

УДК: 612.821:612.822.3:616.8

© 1998 г. А.Я. КАПЛАН

**НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ ЭЭГ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ**

Московский университет им. М.В. Ломоносова, Москва

В обзоре рассмотрены концептуальные, методологические и методические аспекты проблемы устойчивости количественных оценок ЭЭГ человека во времени. На основе имеющихся в литературе и собственных данных подтверждается необходимость рассматривать ЭЭГ как кусочно-стационарный процесс. Анализируются основные методические подходы к статистическому описанию нестационарной ЭЭГ в терминах квази-стационарных сегментов. Особое внимание уделяется данным сегментной структурированности коркового биоэлектрического поля. С учетом собственных экспериментальных данных о временной согласованности сегментных описаний региональных ЭЭГ предлагается концепция "операциональной синхронности" как формы дискретного сопряжения корковых процессов. Обсуждаются возможные теоретические основания феноменологии кусочно-стационарного функционирования нейронных сетей. **Ключевые слова:** ЭЭГ, стационарность, сегментация, синхронность, когерентность

Введение

"One of the most elementary areas of our ignorance of the EEG is its fine structure in the fractional millimeter and fractional second domains".

Т.Н. Bullock et al. 1992. [49]

На очередном своем заседании 12 мая 1934 года члены физиологического общества в Кембридже были весьма заинтригованы представленными им на закопченной ленте кимографа кривыми электрических колебаний мозга двух здоровых испытуемых. К этому времени уже в течение шести лет одна за другой появлялись в печати работы австрийского психиатра Ганса Бергера, в которых была показана не только сама возможность регистрации биотоков мозга непосредственно с кожной поверхности головы или электроэнцефалограммы (ЭЭГ), но и отмечались существенные изменения ЭЭГ в динамике генерализованных функциональных состояний мозга [41].

Удивительным в данных новой группы исследователей из Великобритании было то, что демонстрируемые ими ЭЭГ двух испытуемых принципиальным образом различались между собой, хотя эти добровольцы не страдали какими-либо мозговыми дисфункциями и во время опыта находились в одном и том же слегка расслабленном бодрствующем состоянии с закрытыми глазами. В полной адекватности молодых жизнерадостных испытуемых члены физиологического общества могли убедиться воочию, поскольку докладчиками и были сами испытуемые - Adrian и Matthews. Между тем у одного из них кривая ЭЭГ содержала высоко амплитудный бергеровский альфа-ритм, а у другого - только "нерегулярные" быстрые колебания [41]. Но насколько стабильными были различия ЭЭГ Адриана и Мэттьюза? Оказалось, что

авторы провели многократные тестирования и никакими усилиями не удавалось вызвать альфа-ритмику у Мэттьюза, в то время как Эдриану достаточно было закрыть глаза и перо самописца зашкаливало от высоко амплитудных почти синусоидальных колебаний ЭЭГ [41].

Спустя 35 лет, когда ЭЭГ-лаборатории уже повсеместно стали обязательным атрибутом неврологических клиник, один из корифеев в этой области Грей Уолтер вынужден был заметить, что он не знает иного объяснения существованию альфа-ритмичных людей, как только слишком медленное исчезновение своеобразного атавистического признака - выраженной альфа-активности мозга [107]. Альфа-ритмичные исследователи ЭЭГ могут простить Г. Уолтеру этот пассаж, особенно после признания в том, что его собственный мозг "ни разу не сгенерировал ни одной альфа-волны" [107].

История открытия альфа-ритмики и все еще неослабевающая дискуссия о ее механизмах и функциональном предназначении не является собственно предметом настоящей статьи. Этому посвящены ряд достаточно полных обзоров [16, 45, 107 и др.]. Однако, именно с обсуждения вопроса о межиндивидуальных различиях в выраженности альфа-колебаний как наиболее заметной особенности ЭЭГ, с первых попыток оценить устойчивость этих различий началась совсем другая история - о природе внутрииндивидуальной изменчивости ЭЭГ. Той самой "случайной" вариативности оцениваемого параметра, против которой работает мощнейший аппарат современных методов математической статистики, для получения робастных оценок усредненных параметров ЭЭГ-сигнала [106,72].

В поисках логического оправдания этой истории в настоящем сообщении рассматривается современное состояние проблемы нестационарной динамики ЭЭГ человека и обсуждается концепция дискретной операциональной организации деятельности корковых структур как теоретической основы для понимания их пространственно-временной интеграции.

1. Постановка проблемы о природе изменчивости спонтанной ЭЭГ

В рамках проблемы изменчивости спонтанной ЭЭГ прежде всего было очень важно установить в какой мере особенности ЭЭГ определяются генетически предопределенной структурной и биохимической организацией мозга, с одной стороны, и порожденным в ходе индивидуального развития психическим "содержанием" мозга, - с другой. В многочисленных генетико-физиологических исследованиях [см. обзоры: 53, 109, 126] было показано весьма значительное сходство основных спектрально-корреляционных показателей ЭЭГ у монозиготных близнецов различных возрастных групп, причем даже в тех случаях, когда близнецы одной и той же пары воспитывались в разных социальных условиях. Дизиготные близнецы в этих исследованиях показали лишь небольшое преимущество в сходстве по ЭЭГ показателям в сравнении с разновозрастными детьми одних и тех же родителей [59].

Некоторые исследователи приходят к выводу о том, что тотальные спектральные паттерны спонтанной ЭЭГ у человека практически полностью детерминированы генетическими факторами [133]. Данные близнецовых и онтогенетических исследований являются важнейшим и наименее противоречивым указанием на то, что несмотря на суммарный характер ЭЭГ, когда в едином потенциале на регистрирующем электроде объединяется электрическая активность многих сотен тысяч и миллионов нейронов [13, 29], ЭЭГ-сигнал безусловно отражает индивидуальные особенности базовой архитектоники центральной нервной системы и "дополнительно" отслеживает онтогенетическую динамику гетерохронно созревающих локальных нейронных сетей [34].

Появляются данные и о стабильных индивидуальных особенностях ЭЭГ в связи с гормональным статусом человека, например, в овуляционном цикле у женщин [87], в направленности сексуальной ориентации у мужчин [42], или искусственно создаваемом при системном введении гормональных веществ [138].

Наконец, тотальная перестройка функционирования нейросетей при действии нейротропных средств разных классов (нейролептики, психостимуляторы, антидепрессанты и др.) также проявляется в специфических спектральных паттернах ЭЭГ [64, 70, 73, 85].

Все эти факты свидетельствуют о высокой чувствительности параметров суммарной ЭЭГ к вариациям схемы межнейронных отношений в ЦНС как в связи с генетическим детерминированием, так и с траекториями онтогенетического развития. Тем удивительнее оказывается безуспешность многочисленных попыток установить связи между индивидуальными особенностями ЭЭГ здоровых людей и актуализированными характеристиками их психической деятельности [16, 45, 107]. Достаточно противоречивы и результаты работ, связанных с поиском ЭЭГ-признаков неадекватной психической деятельности, например, при таких ярко выраженных психических расстройствах, как шизофрения [80].

Можно предположить, что трудности ЭЭГ идентификации психических процессов в немалой степени связаны с необходимой для получения статистически устойчивых оценок высокой степенью усреднения параметров ЭЭГ сигнала. В картинах усредненных ЭЭГ оценок проявляются, таким образом, только наиболее инерционные структурные особенности нейросетей, которые в гораздо большей степени привязаны к индивидуальным генетическим детерминантам, чем разыгрывающиеся на этих структурах быстротечные информационные процессы. Это означает, что если в ЭЭГ и отражаются инварианты психической деятельности, то они скрыты в высоко динамичных перестройках ЭЭГ активности, которые теряются в рутинных процедурах статистического анализа.

Действительно, с развитием средств математического анализа ЭЭГ стало совершенно очевидным, что заимствованные преимущественно из статистической радиопизики и широко используемые физиологами в научной работе методы спектрально-корреляционного анализа, если и применимы к ЭЭГ, то лишь с существенными допущениями. Главное из них - это требование однородности или стационарности ЭЭГ процесса на участке оценивания [2, 117].

2. Нестационарная ЭЭГ: основные определения и результаты статистического оценивания

В самом общем виде допускается существование двух типов нестационарностей в ЭЭГ: так называемые переходные нестационарности (*transient types of nonstationarity*) и чередование периодов относительной стабилизации ЭЭГ (*more prolonged changes of state*) на разных уровнях характеристических параметров [98].

Исторически долгое время основное внимание уделялось нестационарностям первого типа, таким как спайки, пик-волны, К-комплексы, наиболее потогномичным в отношении целого ряда мозговых дисфункций [98, 99]. В настоящем сообщении проблема нестационарной ЭЭГ рассматривается с точки зрения кусочно-стационарной ее структуры, отражающей, по-видимому, базовую динамику собственно информационной деятельности мозга.

Обычно исследователи сталкиваются с проблемой нестационарности или вариативности ЭЭГ при оценивании статистической значимости спектральных перестроек ЭЭГ в ответ на экспериментальные воздействия. Однако специальному анализу вариативности ЭЭГ посвящено совсем немного исследований. В одной из первых работ такого рода было показано, что коэффициент вариации абсолютной спектральной мощности ЭЭГ, например по альфа ритму, составляет в среднем 31% при оценивании по 9-ти участкам биполярной ЭЭГ, длительностью 5 с [101]. Самые низкие оценки вариации показаны для бета-активности - 11-15% [102]. Если же для тестирования выбирались очень короткие сегменты ЭЭГ - до 1 с, то коэффициент вариации возрастал до 100% [61].

В более полном исследовании на 25 испытуемых в среднем для 14 биполярных или

униполярных отведений ЭЭГ по 20-30-ти четырехсекундным эпохам ЭЭГ была получена оценка коэффициента вариации абсолютной спектральной мощности для альфа-диапазона равная 50% при достаточно низкой вариации в 3% средней и пиковой частоты спектра [112]. Позднее эти авторы заметили, что вариация параметров для последовательных коротких сегментов ЭЭГ существенно ниже и не коррелирует с аналогичными оценками для сегментов, взятых с большими временными промежутками [123]. Этот факт свидетельствует о существовании нескольких независимых источников вариации ЭЭГ, рассматриваемой в разных масштабах времени.

