

Морфо-функциональное созревание мозга человека в процессе индивидуального развития (онтогенеза).

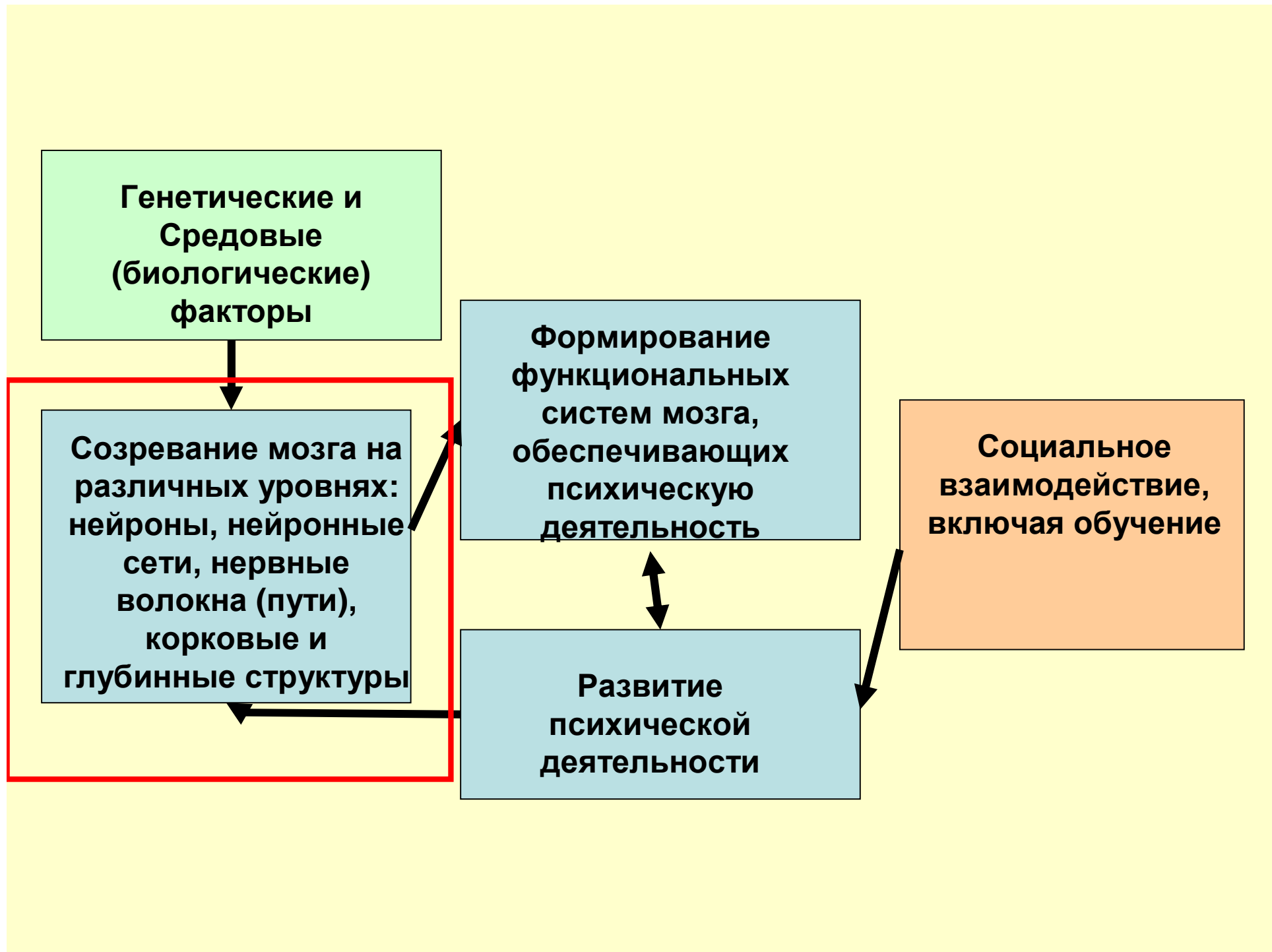
Р.И. Мачинская, д.б.н.

