., Putilov D.A. Gender differences in morning and evening lateness // Biol. Rhythm Res. 2008. № 39 (4). P. 335—348.
14. Putilov A.A. Introduction of the tetra-circumplex criterion for comparison of the actual and theoretical structures of the sleep-wake adaptability // Biol. Rhythm Res. 2007. № 38. P. 65—84.
15. Putilov D.A., Verevkin E.G., Donskaya O.G., Putilov A.A. Segmental structure of alpha waves in sleep-deprived subjects // Somnologie. 2007. № 11 (3). P. 202—210.
16. Van Dongen H.P.A., Dinges D.F. Modeling the effects of sleep debt: On the relevance of inter-individual differences // SRS Bulletin. 2001. № 7 (3). P. 69—72.
17. Van Dongen H.P.A., Vitellaro K.M., Dinges D.F. Individual differences in adult human sleep and wakefulness: Leitmotif for a research agenda // Sleep. 2005. 28(4). P. 479—496.
18. Verevkin E., Putilov D., Donskaya O., Putilov A. A new SWPAQ's scale predicts the effects of sleep deprivation on segmental structure of alpha waves // Biol. Rhythm Res. 2008. № 39 (1). P. 21—37.

Поступила в редакцию 08.12.2009 г.

Утверждена к печати 22.12.2009 г.

#### Сведения об авторах

**А.А. Путилов** — д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математического моделирования биомедицинских систем НИИ молекулярной биологии и биофизики (г. Новосибирск).

**О.Г. Донская** — научный сотрудник лаборатории математического моделирования биомедицинских систем НИИ молекулярной биологии и биофизики (г. Новосибирск).

**Е.Г. Верёвкин** — канд. биол. наук, руководитель лаборатории математического моделирования биомедицинских систем НИИ молекулярной биологии и биофизики (г. Новосибирск).

**Д.А. Путилов** — аспирант лаборатории математического моделирования биомедицинских систем НИИ молекулярной биологии и биофизики (г. Новосибирск).

#### Для корреспонденции

*Путилов А.А., Донская О.Г., Верёвкин Е.Г., Путилов Д.А. Изучение пространственно-временной структуры ЭЭГ активности*

*Путилов Аркадий Александрович*, тел. (383) 335-97-56, e-mail: [putilov@ngs.ru](mailto:putilov@ngs.ru)