Действительно, значительные возмущения в спонтанной ЭЭГ происходят, например, в связи с циклом сон-бодрствование. Свой вклад в вариацию ЭЭГ вносят известные циркадные, гормональные, температурные и другие колебания функционального состояния человека, имеющие различные периоды - от суток до 1-2-х минут и хорошо прослеживаемые, например в ритме сердцебиений [17]. Соответственно этому и в зависимости от выбранного периода наблюдения можно рассматривать вариативность ЭЭГ в разных временных шкалах, определяя в связи с этим типы кусочно-стационарной вариативности как быстрый и медленный [62].

Приведенные количественные характеристики изменчивости ЭЭГ получены, однако, без каких-либо предположений о статистической природе ЭЭГ-сигнала и потому трудно интерпретируемы в строгих терминах именно статистического оценивания.

В 50-х годах в научный обиход было впервые введено представление об ЭЭГ как о случайном процессе [11], ставшее базовым допущением для большинства современных методов анализа ЭЭГ [57, 99]. Эта метафора касается, конечно, только математического описания ЭЭГ-сигнала, а не реальной картины его биофизического генеза. Здесь только предполагается, что особенности ЭЭГ-сигнала как продукта очень сложной системы наиболее адекватным образом могут быть описаны в терминах математической статистики.

В первых работах, посвященных анализу статистических свойств ЭЭГ как стохастического процесса, было показано, что распределение амплитудных значений ЭЭГ соответствует гауссовским параметрам [97, 91, 124]. Это очень важное заключение для понимания природы суммарной ЭЭГ. В соответствии с центральной предельной теоремой гауссовские свойства ЭЭГ можно было бы объяснить взаимной независимостью индивидуальных источников (генераторов) коркового электрического поля [60], что разрешало бы в полной мере применение параметрических методов математической статистики к анализу ЭЭГ-сигнала и существенно упрощало бы его содержательные трактовки. Однако, ряд авторов не подтвердил гауссовскую структуру ЭЭГ [128, 137, 52]. Причина столь явных противоречий в основном была связана с тем, что для тестирования авторы использовали фрагменты ЭЭГ разной длительности. Короткие сегменты ЭЭГ, до 10 с, как правило хорошо аппроксимировались гауссовским распределением, а более длинные - до 1 мин, обычно не подчинялись нормальному закону. Можно было предположить, что более продолжительные записи ЭЭГ отличались тем, что были составлены из отдельных фрагментов, каждый из которых аппроксимировался своим законом нормального распределения, а в совокупности - распределение естественно оказывалось не нормальным [60].

Позднее были получены конкретные данные о зависимости между соответствием гауссовскому распределению и длиной участка оценивания ЭЭГ [104]. Оказалось, что при увеличении длительности ЭЭГ от 4-х до 64-х секунд количество участков соответствующих гауссовскому распределению снижалось от 90 до 20% при дискретизации ЭЭГ-сигнала на частоте Найквиста [104].

Итак, в попытках оценить базовые статистические параметры ЭЭГ исследователи в явном виде столкнулись с проблемой, когда свойства даже одно-двух минутного фрагмента ЭЭГ не соответствуют свойствам составляющих этот фрагмент коротких участков ЭЭГ записи. Следовательно, суммарные оценки для неоднородного фраг-

мента ЭЭГ не могут адекватно отражать содержания нервной деятельности на анализируемом интервале. Только стационарные участки ЭЭГ-сигнала могут быть подвергнуты обычному статистическому анализу. В этой связи потребовалось определить и само понятие стационарности в отношении к ЭЭГ.

В узком смысле этому понятию соответствуют такие процессы, основные моменты и-мерного распределения которых остаются неизменными во времени [2, 117] при любых n , где « n » — число последовательных отсчетов ЭЭГ на участке оценивания. Теоретически каждый такой отсчет имеет свое распределение, которое проявляется при многократных реализациях тестируемого процесса, генерирующих целый ансамбль значений для каждого отсчета. Однако на практике для отслеживания стационарности динамического процесса обычно достаточно контролировать постоянство во времени математического ожидания, дисперсии и параметров корреляционной функции для одномерного распределения значений по каждому отсчету этого процесса. В этом случае можно говорить о стационарности **в широком смысле** [32, 54]. В частном случае, когда одинаково нормальными оказываются все n распределений данного процесса — этот процесс называется **гауссовским**.

Тем не менее обычно исследователь не имеет возможности набрать достаточное число синхронных реализаций ЭЭГ для оценивания статистических моментов по ансамблю реализаций каждого отсчета. Остается надеяться, что ЭЭГ является так называемым **эргодическим** процессом, когда статистические оценки, усредненные по ансамблям реализаций каждого отсчета совпадают с соответствующими оценками, усредненными по последовательным отсчетам во времени однократной реализации [62]. Достаточным условием эргодичности процесса является стремление к нулю модуля функции автокорреляции при увеличении временного сдвига [2, 117], что обычно характерно для ЭЭГ-сигнала. При этом условии основные характеристические параметры ЭЭГ-сигнала можно вычислить по совокупности последовательных отсчетов только одной, но достаточно представительной реализации [62].

Оценивая подобным образом участки ЭЭГ различной длительности Макэвен и Андерсон показали, что гауссовость и стационарность соблюдаются одновременно лишь для 15-20% участков ЭЭГ записи длительностью по 16 с каждый, а при уменьшении продолжительности этих участков до 4-х секунд указанные условия выполняются для 70-80% записи ЭЭГ [104]. Если же не учитывать свойство гауссовости, то можно говорить о стационарности **в широком смысле**. Этому критерию отвечают до 70-80% 16-ти сек участков ЭЭГ и до 95% участков ЭЭГ, длительностью менее 4 с [104]. Таким образом, главный вывод серии работ, посвященных рутинному статистическому анализу ЭЭГ как стохастического процесса состоит в том, что ЭЭГ-сигнал на обычных интервалах оценивания в десятки секунд и минуты является явно нестационарным процессом, тогда как значительная доля коротких участков ЭЭГ, в пределах 2—4 с, все же обладает свойством стационарности.

Статистическая неоднородность ЭЭГ сигнала заставляет исследователей с большой осторожностью относиться к содержательным интерпретациям суммарных фазово-частотных характеристик. Пользователи систем картирования ЭЭГ хорошо знают, что, как правило, усредненная на 1-2-х минутной записи карта корковых электрических потенциалов может иметь мало общего с последовательными картами, построенными для более дробных участков этой записи [114].

Даже для наиболее генерализованных реакций коркового электрического поля, например при реакции десинхронизации ЭЭГ в ответ на предъявление структурированного зрительного стимула, за хорошо выраженной картиной трансформации усредненного в пределах 1 мин частотного спектра скрываются разнородные спектральные перестройки на коротких интервалах оценивания [20]. Оказалось, что усредненная спектральная картина десинхронизации складывается за счет статистически значимых однонаправленных изменений спектра всего для 15-40% 2-х секундных участков ЭЭГ. Следовательно, большинство коротких участков ЭЭГ на фоне ее тотальной десинхронизации либо вовсе не меняют свой спектр относительно

фона, либо имеют даже противоположные основной тенденции спектральные сдвиги [20].

В своей совокупности подобные факты свидетельствуют о том, что динамическая картина ЭЭГ процесса становится отчетливой только при рассмотрении достаточно коротких его сегментов. Это побудило исследователей к разработке специализированных методов сегментации ЭЭГ.

3. Сегментное описание ЭЭГ как базовый подход к структурно-функциональному анализу электрической активности мозга

Существует довольно ограниченный набор методов так называемой сегментации ЭЭГ-сигнала на квазистационарные фрагменты. Подробный обзор этих методов дан в другой нашей работе [21], а также в работах [44, 78]. Здесь же остановимся только на некоторых методологических аспектах процедуры поиска границ между квазистационарными сегментами анализируемой ЭЭГ записи.

В 1977 г. Боденштайн и Преториус предложили обобщенную концепцию структуры ЭЭГ [47], согласно которой ЭЭГ-сигнал состоит из практически стационарных сегментов, "соединенных" быстрыми переходными процессами. Наиболее распространенным подходом к автоматическому выделению подобных квазистационарных сегментов ЭЭГ является так называемая адаптивная сегментация [47, 74]. Основное содержание этого подхода состоит в том, что на начальном участке ЭЭГ строится его математическая модель, например авторегрессионная, параметры которой затем сравниваются в движущемся окне с последующими участками ЭЭГ с непрерывным оцениванием ошибки рассогласования. Момент превышения определенного порога ошибки рассогласования принимается за границу между квази-стационарными сегментами. На начальном участке следующего участка ЭЭГ строится адекватная именно этому участку новая модель и поиск следующей межсегментной границы происходит уже на основе этой модели. Таким образом, по всей длине анализируемой записи ЭЭГ расставляются границы между квазистационарными сегментами. Последующая классификация этих сегментов по спектрально-корреляционным признакам завершает кусочно-стационарное описание ЭЭГ [47,76].

Параметрические методы сегментирования далеко не всегда адекватны анализируемому сигналу, поскольку, как правило, нестационарные свойства этого сигнала не позволяют построить достаточно надежную его математическую модель.

Новая технология так называемой непараметрической сегментации ЭЭГ, не требующая предварительного построения модели ЭЭГ процесса, была разработана на основе теории обнаружения так называемых разладок во временных рядах, имеющих четко выраженную кусочно-стационарную структуру [38, 48, 86]. Применение технологии непараметрического сегментирования ЭЭГ, впервые позволило не только надежно обнаруживать границы сегментов, но и оценивать доверительные интервалы позиционирования этих границ в рамках тестируемого фрагмента ЭЭГ. Более подробно алгоритм непараметрического сегментирования ЭЭГ изложен в специальных публикациях [9, 38].