**Зав. лабораторией нейрофизиологии когнитивной
деятельности, Институт возрастной физиологии РАО**

www. neurodev.net.ru

develop.physiol@inbox.ru

**Лекция на XI ежегодной Всероссийской научно-практической школе-семинаре
«Школа и здоровье» по возрастной физиологии и здоровьесберегающей
деятельности образовательных учреждений
Москва 2008**

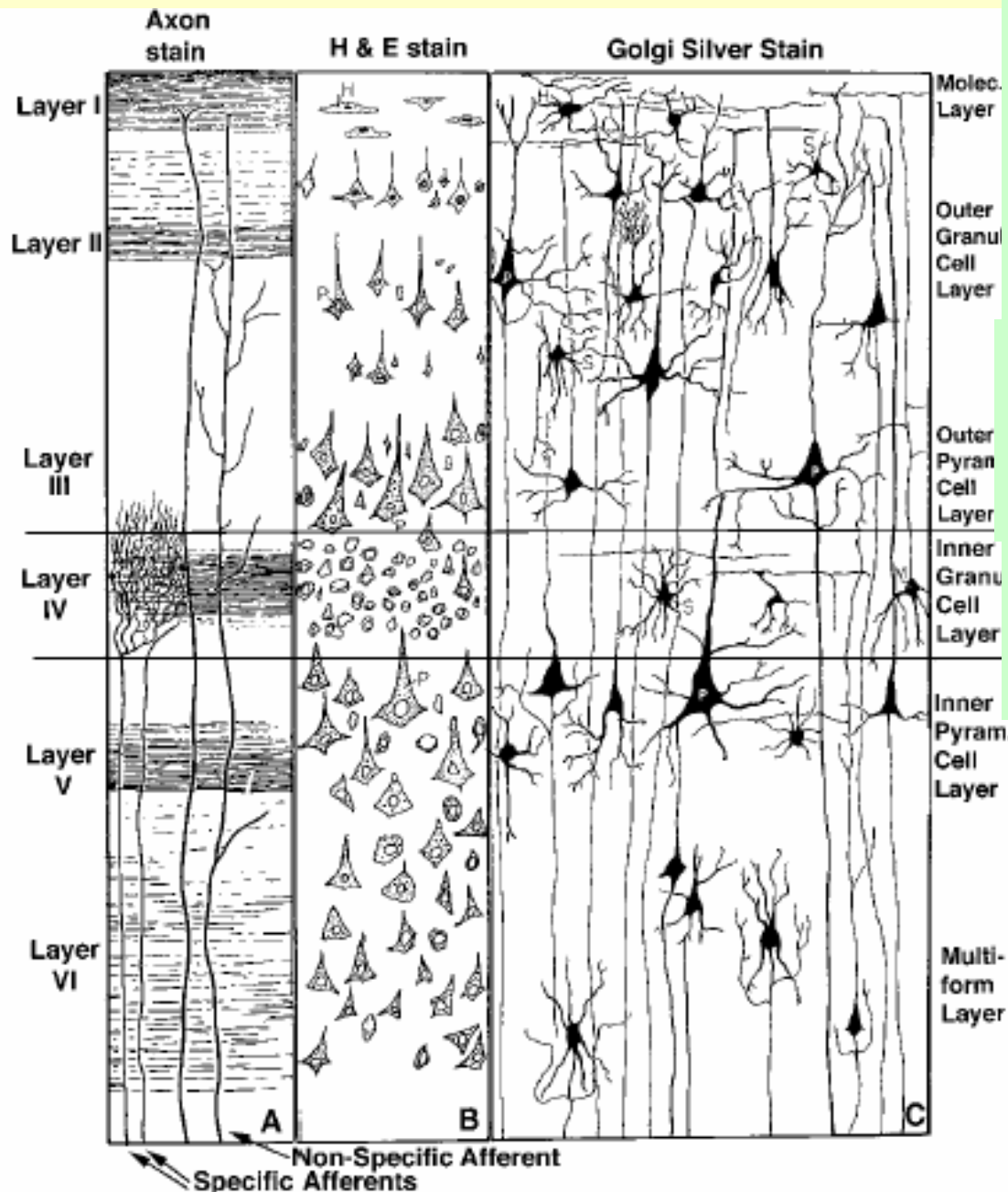


Возможность влияния познавательной активности и научения на морфофункциональное развитие мозга. Исследования на ЖИВОТНЫХ