В многочисленных исследованиях с применением сегментации ЭЭГ было обнаружено [см. обзоры: 21, 44], что ЭЭГ действительно состоит из относительно стационарных сегментов, длительность основной массы которых по данным разных авторов варьирует в пределах от 0,2 до 10—12 секунд. Остается, правда, не ясным насколько велико паттерновое разнообразие этих сегментов, но их классификация по спектральным характеристикам показывает существование достаточно компактного, в пределах нескольких десятков, набора типовых сегментов [7, 43, 44,47, 55, 75].

Главным концептуальным достижением сегментационного подхода является неожиданно открывшаяся исследователям довольно четкая временная структурированность ЭЭГ, гораздо более тонкая, чем обычные генерализованные перестройки ритмических компонентов, типа синхронизации-десинхронизации. Высказанное еще

Ремондом [119] предположение об организации ЭЭГ сигнала из ограниченного набора элементарных паттернов, по-видимому, нашло свое подтверждение в кусочно-стационарной структурированности ЭЭГ. Каждый стационарный участок ЭЭГ, возможно, и является метастабильным функциональным модулем ЭЭГ активности, обладающем индивидуальным паттерном характеризующих его оценок, например спектральных.

В то же время постулируемая некоторыми авторами возможность существования единого популяционного алфавита спектральных ЭЭГ-паттернов [8, 122] представляется неоправданной редукцией основной идеи о структурированности ЭЭГ, если, конечно, не ограничиваться несколькими хорошо известными паттернами типа синхронизации, десинхронизации, медленноволновой ритмики и некоторых других феноменов, отражающих скорее генерализованные состояния мозга, чем микроструктурную динамику информационных процессов. Одинаковые информационные модули мозговой активности в силу своей значительной распределенности могут быть инвариантными только по содержанию [5], но не по реализующей их сиюминутной нейроархитектонике и, тем более - не по форме когерентных им суммарных биопотенциалов. В силу этого обстоятельства у каждого индивидуума может быть своя семантическая "кодификация" паттернов ЭЭГ. Об этом свидетельствуют результаты первых же попыток найти единые признаки ЭЭГ для дискриминации некоторых состояний сознания [134]. Оказалось, что даже всего для четырех альфа-ритмичных испытуемых трудно подобрать единую дискриминирующую функцию для различения нескольких функциональных состояний, тогда как для испытуемых по отдельности надежная дискриминация оказалась возможной, причем при меньшем числе учитываемых параметров ЭЭГ [134].

По-видимому, в пределах небольшого времени оценивания индивидуальной ЭЭГ динамика внутримозговых информационных процессов может проявляться в перестройке пакетов относительно стабильных паттернов корковой электрической активности. Так процентное соотношение всего нескольких типов стационарных участков (из 24-х паттернов общего набора) на 30-секундных фрагментах ЭЭГ позволяет достаточно эффективно классифицировать стадии ночного сна [76]. Тем не менее частотные параметры представленности тех или иных паттернов в данном фрагменте ЭЭГ, очевидно, лишь в первом приближении могут характеризовать содержательную сторону сегментной организации ЭЭГ. Внутренняя логика этой организации, по-видимому, скрыта в закономерностях последовательных сочетаний отдельных паттернов ЭЭГ. Вполне возможно, что определенные последовательности из нескольких ЭЭГ-паттернов выступают в устойчивой связке друг с другом, формируя более интегрированные блоки структурной организации ЭЭГ, как выстраиваются в слова буквы фонетического алфавита. Подобная синтаксическая метафора по мнению ряда авторов наиболее перспективна для содержательной интерпретации ЭЭГ-феноменов [99, 69, 125]. В рамках этой метафоры процедуру сегментирования ЭЭГ на паттерны следовало бы надстроить последующим ее секвенированием на синтаксические блоки паттернов.

Эффект перехода от паттернового сегментирования к синтаксическому секвенированию при анализе ЭЭГ был бы ничуть не меньшим эффекта проявления слов в единой буквенной последовательности при анализе текстов. Реальное воплощение методологии секвенирования ЭЭГ потребовало бы, однако, неких предварительных сведений о правилах построения паттерновых блоков, или иначе - знания самой грамматики ЭЭГ. Вполне возможно, что на этом пути исследователи ЭЭГ подошли бы и к построению из первичных паттерновых блоков целых синтаксических фреймов или фраз [84].

В поисках этой "грамматики" некоторые авторы действительно находят в ЭЭГ устойчивые сочетания элементарных паттернов [4, 7, 69], правда, они используют для этого скорее эмпирические критерии, чем надежно обоснованные статистические оценки. Единственно адекватным здесь методом анализа было бы вычисление матриц

переходной вероятности в цепочке дискретных паттернов ЭЭГ, если представлять эту последовательность как марковский процесс [47, 122, 77]. На этом пути исследователи впервые столкнулись с проблемой оценки стационарности макро описания ЭЭГ, когда в качестве оцениваемого параметра выступает уже не динамическая, а структурная характеристика ЭЭГ, некоторое "правило порядка" [35, с. 346], например, - матрица переходных вероятностей типовых паттернов ЭЭГ. Чтобы заполнить эту матрицу оценками относительной частоты всех возможных вариантов сегментных комбинаций, да еще с достаточным для получения робастных оценок количеством повторных испытаний, требуется настолько длинный фрагмент ЭЭГ, что сами собой отпадают всякие предположения о возможном постоянстве сегментных сочетаний на этом фрагменте.

Однако идея синтаксического анализа ЭЭГ оказалась слишком заманчивой, чтобы так легко с ней расстаться. Янсен предложил существенно загрузить процедуру сегментации ЭЭГ, ограничив ее структурное разнообразие всего тремя типами паттернов [77]. В этом частном случае автору удалось получить достаточно представительные переходные матрицы, которые позволили дифференцировать, например, довольно трудно различимые обычными методами анализа фоновые ЭЭГ в норме и в предсудорожный период [77]. Эти данные свидетельствуют о принципиальной иерархичности модульной организации ЭЭГ, когда стабилизирующими процессами охватываются не только параметры ЭЭГ на квазистационарных участках, но и закономерности следования этих участков.

В рамках этой метафоры идеология сегментного описания ЭЭГ получает иерархическое расширение - можно было бы надстроить процедуру сегментирования ЭЭГ последующим "секвенированием" сигнала на макромодули, те, в свою очередь, на семантические фреймы и т.д.

4. Временная синхронность основных ритмов кусочно-стационарной электроэнцефалограммы

Итак структурная информация об организации ЭЭГ сигнала совершенно необходима не только для адекватного оценивания основных его статистических характеристик, но, что само главное, — для того чтобы в пункте сегментного описания ЭЭГ сигнала распознать контуры "внутренней" динамики нервной деятельности. Логика подобной интраспекции операциональной архитектоники мозга, однако, существенно осложняется одним очевидным обстоятельством: распределение энергий суммарного ЭЭГ-сигнала неоднородно в частотной области. Поэтому каждый частотный компонент суммарной ЭЭГ потенциально может обладать своей собственной сегментной структурой.

Действительно, полифоническая метафора ЭЭГ со времени появления первых ЭЭГ исследований [41] стала основным концептуальным инструментом для анализа электрической активности мозга [111] именно в силу диссоциативного характера поликомпонентного спектра ЭЭГ [120].

Анализ факторной структуры частотного спектра ЭЭГ действительно показал существование ортогональных частотных пакетов, правда, по-разному группирующихся при различных функциональных нагрузках и патологиях [см. обзоры: 22, 70, 100]. Это позволяло исследователям надеяться, что при адекватном выборе частотных компонентов суммарной ЭЭГ последние могут служить маркерами активации достаточно определенных морфо-функциональных мозговых систем.

В многочисленных исследованиях было показано, что в специфических спектральных паттернах ЭЭГ отражаются не только генерализованные состояния человека, такие как сон и бодрствование или неврологические патологии типа болезни Альцгеймера, сенильной деменции, паркинсонизма [56, 108, 130], но и достаточно тонкие сдвиги функционального состояния мозга, связанные с решением когнитивных задач [14, 24, 63, 67] или с действием нейротропных лекарственных препаратов [70, 73, 132].

Таким образом, операциональная логика развертывания функциональных систем мозга при реализации поведенческих или психических актов в общем виде предполагает, что на уровне ЭЭГ последовательные операции нервной деятельности могут быть прослежены в палитре сегментных описаний динамики соответствующих ритмических компонентов суммарной ЭЭГ.

Исследование ЭЭГ в узкой полосе 7,5—12,5 Гц с применением техники сегментирования [38] показало, что характеристики сегментного описания альфа-активности определяются не только уровнем генерализованной активации, но и типом когнитивной нагрузки, и даже некоторыми личностными особенностями испытуемых [39]. Подобная сегментированность присуща и другим компонентам спектра ЭЭГ [19].

Однако, в подобной раздельной сегментированности ЭЭГ сигнала по отдельным частотным компонентам не может не отражаться интегрированные по своей сути акты нервной деятельности. Последовательности сегментов каждой из частотных составляющих ЭЭГ-сигнала должны быть определенным образом согласованы или синхронизованы между собой. Подобная операциональная синхронизация (в отличие от фазово-частотной) между отдельными ритмами одного и того же ЭЭГ-сигнала действительно была обнаружена в исследовании на здоровых испытуемых в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами [19]. При этом особенности поличастотного паттерна операциональной синхронизации ЭЭГ, т.е. совокупность оценок этого типа синхронизации для всех пар частотных компонентов, были специфическим образом связаны с областью регистрации ЭЭГ [19].

Таким образом, за рутинной статистической нестационарностью ЭЭГ-сигнала скрывается сегментная структурированность его спектральных компонентов, объединенных в синхронизованные по границам квазистационарных сегментов межчастотные операциональные модули.