Turner and Greenough, 1985	Зрительная кора крысы	Отношение числа синаптических контактов к числу нейронов (С/Н) выше у животных с насыщенной информационной средой, чем у животных, находящихся в изоляции
Bailey and Chen, 1988a, b	Aplysia (моллюск)	Сенсибилизирующее обучение ведет к 50% увеличению отношения С/Н, привыкание - к снижению
Black et al., 1990	Мозжечок крысы	Моторное обучение на 25% увеличивает С/Н, тогда как просто усиление моторной активность не оказывает такого эффекта
Chang et al., 1991	CA1, гиппокамп крысы	Увеличение числа синапсов при длительном раздражении (потенциации) у взрослых крыс

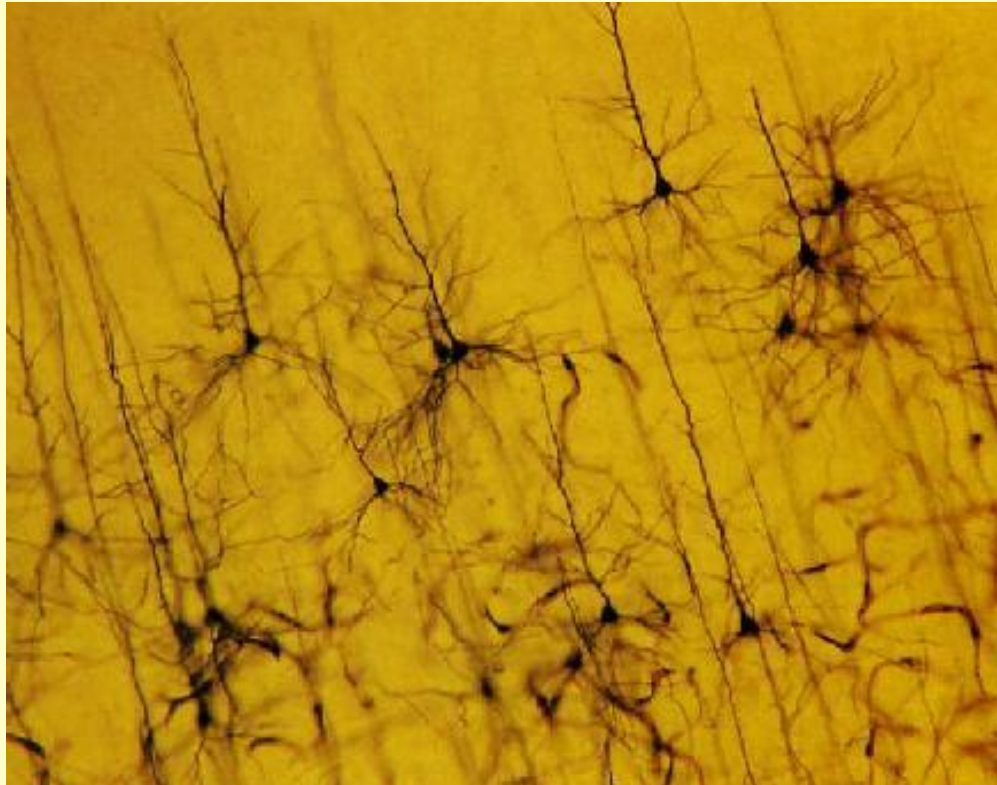
**Цитоархитектоника (клеточное строение)
коры больших полушарий головного мозга
человека**

Структурно-функциональная организация мозга. Кора больших полушарий. Клеточное строение (цитоархитектоника)



- I Наружный молекулярный** – разветвления апикальных дендритов пирамидных нейронов, **входы неспецифических афферентов**
- II Наружный зернистый (гранулярный)** – мелкие афферентные пирамидные нейроны и звездчатые нейроны, **входы неспецифических афферентов**
- III Наружный пирамидный** – тела средних пирамидных нейронов, обеспечивающих внутрикорковые, межкорковые и корковоподкорковые связи, вставочные нейроны
- IV Внутренний гранулярный** – вставочные нейроны, **входы специфических афферентов**, внутрикорковые волокна
- V Внутренний пирамидный** – крупные эфферентные пирамиды, в моторных зонах – клетки Беца, аксоны которых образуют нисходящие **эфферентные тракты**
- Слои полиморфных нейронов**

Модульная вертикальная организация корковых нейронных сетей



Анатомические данные: **Рамон-и-Кахал**, исследуя анатомическую вертикальную организацию коры головного мозга выдвинул идею о модульном характере ее строения, что было подтверждено в исследованиях 60-70 годов (**Сентаготаи**, **Антонова**).

Экспериментальные электрофизиологические данные: **Маунткасл** в 1957 г., регистрируя импульсную активность нейронов сенсомоторной коры кошки на тактильные и двигательные раздражения, обнаружил, что при вертикальном движении регистрирующего электрода в глубь коры нейроны реагируют на одну и ту же модальность, а при смещении в сторону – на другую модальность. **Хьюбел и Визел** в 1977 г. Обнаружили подобную избирательность вертикальной организации в зрительной коре обезьяны при реакции на стимуляцию правого или левого глаза.

**Структурно-функциональная организация мозга. Кора больших полушарий.
Модульная вертикальная организация корковых нейронных сетей.
Микроколонки**

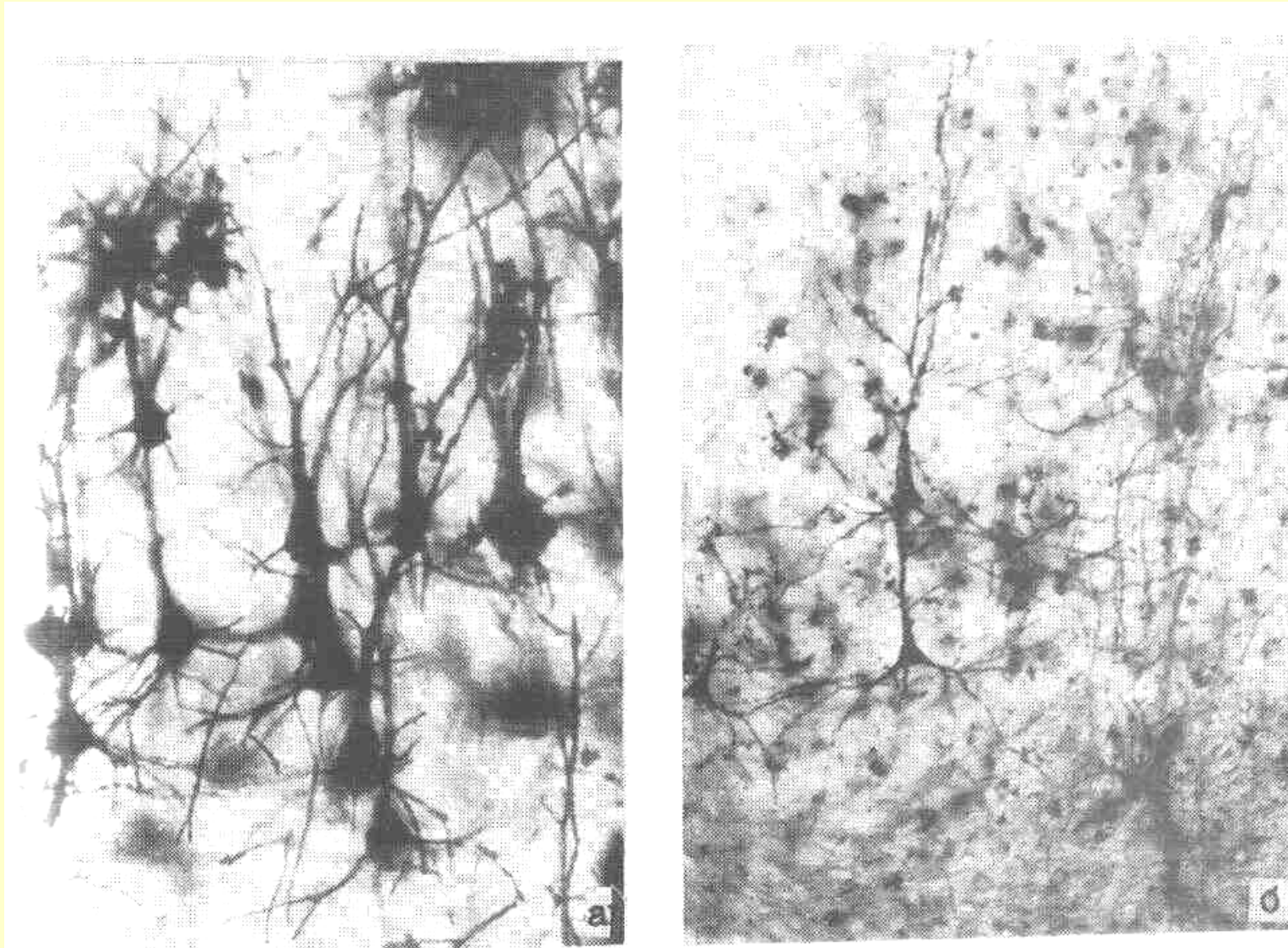


Рис. 4-6. Вертикальные колонки пирамидных и звездчатых нейронов в зрительной коре юноши 19 лет:
а — поле 19, об. 20^x, ок. 5,6^x; б — поле 17, об. 9^x, ок. 5,6^x. Препараты В.А.Васильевой

Морфофункциональное созревание мозга и формирование ЭЭГ у детей в процессе онтогенеза



Суммарная суммарной электрической мозга (ЭЭГ) возникает в нейронных сетях коры и зависит от функционального состояния и степени зрелости корковых и глубинных структур

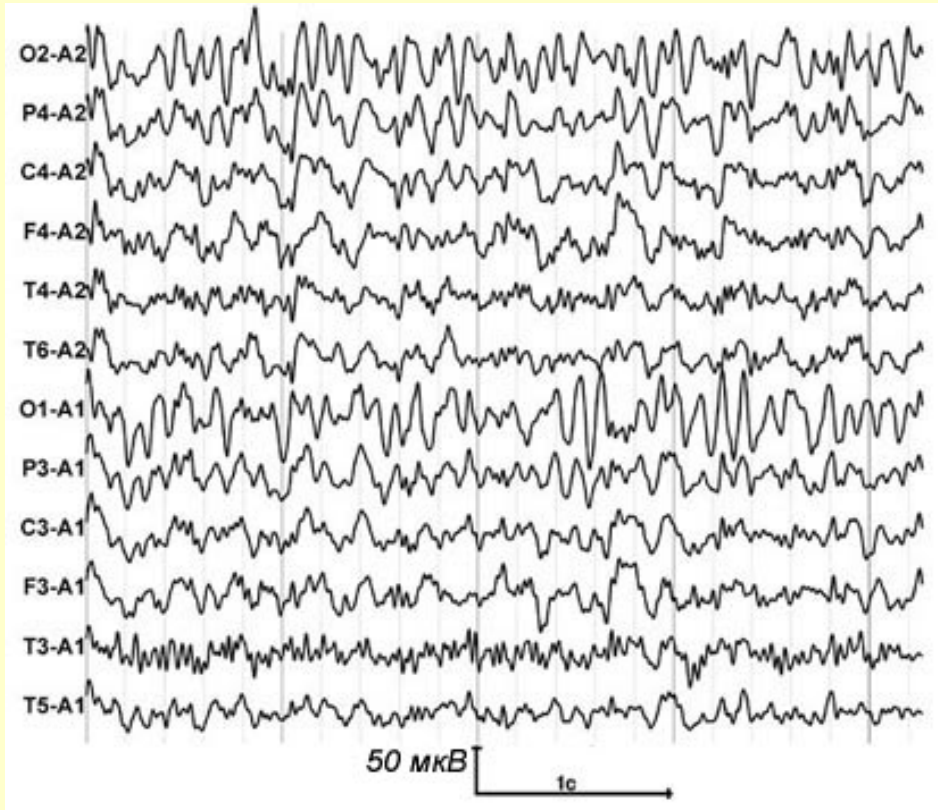
Как отражаются на ЭЭГ основные структурные преобразования нейронной организации мозга в процессе онтогенеза?