5. Мультиканальная сегментация ЭЭГ

В пионерской работе Боденштайна и Преториуса [47] были изложены, пожалуй, все основные идеи кусочно-стационарного подхода к анализу ЭЭГ, от собственно процедур обнаружения устойчивых сегментов ЭЭГ до их последующей классификации, надолго определившие направления исследований в этой области. Была в этой работе еще одна идея, которая, однако, не получила дальнейшего развития. Авторы рассмотрели обобщение сегментного подхода на случай многоканальной записи ЭЭГ. При этом возможно было два пути анализа данных: поиск единых сегментов для всех каналов или просто рассмотрение сегментной структуры каждого из каналов по отдельности с последующим сопоставлением. Как отмечали сами авторы, первый путь позволил бы дополнительно "определять функции когерентности между каналами". Удивительно, но Боденштайн и Преториус отвергли первый путь в силу крайне спорных причин: поскольку этот путь "потребовал бы больше вычислений" и потому что "когерентность между каналами несущественна для диагностических целей". Авторитет этих исследователей, видимо, был настолько высок, что к идее о сегментировании многоканальной ЭЭГ более уже не возвращались вплоть до работ автора настоящего сообщения (см. раздел 7).

Между тем, первые же многоканальные регистрации ЭЭГ [см. обзоры: 36, 37, 71] показали, что пространственная совокупность корковых потенциалов скорей всего является дискретным описанием единого биопотенциального поля коры головного мозга. Позднее, правда, выяснилось, что этому полю присуща достаточно сложная метрика [ПО и др.], но методологически более важным является вытекающее из "полевых" концепций ЭЭГ следствие о значительной "связности" региональных корковых потенциалов. Об этом свидетельствовали и результаты применения к многоканальной ЭЭГ техники нелинейнодинамического анализа, модифицированной таким образом, что компонентами вектора траектории "сложной системы" выступали

оценки одномоментного съема многоканальной ЭЭГ. Оказалось, что поведение траектории многоканальной ЭЭГ характеризуется малым числом степеней свободы, т.е. теоретически может быть продуктом сильно интегрированной системы [58, 103]. Поэтому следующим шагом в этом направлении вполне естественно было выяснить, насколько континуальна пространственная карта ЭЭГ во времени: существуют ли периоды стабилизации этой карты или она находится в перманентном движении?

Изучая последовательные карты распределения корковых потенциалов, Д. Леман [92] первым заметил, что некоторые конфигурации этих карт, отличающиеся наличием четко выраженного максимума и минимума потенциала на корковой поверхности, действительно стабилизируются в пределах небольших интервалов времени. Это наблюдение, сделанное еще до работ Боденштайна, навело автора на мысль о сегментной организации самого поля биопотенциалов. В последующих работах Леман предложил изящную технику сегментации пространственных карт ЭЭГ, основанную на мониторинге координат двумерного позиционирования вектора максимальной разности потенциалов между точками корковой поверхности [93]. Оказалось, что калейдоскопическая мозаика пространственных карт ЭЭГ как правило описывается небольшим числом типовых паттернов, период стабилизации которых может варьировать от 50 до 2560 мс, но для 75% не превышает 508 мс, составляя в среднем 210—250 мс [94, 95], а переходы между ними совершаются скачком. Среди возможных дискретных "состояний" карты ЭЭГ по признаку максимальной разности локальных потенциалов, в реальной деятельности мозга "используются" не более половины, причем 32% из них принадлежат только двум пространственным паттернам ЭЭГ [94]. Эти паттерны несомненно отражают специфические устойчивые функциональные состояния мозга, так как, например, оценки времени реакции испытуемых на фоне разных стабильных паттернов карты ЭЭГ существенно различались [93]. Более того, конкретные параметры "времени жизни" и относительной частоты появления каждого из типовых паттернов карты ЭЭГ оказались специфическим образом связанными не только, например, с характером состояния бодрствования (открытые или закрытые глаза), но и с некоторыми очень трудно диагностируемыми по ЭЭГ психиатрическими патологиями [95, 96, 105, 127], а также - с действием нейротропных препаратов [88]. Наконец, в пространственно-временных характеристиках дискретных паттернов многоканальной ЭЭГ отражались очень тонкие переходы в когнитивной сфере испытуемых, занятых семантической категоризацией [90].

Недавно был предложен принципиально другой подход к сегментированию пространственных описаний ЭЭГ, основанный на предварительной адаптивной классификации кратковременных спектров по каждому из каналов регистрации ЭЭГ [21]. Результаты подобной классификации позволяют представить развертку, например, 16-канальной ЭЭГ как последовательность 16-мерных векторов, компонентами каждого из которых являются номера типов спектров по каждому из 16-ти каналов для данной эпохи анализа. Последовательное или матричное сравнение этих векторов в метрике, где единичным расстоянием является наличие изменения по одному из компонентов, позволяет отслеживать моменты значительного, например на 75%, "обновления" компонентной структуры векторов или периоды относительной стабилизации спектральной структуры пространственной ЭЭГ [21]. В этой работе также была обнаружена кусочно-стационарная динамика многоканальной карты ЭЭГ.

Таким образом, последовательность метастабильных мозаик пространственной ЭЭГ реально существует, отражая периоды кратковременной стабилизации отношений больших нейронных систем [94]. Вполне возможно, что в подобной кусочно-стационарной динамике карты ЭЭГ проявляются дискретные информационно-аналитические операции целого мозга, своего рода "атомы мысли" [96].

Как же соотносится не вызывающая сомнений концепция Лемана о тахископической стабилизации пространственных описаний ЭЭГ с не менее убедительными данными многих исследователей (см. выше) о сегментной структуре ЭЭГ по каждому из каналов в отдельности? Вот вопрос, мимо которого прошли в свое время Бо-

денштайн и Преториус, а затем и сам Леман. Между тем ответ очевиден: стабильность пространственной карты может поддерживаться только временной сопряженностью сегментных описаний каждого из отведений ЭЭГ [81]. Но здесь важен не столько сам логический вывод, сколько его концептуальные последствия в рамках кусочно-стационарной метафоры ЭЭГ. Вполне возможно, что метастабильные пространственные карты ЭЭГ являются лишь вторичным продуктом собственно рабочего процесса пространственной синхронизации операций нервной деятельности, отражающихся в квазистационарных сегментах локальных ЭЭГ. Анализ проблемы "операциональной синхронизации" корковых образований посвящен следующий раздел настоящего сообщения.

6. Операциональная пространственная синхронность ЭЭГ-процессов

Итак, сегментная структура присуща не только локальным отведениям ЭЭГ-сигнала, но и его многоканальным реализациям в виде последовательности квазистационарных топографических структур корковых потенциалов по Леману. Это не удивительно, если представить многоканальную ЭЭГ как частную выборку локальных срезов единого биоэлектрического поля коры головного мозга [13, 23, 36, 110].

В свое время для объяснения "эффектов Лешли" была выдвинута гипотеза о том, что память и другие мозговые информационные инварианты времени виртуально хранятся в фазово-частотных картинах единого биопотенциального поля [65]. Многочисленные данные об устойчивых топографических особенностях фазово-частотных межкорковых отношений [27, 28, 36, 111, 115] в пределах идентичных когнитивных процессов, а также оказавшиеся достаточно низкими оценки "глобальной корреляционной размерности" многоканальной ЭЭГ [135] делают гипотезу Фримана весьма привлекательной. Созвучна мысли Фримана и гипотеза Прибрама о топографическом принципе процессов памяти [26]. Эвристический потенциал этих смелых гипотез простирается, однако, ровно настолько, насколько, например, уравнения Шредингера могут быть применимы к нестационарным случайным электромагнитным полям без структурной информации об их пространственно-временной организации.

Поэтому в практическом отношении оценки конкретной кооперативной деятельности пространственно разнесенных мозговых структур вряд ли можно конструировать исходя из "полевого" представления ЭЭГ, даже если накладывать на это поле инерционную фазово-частотную метрику, связанную с конкретными параметрами распространения нервного возбуждения в нейронных сетях. И дело здесь не только в значительной морфо-функциональной специализации различных корковых областей и сложной топографической организации самого коркового слоя больших полушарий, практически не поддающихся корректному формальному описанию. Проблема в высокой функциональной вариативности параметров ЭЭГ, значительная часть которой, как уже отмечалось выше, определяется региональной спецификой тестируемой корковой области. Фазово-частотные отношения в парных регистрациях ЭЭГ обычно оказываются нестабильными даже в пределах нескольких секунд [50]. В этих условиях вычисление таких "статистически инерционных" оценок кооперативной активности мозговых образований как коэффициенты корреляции или когерентности для пар ЭЭГ-сигналов дает представление лишь о самых общих "чертах сходства" ЭЭГ сигналов, устойчивых на достаточно продолжительных до 1-3 мин интервалах времени [6, 32] и характеризующих скорее генерализованные состояния мозга, чем конкретные операции нервной деятельности.

Поэтому "устойчивость" спектрально-корреляционных оценок многоканальной ЭЭГ, показанная во многих исследованиях [36, 51] для конкретных состояний мозга носит весьма условный характер и совершенно не совпадает по смыслу с реальными феноменами кратковременной стабилизации пространственной карты ЭЭГ по

Неману. Устойчивость корреляционной схемы парных отношений между каналами суммарной ЭЭГ, например, в значительной мере обусловлена статическим фактором продольного градиента альфа-активности. Возможно, именно поэтому так называемая "автокорреляционная функция поля биопотенциалов" (матрицы парных кросс-корреляций) не спадает ниже 0,8 на любых сдвигах [37]. Кроме того, коэффициенты корреляции и когерентности являются оценками только линейной взаимосвязи параметров, весьма редко встречающейся в мире сложных саморегулирующихся систем. Неудовлетворенность этим обстоятельством заставляет некоторых исследователей применять энтропийные меры [12, 58, 140] и даже методы нелинейной динамики [118] для оценивания сходства ЭЭГ-сигналов. Эти подходы несомненно учитывают более широкий класс феноменологических взаимосвязей, но для корректного оценивания требуют еще больших реализаций ЭЭГ и потому уже совершенно не дают возможности какой-либо "привязки" к конкретным операциям деятельности мозга, развертывающихся в интервалах времени, измеряемых десятками долями секунды [15, 95].

Наконец, сама логика устройства сложных систем говорит о том, что различия в форме кривых суммарной ЭЭГ двух корковых областей или отсутствие стабильных фазовых отношений в узкой полосе частотного спектра этих ЭЭГ, никак не могут свидетельствовать об отсутствии собственно временного сопряжения этих структур по поводу участия в организации одного и того же функционального акта. Каждая из этих структур может иметь свой собственный "ритмический рисунок", отражающий специфику внутренней организации и совсем не обязательно имеющий стабильные фазовые отношения с другими структурами, даже объединенными рамками одной функциональной системы. По-видимому, прав был один из классиков сенсорной физиологии Д. Хьюбел, полагая, что специфичность мозговых информационных процессов содержится скорее в самих схемах нейрональных взаимосвязей и в динамике их реорганизации, чем в частоте импульсации или в ее подробном временном распределении [33].

Кусочно-стационарная метафора функциональной организации ЭЭГ-сигнала предоставляет исследователям едва ли не уникальную возможность адекватного оценивания степени функциональной кооперированности мозговых образований по пространственно-временной согласованности сегментной структуры каждого из каналов многоканальной ЭЭГ. Данные о существовании кусочно-стационарной динамики коркового поля биопотенциалов, с одной стороны, и о сегментной структуре каждого из отведений ЭЭГ, — с другой, позволяют предположить, что базовые информационно-аналитические инварианты деятельности мозга отражаются в метастабильных пространственных мозаиках сегментных последовательностей региональных ЭЭГ [81]. Это означает, что стабильная функциональная кооперация определенного "набора" мозговых образований должна проявляться во временном согласовании моментов "переключения" элементарных операций нервной деятельности в каждом из этих образований.

Косвенным образом в пользу этого предположения свидетельствуют, например, относительно стабильные для каждого функционального состояния пространственные карты локусов синхронизации и дисинхронизации [89], которые можно рассматривать как своего рода квазистационарные сегменты ЭЭГ-активности. Устойчивые межкорковые отношения по признакам совпадения спектральных пиков ЭЭГ [14, 24] при выполнении испытуемыми стандартных когнитивных заданий также говорят о дискретной согласованности фрагментов ЭЭГ. В том и другом случае оценки пространственной "целостности" ЭЭГ производились не по сходству собственно кривых ЭЭГ, а по признаку временного совпадения фазово-независимых параметров на коротких интервалах времени, сопоставимых с длительностью квазистационарных сегментов ЭЭГ-сигнала (см. выше).

Однако прямым свидетельством "содружества" корковых образований по принципу согласования процессов "переключения" операций могло быть, очевидно, существо-

вание прямых совпадений собственно моментов межсегментных переходов в ЭЭГ, регистрируемых от разных корковых областей.

В некоторых работах [55, 66] действительно отмечалось достаточно частое совпадение межсегментных границ для двухканальных реализаций ЭЭГ. Однако эти авторы применили двухканальное сегментирование лишь для более надежного детектирования границ сегментов ЭЭГ, полагая, что совпадение моментов превышения порога сегментирования по двум каналам дополнительно гарантирует наличие межсегментного перехода.

Более определенные и систематические данные получены в исследованиях с использованием техники непараметрической сегментации ЭЭГ [9,38], позволяющей наиболее точно расставить границы квазистационарных сегментов ЭЭГ. В этих работах авторы показали, что в целом для различных пар отведений многоканальной ЭЭГ у человека частота совпадений межсегментных границ статистически значимо превышает уровень случайных совпадений, рассчитанный для условия независимости соответствующих ЭЭГ-реализаций [18,86]. Эти данные позволили авторам ввести термин "операциональная синхронность" ЭЭГ [Каплан 1997] для описания нового типа пространственной кооперации корковых образований.

В отличие от фазово-частотной синхронности корковых электрических процессов, явление операциональной синхронности относится скорее не к механизмам конкретного межкоркового взаимодействия, а к функциональному картированию результатов этого взаимодействия на уровне элементарных информационно-аналитических процедур нервной деятельности. Подобная карта операциональной синхронизации в виде графов повышенной интенсивности совпадения межсегментных границ в многоканальной записи ЭЭГ оказалась весьма чувствительной к достаточно тонким функциональным сдвигам в когнитивной области, например, при переходе от активного запоминания зрительного образа к его ретроактивному сохранению в оперативной памяти [18, 39, 83, 86].

Приведенные данные относятся, однако, к суммарному ЭЭГ-сигналу. Поскольку спектральные компоненты ЭЭГ имеют различную сегментную структуру [19], можно ожидать, что и карты межсегментной синхронизации для разных частотных составляющих ЭЭГ будут существенно различаться. К настоящему времени получены данные о пространственной операциональной синхронизации ЭЭГ в полосе альфа-активности, которые специфическим образом характеризуют не только разные стадии когнитивной деятельности, связанной с выполнением задач на оперативное запоминание, но и некоторые личностные особенности испытуемых, коррелирующие с состояниями тревожности, самочувствия и настроения [39].

Полученные в рамках концепции операциональной синхронности корковых процессов данные требуют дальнейшего экспериментального развития в направлении более подробного регионального описания возможных устойчивых пространственных модулей, разные комбинации которых могут отличаться повышенной синхронностью межсегментных переходов в ЭЭГ при различных функциональных нагрузках [83].

7. Континуальная мультивариативность или динамическая метастабильность функциональных состояний мозга?

Даже в конце 20-го века, когда искусственные вычислительные системы вот-вот отберут у человека шахматную корону, естественный мозг не перестает удивлять своей невообразимой потенциальной мультивариативностью. Более 100 миллиардов нейронов, помноженные на 5-10 тыс. синапсов на каждом из нейронов, и еще раз умноженные на десятки операциональных структур в синапсе и на сотни возможных состояний каждого из перечисленных элементов - вот та "элементная база", которая создает сверхастрономическую комбинаторику возможных состояний мозга [1, 3]. Казалось бы, базовая физиологическая идея о гомеостатическом регулировании (в широком смысле) процессов жизнедеятельности как нельзя лучше вписывается в

мультивариативную мозговую среду [40]. Однако, надо иметь в виду, что идея гомеостаза имплицитно содержит в себе гипотезу о континуальном характере нейродинамических процессов. Эта гипотеза предполагает, что потенциальная мультивариативность нейронных сетей позволяет мозгу "организовать" практически непрерывное и абсолютно пластичное подстраивание своего функционального состояния соответственно текущим потребностям организма и факторам внешней среды.

По-видимому, нет никаких теоретических оснований отвергать эту гипотезу, которая к тому же наиболее адекватна большинству биологических концепций, тяготеющих более к схемам адаптивной регуляции по отклонению или по возмущению, чем к активному поиску новых "управленческих" решений.

Тем не менее, совершенно очевидно, что задачи реального управления функциями организма требуют существенного ограничения числа степеней свободы на всех уровнях мозговой иерархии. В явном виде эта необходимость проявляется, например, в управлении движениями. В "преодолении избыточных степеней свободы движущегося органа, т.е. в превращении последнего в управляемую систему, как раз и заключается основная задача координации движений" [5, с. 83].

Наибольшей остроты эта проблема сокращения степеней свободы, по-видимому, достигает при реализации внешне невидимой сферы деятельности мозга - его познавательной и отражательной активности, когда к "работе" привлекается наибольшее число нейронных систем при минимуме четких ориентиров для подстройки (типа уровня глюкозы или температуры). На наш взгляд разрешить эту проблему в рамках континуальных схем динамики мозговых процессов представляется чрезвычайно затруднительным.

В то же время требование резкого ограничения степеней свободы системы на период принятия решения может быть легко осуществимо, если динамическая организация этой системы ограничена конечным числом метастабильных состояний. Иными словами, многообразие быстрых "микроскопических" переменных большой системы, в каждый данный момент времени может подчиняться более инерционным ее "макроскопическим" параметрам порядка. Этот "принцип подчинения" порядку [36, с. 349], возможно, и позволяет потенциально мультивариативной системе многократно уменьшать число степеней свободы в локальные периоды времени согласно операциональной структуре ее активности.

В таком случае принципиальным образом упрощается и взаимодействие элементарных нейронных систем: синхронизуя кратковременные периоды стабилизации "микроскопических" переменных, эти системы получают возможность интерактивного информационного обмена по поводу только существенных на данном этапе переменных для выработки "согласованного решения".

На сегодняшний день трудно сказать какой механизм лежит в основе подобного кусочно-стационарного "упорядочивания" мультивариативных нейронных сетей. Весьма вероятно, однако, что динамика нейросетей лежит далеко от равновесных состояний и потому определяющую роль в механизме их локальной стабилизации могут играть процессы диссипативного структурообразования [25].

Таким образом, пространственная и временная иерархия дискретных метастабильных состояний нейронных ансамблей может быть реальной основой для функционирования такой потенциально мультивариативной системы как мозг.

Заключение

Более чем 80-летняя история развития ЭЭГ методов исследования мозга человека, по-видимому, подходит к очередному своему критическому рубежу. В определенной мере это обусловлено успешным продвижением в последние годы супертехнологий мониторинга функционального состояния мозга, таких как рентгеновская томография и магнито-резонансная визуализация, позитронно-эмиссионная и однофотонно-эмиссионная томография. Однако, главное преимущество этих технологий - возможность

однозначной трехмерной реконструкции анатомических деталей и локусов метаболической активации мозговых образований, несомненно актуальное для целей клинической диагностики, - отступает на второй план в исследованиях фундаментальных механизмов информационно-аналитической деятельности мозга. Прежде всего это связано с низким временным разрешением новых технологий (десятки секунд и минуты) совершенно не отвечающим быстротечной динамике нейронных сетей [131]. В этом отношении метод электроэнцефалографии, или родственной ей магнитоэнцефалографии, оказывается вне конкуренции, так как по своей природе является практически безинерционным относительно подвижности процессов нервной деятельности любого уровня. Недоступная же методу ЭЭГ физическая трехмерная реконструкция активности целого мозга сильно компенсируется в фундаментальных исследованиях тем обстоятельством, что основные процессы "вышей нервной деятельности" разыгрываются в тонком слое коры больших полушарий мозга, вполне "прозрачном" для ЭЭГ-томографии [113].

Высокое временное разрешение метода ЭЭГ, а также его технологическая и коммерческая практичность, возможность сопряжения с томографическими техниками, по-видимому, могли бы еще на долгие годы обеспечить этому методу свою "нишу" в непрерывно расширяющемся арсенале инструментов исследования мозга человека.

Есть, однако, в природе самого ЭЭГ-сигнала существенная особенность - сильная нестационарность, которая, с одной стороны, в значительной мере определила развитие мощных статистических методов анализа этого сигнала [78, 79], а, с другой, - при рутинном применении этих методов приводит к резкому снижению реального временного разрешения ЭЭГ. Таким образом теряется основное методологическое преимущество техники ЭЭГ перед новыми технологиями, что, казалось бы, действительно подводит электроэнцефалографию к пределу своего развития.

Однако, временная "задолженность", например, наиболее распространенных фазово-частотных оценок ЭЭГ обусловлена инерционностью самих статистических методов, их естественной ориентированностью на процедуры усреднения. При этом чем выше неустойчивость рассматриваемого процесса, тем большая эпоха анализа требуется для получения статистически устойчивых оценок. Именно в "борьбе" с тотальной нестационарностью ЭЭГ-сигнала теряется основное преимущество электроэнцефалографии.

Совокупность приведенных в настоящем сообщении данных позволяет полагать, что основная доля дисперсии тотальной вариативности ЭЭГ сигнала определяется его глубокой временной структурированностью, составленностью из отдельных высокостабильных сегментов. По-видимому, информативная часть ЭЭГ-сигнала лишь косвенным образом присутствует в развертке мгновенных амплитудных флуктуаций или в тотально усредненных фазово-частотных оценках, проявляясь в полной мере только в пространственно-временных диаграммах следования квазистационарных сегментов ЭЭГ.

Вот почему понимание ЭЭГ как функционального структурированного кусочно-стационарного процесса является залогом нового витка развития ЭЭГ технологий. Свидетельством "активации" в этой области исследований являются не только рассмотренные в настоящем обзоре основные работы, сформировавшие собственно сегментный подход к описанию ЭЭГ, но и все чаще появляющиеся в последнее время исследования [50, 67, 68], в которых с помощью новых вычислительных алгоритмов становится возможным рассматривать классические фазово-частотные оценки ЭЭГ сигнала на коротких временных интервалах, сопоставимых с длительностью элементарных процессинговых операций мозга. Появление технологий прецизионного анализа сегментной структуры коркового биоэлектрического поля вполне отвечает и запросам новых теоретических концепций, представляющих механизмы информационно-аналитической деятельности мозга в терминах "сегментной структуры перцепции" [116], этапов "информационного синтеза" [15], "нелинейно-динамических

фазических переходов" [132], "квантования жизнедеятельности" [30] и даже "квантовых механизмов интеллектуальности" [136].

Можно только удивляться провидческой силе идей И.М. Сеченова, более 120 лет назад постулировавшего в "Элементах мысли" дискретный характер системной работы мозга, претворяющегося в "возможность расчленения слитных ощущений" и "связывания расчлененного в группы и ряды" [30].

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность академику И.П. Ашмарину, по инициативе которого были выполнены научные проекты; позволившие обобщить в настоящей статье идеи и экспериментальные результаты кусочно-стационарного описания ЭЭГ. Автор благодарен своим коллегам по рабочей группе, кандидатам биологических наук А.Г. Кочетовой, С.Л. Шишкину, аспирантам Ал.А. Фингелькурц, Ан.А. Фингелькурц, программистам В.А. Ермолаеву, Р. Ивашко и кандидату физ.-мат наук Б.Е. Бродскому за помощь в экспериментальных процедурах и многотрудном деле анализа данных. Особую благодарность автор выражает доктору физ.-мат. наук Б.С. Дарховскому за постоянное содействие в разработке теории и методологии поиска разладов в ЭЭГ, а также зарубежным коллегам: профессорам Р. Nunez, В. Jansen, D. Lemann и В. Thatcher, рабочие дискуссии с которыми определили основные траектории научного поиска в области структурного анализа ЭЭГ человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбиб М. Метафорический мозг. М: Мир. 1976.
2. БендатДж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир. 1974. 464с.
3. Берне Б. Неопределенность в нервной системе. М.: Мир. 1969.
4. Бекшаев С.С., Сороко СИ., Василевский Н.Н. Закономерности, лежащие в основе поддержания динамической устойчивости диапазонов частот ЭЭГ человека // Физиология человека. 1988. Т. 14. N 4. С. 545-551.
5. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и по физиологии активности. М.: Наука. 1966.
6. Биопотенциалы мозга человека. Математический анализ. Ред. В.С. Русинов. 1987. М.: Медицина. 255 с.
7. Бодунов М.В. Индивидуально-типологические особенности структуры ЭЭГ // Журнал ВНД. 1985. Т. 35. С. 1045-1052.
8. Бодунов М.В. "Алфавит" ЭЭГ: типология стационарных сегментов ЭЭГ человека // Индивидуально-психологические различия и биоэлектрическая активность мозга человека. Ред. В.М. Русалов. М.: Наука. 1988. С. 56-70.
9. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С., Каплан А.Я. и др. Непараметрическая сегментация электрических сигналов мозга // Автоматика и телемеханика. 1998.
10. Буров Ю.В., Каплан А.Я. Влияние амиридина на спектральные характеристики ЭЭГ человека // Экспериментальная и клиническая фармакология. 1993. Т. 56 (6). С. 5-8.
11. Винер Н. Новые главы кибернетики. Управление и связь в животном и машине. М.: Советское радио. 1963.
12. Древе Ю.Г., Свидерская Н.Е., Бутнева Л.Д., и др. Пространственная упорядоченность электрических процессов мозга как показатель его функциональной организации // Журнал ВНД. 1994. Т. 44 (6). С. 925-931.
13. Жадин М.Н. Биофизические механизмы формирования электроэнцефалограммы. М.: Наука. 1984. 196 с.
14. Иваницкий А.М., Подклетнова И.М., Таратынова Г.М. Исследование динамики внутрикоркового взаимодействия в процессе мыслительной деятельности // Журнал ВНД. 1990. Т. 40. No 2. С. 230-237.
15. Иваницкий А.М. Синтез информации в ключевых отделах коры как основа субъективных переживаний // Журнал ВНД. 1997. Т. 47 (2). С. 209-225.
16. ИзнакА.Ф. Функциональное значение альфа-подобной активности мозга. М.: МГУ. 1987.
17. Каплан А.Я., Шишкин С.Л. Кардиосинхронные феномены работы мозга: психо-физиологические аспекты // Биологические науки. 1992. № 10. С. 5-24.

18. Каплан А.Я., Дарховский Б.С., Фингелькурц Ал.А. и др. Топологическое картирование процесса синхронизации моментов резких перестроек в мультиканальной ЭЭГ у человека. // Журнал ВНД. 1997. Т. 47. № 1. С. 32-37.
19. Каплан А.Я., Фингелькурц Ал.А., Фингелькурц Ал.А. и др. Согласованность фазических перестроек основных частотных компонентов ЭЭГ-сигнала. Журнал ВНД. 1998.
20. Каплан А.Я., Фингелькурц Ал.А., Фингелькурц Ал.А. и др. Вероятностные паттерны разностных спектров ЭЭГ человека в динамике мнестической деятельности // Физиология человека. 1998.
21. Каплан А.Я. Проблема сегментного описания ЭЭГ человека. Физиология человека. 1998 (в печати).
22. Лазарев В.В. Факторная структура основных параметров ЭЭГ при интеллектуальной деятельности. 1. Локальные характеристики неоднородности функциональных состояний // Физиология человека. 1986. Т. 12. С. 891.
23. Ливанов М.Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М: Наука. 1972. 182 с.
24. Николаев А.Р., Анохин А.П., Иваницкий Г.А. и др. Спектральные перестройки ЭЭГ и организация корковых связей при пространственном и вербальном мышлении // Журнал ВНД. 1996. Т. 46 (5). С. 831-848.
25. Николис Г., Пригожий И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 521 с.
26. Прибрам К. Языки мозга. М.: Прогресс. 1975. 463 с.
27. Свидерская Н.Е. Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М., Наука. 1987. 156 с.
28. Свидерская Н.Е., Королькова Т.А. Пространственная организация электрических процессов мозга: проблемы и решения // Журнал ВНД. 1997. Т. 47(5). С. 792-811.
29. Сентаготтаи Я., Арбиб М. Концептуальные модели нервной системы. Москва: Мир. 1976. 198 с.
30. Сеченов ИМ. Элементы мысли. Избр. Произв. Т. 1. 1952. с. 272-426.
31. Судаков КВ. Квантование жизнедеятельности // Успехи современной биологии. 1992. Т. 112(4). С. 512-527.
32. Труш В.Д., Кориневский А.В. ЭВМ в нейрофизиологических исследованиях. М., Наука. 1978. 238 с.
33. Унгар Г. Проблема молекулярного кода памяти // Физиология человека. 1977. Т. 3. № 5. С. 808-820.
34. Фарбер Д.А., Вильдавский В.Ю. Гетерогенность и возрастная динамика альфа-ритма электроэнцефалограммы // Физиология человека. 1996. Т. 22(5). С. 5-12.
35. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 405 с.
36. Шеповальников А.Н., Цицеришин М.Н., Апанашенок В.С. Формирование биопотенциального поля человека. Л.: Наука. 1979. 162 с.
37. Шеповальников А.Н., Цицеришин М.Н., Погосян А.А. О некоторых принципах интеграции биоэлектрической активности пространственно-распределенных отделов неокортекса в целостную динамическую систему // Физиология человека. 1995. Т. 21(5). С. 36-50.
38. Шишкин С.Л., Бродский Б.Е., Дарховский В.С., Каплан А.Я. ЭЭГ как нестационарный сигнал: подход к анализу на основе непараметрической статистики // Физиология человека. 1997. Т. 23, № 4. С. 124-126.
39. Шишкин С.Л. Исследование синхронности моментов резких изменений альфа-активности ЭЭГ человека. Автореф. Дис.... канд. биол. наук. М., 1997. 287 с.
40. Эшби У.Р. Конструкция мозга. М.: Мир. 1964.
41. Adrian E.D. The discovery of Berger. In: Handbook of electroencephalography and clinical neurophysiology / Ed. A. Remond. Amsterdam: Elsevier, 1971. V. 1A, P. 5-10.
42. Alexander I.E., Sufka K.J. Cerebral lateralisation in homosexual males: a preliminary EEG investigation // Int. J. Psychophysiol. 1993. V. 15. P. 269-274.
43. Barlow T.S., Creutzfeld O.D. Automatic adaptive segmentation of clinical EEGs // EEG and Clin Neurophysiol - 1981. V. 51. P. 512-525.
44. Barlow J.S. Methods of analysis of nonstationary EEGs, with emphasis on segmentation techniques: a comparative review // J. Clin. Neurophysiol. 1985. V. 2. P. 267-304.
45. Basar E., Schürmann M. Alpha rhythms in the brain: functional correlates // News Physiol Sci. 1996. V. 11. April. P. 91-96.

46. Biscay R., Lavielle M., Gonzalez A., et al. Maximum a posteriori estimation of change points in the EEG // *Int J of Biomed Computing*. 1995. V. 38. P. 189-196.
47. Bodenstein G., Praetorius H.M. Feature extraction from the electroencephalogram by adaptive segmentation // *Proc. IEEE*, 1977. V. 65. P. 642-652.
48. Brodsky B.E., Darkhovsky B.S. *Nonparametric Methods in Change-Point Problems*, Dordrecht (the Netherlands): Kluwer Acad. Publ. 1993.
49. Bullock T.H., Achimowicz J.Z., McClune M.C. Forays into microstructure of EEG in space and time. In: *Proceedings for Annual Res. Symp. of Inst. for Neural Computat.* 1992. P. 41-47.
50. Bullock T.H., McClune M.C., Achimowicz et al. Temporal fluctuations in coherence of brain waves // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1995. V. 92. P. 11568-11572.
51. Burgess A., Gruzeliier J. Individual reliability of amplitude distribution in topographical mapping of EEG // *EEG and Clin Neurophysiol.* 1993. V. 86. P. 219-223.
52. Campbell J. et al. On the sufficiency of autocorrelation functions as EEG descriptors // *IEEE Trans. Bio-Med. Eng.* 1967. V. BME-14. P. 49-52.
53. Christian J.C., Morzorati S. and Norton J.A. et al. Genetic analysis of the resting electroencephalographic power spectrum in humans twins // *Psychophysiology*. 1996. V. 33. P. 584-591.
54. Cohen B.A., Sances A.Jr. Stationary of the human electroencephalogram // *Med. Biol. Eng. Comput.* 1977. V. 15. P. 513-519.
55. Creutzfeldt O.-D., Bodenstein G., Barlow J.S. Computerized EEG pattern classification by adaptive segmentation and probability density function classification. Clinical evaluation // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1985. V. 60, P. 373-393.
56. Dierks T., Perisic I., Frolich L. et al. Topography of the Quantitative Electroencephalogram in Dementia of the Alzheimer Type: Relation to Severity of Dementia // *Psych. Research: Neuroimaging*. 1991. V. 40. P. 181-194.
57. Dumermuth H.G., Molinari L. Spectral analysis of the EEG // *Neuropsychobiology*. 1987. V. 17. P. 85-99.
58. Dvorak L. Takens versus multichannel reconstruction in EEG correlation exponent estimates // *Physics Letter*. 1990. V. 151(5). P. 225-233.
59. Eischen S.E., Luckritz J.Y., Polich J. Spectral analysis of EEG from families // *Biological Psychology*. 1995. V. 41. P. 61-68.
60. Elul R. Gaussian behavior of the electroencephalogram exchanges during performance of mental task. // 1969. *Science*. V. 164, P. 328-331.
61. Fein G., Galin D., Jahnstone J. et al. EEG power spectra in normal and dyslexic children. I. Reliability during passive conditions // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1983. V. 55. P. 399-405.
62. Ferher G. Treatment of some nonstationarities in the EEG // *Neuropsychobiology*. 1987. V. 17. P. 100-104.
63. Fernandez T., Harmony T., Rodrigues M. et al. Test-retest reliability of EEG spectral parameters during cognitive tasks. I. Absolute and relative power // *Int. J. Neurosci.* 1993. V. 68. P. 255-261.
64. Fink M. Pharmacoo-EEG: a note on its history // *Neuropsychopharmacology*. 1984. V. 12. No. 2-3. P. 173-178.
65. Freeman W.J. Waves, pulses and a theory of neural masses // *Progr. Theor. Biol.* 1972. V. 2. P. 86-101.
66. Gath L., Michaeli A., Feuerstain C. A model for dual channel segmentation of the EEG signal // *Biol. Cybernv.* 1991. V. 64. P. 225-230.
67. Gevins A., Cutillo B. Spatiotemporal dynamics of component processes in human working memory // *EEG and Clin Neurophysiol.* 1993. V. 87. P. 128-143.
68. Gevins A., Cutillo B., DuRousseau D. et al. High-resolution evoked potential technology for imaging neural networks of cognition. In: *Functional neuroimaging: technical foundations*: / Eds.: Thatcher R.W., Hallett M., Zeffiro T. et al. Orlando, FL: Academic, 1994. P. 223-232.
69. Giese D.A., Bourne J.R., Ward J.W. Syntactic analysis of the electroencephalogram // *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 1979. V. SMC-9. P. 429-436.
70. Herrmann W.M. Development and critical evaluation of and objective procedure for the electroencephalographic classification of psychotropic drugs. In: *EEG in Drug Research* / Ed. W.M. Herrmann. Stuttgart, N.Y.: Gustav Fisher. 1982. P. 249-351.
71. Hughes J.R. The Phenomenon of traveling waves: a review // *Clinical Electroencephalography*. 1995. V. 26. P. 1-6.

72. *Intriligator J., Polich J.* On the relationship between EEG and ERP variability // *Int. J. of Psychophysiol.* 1995. V. 20. P. 59-74.
73. *Itil T.M., Hil K.Z.* Memory, drugs and dynamic brain mapping of computerized EEG. In: *Current Problems in Senile Dementia*. N.Y.: Raven Press. 1986. P. 311-331.
74. *Jansen B.H., Hasman A., Lenten R. et al.* A study of inter and intra individual variability of the EEG of 16 normal subjects by means of segmentation // *Proc. of the 2nd Europ Congr of EEG and Clin Neurophysiol.* Ed. H. Lechner, Aranibar A. 1979. P. 617-627.
75. *Jansen B.H., Hasman A., Lenten R.* Piece-wise EEG analysis: an objective evaluation // *Internet. J. Bio-Med. Comput.* 1981. V. 12. P. 17-27.
76. *Jansen B.H., Hasman A., Lenten R.* Piece-wise analysis of EEG using AR-modeling and clustering // *Comput. Biomed. Res.* 1981. V. 14. P. 168-178.
77. *Jansen B.H., Cheng Wei-Kang.* Structural EEG analysis: an explorative study // *Int. J. Biomed Comput.* 1988. V. 23. P. 221-237.
78. *Jansen B.H.* Quantitative analysis of the electroencephalograms: is there chaos in the future // - *Int. J. Biomed. Comput.* 1991. V. 27. P. 95-123.
79. *John E.R.* *Neurometrics: clinical applications of quantitative electrophysiology*. N.Y.: Wiley, 1977.
80. *John R.E., Prichep L.S. et al.* Quantitative electrophysiological characteristics and subtyping of schizophrenia//*Biol. Psychiatry.* 1994. V. 36. P. 801-826.
81. *Kaplan A.Y., Kadr I.* The multiple combinatorial analysis of segmental EEG structure. In: *Proc. of the Int. Symp. Mathematical approaches to brain functioning diagnostics* Prague. 1990. p. 69.
82. *Kaplan A.Ya., B.S. Darchovskiy, B.E. Brodskiy.* On the frame organization of the brain activity. In: *Thesis of the International symposium "Physiological and biochemical basis of brain activity"*. St. Petersburg. J. 1994. P. 34.
83. *Kaplan A.Ya.* Spatial EEG Moduli: Change-Point Analysis. In: *Proceedings of 5th Congress of the International Organisation of Societies for Electrophysiological Technology (OSET)*, Washington D.C., 1995. P. 12.
84. *Kaplan A.Ya., Darchovskiy B.S., Brodskiy B.E.* Frame architecture of the brain activity. *Proceeding of the 1st Asia-Pacific Colloquim In Neuroscience*, December Singapore. 1994, P. 108.
85. *Kaplan A.Y., Kochetova A.G., Nezavibathko V.N. et al.* Synthetic ACTH analogue SEMAX displays nootropic-like activity in humans // *Neuroscience Res. Communications.* 1996. V. 19(2). P. 115-123.
86. *Kaplan A.Y., Fingelkurts ALA., Fingelkurts An.A. et. al.* Topological mapping of sharp reorganization synchrony in multichannel EEG // *Am. J. of Electroneurodiagnostic Technol. (Am J END)*. 1997. V. 37. P. 265-275.
87. *Kaplan B.J.* Menstrual cycle phase is a potential confound in psychophysiology research // *Psychophysiol.* 1990. V. 27. N 4. P. 445-50.
88. *Kinoshita T., Strik W.K., Michel CM. et al.* Microstate segmentation of spontaneous multichannel EEG map series under diazepam and sulpiride // *Pharmacopsychiatry*, 1995. V. 28. P. 51-55.
89. *Klimesch W.* Memory processes, brain oscillations and EEG synchronization // *Int. J. Psychophysiol.* 1996. V. 24. P. 61-100.
90. *Koenig T., Lehmann D.* Microstates in Language-related brain potential maps show noun-verb differences // *Brain and Language.* 1996. V. 53. P. 169-182.
91. *Kozhevnikov V.A.* Some methods of automatic measurement of the electroencephalogram. // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1958. V. 10. P. 259-278.
92. *Lehmann D.* Multichannel topography of human alpha EEG fields // *EEG and clin Neurophysiol.* 1971. V. 31. P. 439-449.
93. *Lehmann D.* Mapping, spatial analysis, and adaptive segmentation of EEG/ERP data. In: *Brain Electric Potentials and Psychopathology.* / Eds.: C Shagass, R.C. Josiassen, R.A. Rocmer. Amsterdam: Elsevier. 1986. P. 27-46.
94. *Lehmann D., Ozaki H., Pal I.* EEG alpha map series: brain micro-states by spaceoriented adaptive segmentation // *EEG and Clinical Neurophysiology.* 1987. V. 67. P. 271-288.
95. *Lehmann D.* Brain electrical mapping of cognitive functions for psychiatry: functional micro-states // *Psychiat. Res.* 1989. V. 29. P. 385-386.
96. *Lehmann D.* Brain electric field mapping and map analysis in psychiatry: The "atoms of thought" // *Biol. Psychiatry.* 1991. V. 2. P. 391-394.
97. *Lion K.S., Winter D.F.* A method for the discrimination between signals and random noise of electrobiological potentials // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1953. V. 5. P. 109-11.

98. *Lopes da Silva F.N.* Analysis of EEG non-stationarities. In: Contemporary Clinical Neurophysiology, (Suppl. No. 34 to EEG and Clinical Neurophysiology). / Eds. W.A. Cobb, H. Van Dujn. Amsterdam: Elsevier. 1978. P. 165-179.
99. *Lopes da Silva F.H.* Analysis of EEG ongoing activity: rhythms and nonstationarities. In: Recent Advances in EEG and EMG Data Processing. / Eds.: N. Vamaguchi and K. Fujisawa Amsterdam: Elsevier. 1981. P. 95-115.
100. *Lorig T.S., Schwartz G.E.* Factor analysis of the EEG indicates inconsistencies in traditional frequency bands // Journal of Psychophysiology. 1989. V. 3. N 4. P. 369-375.
101. *Matousek M., Petersen I.* Automatic evaluation of EEG background activity by means of age-dependent EEG quotients // EEG and Clin. Neurophysiol. 1973a. V. 35. P. 603-612.
102. *Matousek M., Petersen I.* Frequency analysis of the EEG in normal children and adolescence. In: Automation of Clinical Electroencephalography. / Eds. P. Kellaway and I. Petersen. N.Y., Raven Press. 1973b. P. 73-102.
103. *Matousek M., Wackermann J., Palus M.* Global dimensional complexity of the EEG in healthy volunteers // Neuropsychobiology. 1995. V. 31. N 1. P. 47-52.
104. *McEwen J.A., Anderson G.B.* Modeling the stationary and gaussianity of spontaneous electroencephalographic activity. IEEE Transactions on Biomed. Engineering. 1975 v. BME-22. No. 5. P. 361-369.
105. *Merrin E.L., Meek P., Floyd T.C. et al.* Topographic segmentation of waking EEG in medication-free schizophrenic patients // Int. J. Psychophysiol. 1990. T. 9. N 3. P. 231-236.
106. *Molinari L., Dumermuth G.* Robust spectral analysis of the EEG // Neuropsychobiology. 1986. V. 15. P. 208-218.
107. *Mulholland T.* The concept of attention and the electroencephalographic alpha rhythm In: Attention in neurophysiology. An international conference / Ed. C.R. Evans, T. Mulholland. London: Butterworths, 1969. P. 100-127.
108. *Neufeld M.Y., Korczyn A.D.* Topographic distribution of the periodic discharges in Creutzfeldt-Jacob disease (CJD) // Brain Topography. 1992. V. 4. P. 1-206.
109. *Niedermeyer E.* EEG patterns and genetics. In: Electroencephalography: basic principles, clinical applications and related fields (3rd) / Ed. by E. Niedermeyer, F.H. Lopes da Silva. Baltimore: Williams & Wilkins. 1993. P. 192-195.
110. *Nunez P.L.* Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG. N.Y.: Oxford U. Press. 1981.
111. *Nunez P.* Neocortical Dynamics and Human EEG Rhythms. N.Y., Oxford: Oxford Univ. Press. 1995. 705 c.
112. *Oken B.S., Chiappa K.H.* Short-term variability in EEG frequency analysis // EEG and Clin Neurophysiol. 1988. V. 69. 191-198.
113. *Pascual-Marqui R.D., Michel CM., Lehmann D.* Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain // Int. J of Psychophysiology. 1994. V. 18. P. 49.
114. *Petsche H.* Der Januskopf des EEG-Mapping // EEG-Lab. 1990. V. 12. N. 1. C 1-11.
115. *Petsche H., Richter P., Stein A.V. et al.* EEG Coherence and musical thinking // Music Perception. 1993. V. 11. No. 2. P. 117-151.
116. *Poppel E.* Temporal mechanisms in Perception // Int. Rev. of Neurobiol. 1994. V. 37. P. 185-201.
117. *Priestly MB.* Spectral analysis and time series. Vol. 2. N.Y.: Academic Press. NY, 1981.
118. *Pritchard W.S., Kriebel K.K., Duke D.W.* On the validity of estimating EEG correlation dimension from a spatial embedding // Psychophysiology. 1996. V. 33. P. 362-368.
119. *Remond A., Renault B.* La theorie des abjects electrographiques. Rev. // EEG Neurophysiol. 1972. V. 3, 241-256.
120. *Rugg M.D., Dickens A.M.D.* Dissociation of alpha and theta activity as a function of verbal and visuospatial tasks // EEG and Clin Neurophysiol. 1982. V. 53. P. 201-207.
121. *Salmelin R., Hari R., Lounasmaa O.V., et al.* Dynamics of brain activation during picture naming // Nature. 1994. V. 368, N 6470. P. 463-466.
122. *Sanderson A.C., Segen J., Richey E.* Hierarchical modeling of EEG signals // IEEE Trans Pattern Anal. Mach. Intel. 1980. V. 2. P. 405-515.
123. *Salinsky M.C., Oken B.S., Morehead L.* Test-retest reliability in EEG frequency analysis // EEG and Clinical Neurophysiology. 1991. V. 79. P. 382-392.
124. *Sounders M.G.* Amplitude probability density studies on alpha and alpha-like patterns. // EEG and Clin. Neurophysiol. 1963. V. 15. P. 761-767.
125. *Schwartz I., Gath I.* Syntactic pattern recognition applied to sleep EEG staging // Pattern Rec Lett. 1989. V. 10. P. 265-272.

126. *Stassen H.H., Bomben G., Propping P.* Genetic aspects of the EEG: an investigation into the within-pair similarity of monozygotic and dizygotic twins with a new method of analysis // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1987. V. 66. P. 489-501.
127. *Stevens A., Lutzenberger W., Bartles DM., Strik W., Lindner K.* Increased duration and altered topography of EEG microstates during cognitive tasks in chronic schizophrenia // *Psychiatry Res.* 1997. V. 66(1). P. 45-57.
128. *Sugimoto H., Ishii N., Iwata A. et al.* On the stationary and normality of the electroencephalographic data during sleep stages // *Comput. Prog. Biomed.* 1978. V. 8. P. 224-234.
129. *Stevens A., Lutzenberger W., Bartles DM., et al.* Increased duration and altered topography of EEG microstates during cognitive tasks in chronic schizophrenia // *Psychiatry Res.* 1997. V. 66(1). P. 45-57.
130. *Streletz L.J., Reyes P.F., Zalewska ML. et al.* Computer analysis of EEG activity in dementia of the Alzheimer's type and Huntington's disease // *Neurobiol. Aging.* 1990. V. 11. No 1. P. 15-20.
131. *Thatcher R.W.* Tomographic electroencephalography/magnetoencephalography. Dynamics of human neural network switching // *J. Neuroimaging.* 1995. V. 5(1). P. 35-5.
132. *Versavel M., Leonard J.P., Herrmann WM.* Standard operating procedure for the registration and computer supported evaluation of pharmaco-EEG data // *Neuropsychobiology.* 1995. V. 32. P. 166-170.
133. *Vogel F., Motulsky A.G.* Human genetics: problems and approaches. / 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag. 1986.
134. *Walter D.O., Rhodes J.M., Adey R.W.* Discriminating among states of consciousness by EEG measurements. A study of four subjects // *EEG and Clin Neurophysiol.* 1967. V. 22. P. 22-29.
135. *Wachermann J., Lehmann D., Dvorak I. et al.* Global dimensional complexity of multi-channel EEG indicates change of human brain functional state after a single dose of a nootropic drug // *EEG and Clin Neurophysiol.* 1993. V. 86. P. 193-198.
136. *Weiss V.* From memory span and mental speed toward the quantum mechanics of intelligence mechanics of intelligence // *Pers Individ Differ.* 1986. V. 7. P. 737-749.
137. *Weiss M.S.* Non-Gaussian properties of the EEG during sleep. // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1973. V. 34. P. 200-202.
138. *Wolkowitz O.M., Coppola R. et al.* Quantitative electroencephalographic correlates of steroid administration in man // *Neuropsychobiology/Pharmacoelectro-encephalography* /. 1993. V. 27. P. 224-230.
139. *Wright JJ., Kydd R.R., Lees G.L.* State-changes in the brain viewed as linear steady states and non linear transitions between steady states // *Biol. Cybernet.* 1985. V. 53. P. 11-17.
140. *Xu J., Liu Z., Liu R. et al.* Information transmission in human cerebral cortex // *Physica D.* 1997. V. 106. P. 363-374.

Поступила в редакцию
2.04.1998 г.

A.Y. KAPLAN NONSTATIONARY EEG:

METHODOLOGICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS

Moscow State University, Moscow

Theoretical, methodological and methodical aspects on nonstationary EEGs, that is, EEGs whose patterns undergo changes with time are reviewed. The piecewise description of the EEG is confirmed on the base of the own data and results of another investigators. It is analysed the basic approach to statistical evaluation of nonstationary EEGs in the terms of quasi-stationary segments. The special attention is devoted to the data of segmental organization of the bioelectrical field of the cortex. Taking into consideration new experimental data concerning the time consistence of the segmental descriptions of regional EEGs it is suggested conception of "operational synchrony" as a form of discretial cooperation of cortex process. The theoretical explanations of the phenomenology for pie-wise functioning of neuron nets are discussed.

Key Words: EEG, Stationary, Segmentation, Coherency, Synchrony