Adult EEG

Sokolova 14/03/0



5-year-old child EEG



Структурная основа нейронной интеграции в функциональных системах мозга

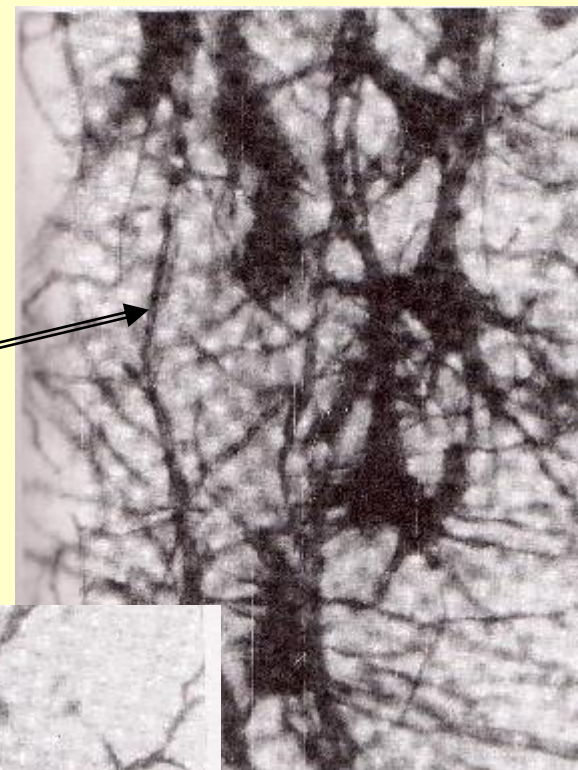
Уровни морфологической организации :

Ø Нейрон с его входами (дендритами) и выходами (аксон)

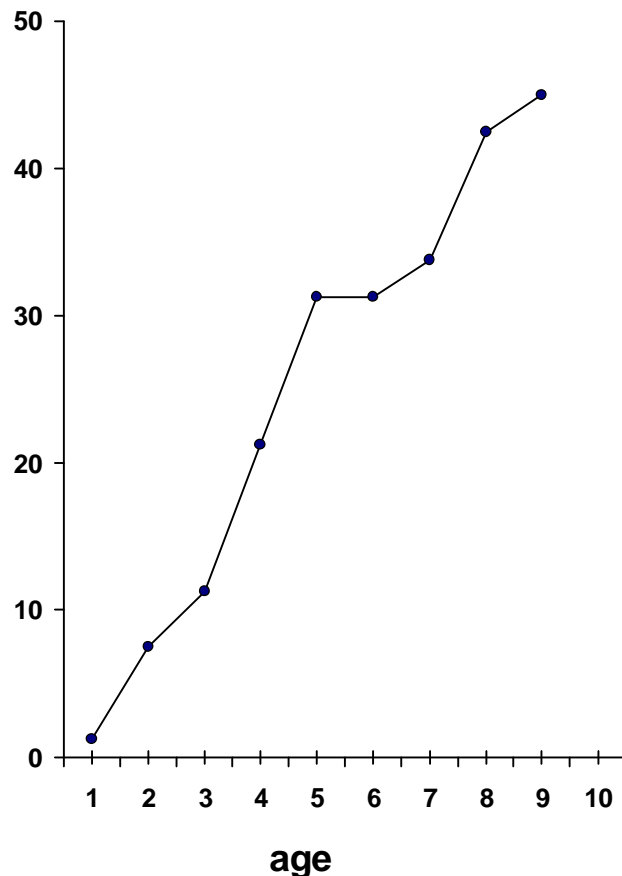
Ø Группировки нейронов (миниколонки) (30 μm), мини ансамбли (гнездные и лестничные группировки)

Ø Малые нейронные сети объединены в более крупные единицы – морфологические вертикальные модули (нейро-глиально-сосудистые макро ансамбли) (300 – 600 μm)

Ø Внутрикорковые и межкорковые связи, а также связи коры и глубинных регуляторных структур



Основные этапы морфофункционального созревания коры и формирование альфа-ритма



Developmental spurts in level of relative energy in alpha EEG in occipital (O-P) area (Matousek and Petersen, 1973)

0-1 - Рост и дифференциация нейронов в **проекционных** областях коры. Рост и апикальных дендритов и их ветвление. Формирование вертикальных связей пирамидных нейронов проекционных зон.

1-3 - Развитие **вертикальной** организации нейронных ансамблей **проекционных и ассоциативных зон**. Формирование горизонтальных связей звездчатых нейронов. Развитие корково-подкорковых связей.

3-5 - Развитие **горизонтальных связей во всех зонах коры**. Рост специализации нейронов.

5-6 - Рост относительного объема белого вещества (нейронных коллатералей) в ассоциативных зонах

6-7 - Интенсивное развитие **нейронной организации ассоциативной коры**

7-8 - формирование **иерархии локальных нейронных ансамблей в ассоциативных и проекционных зонах**

8-10 - формирование распределенной горизонтальной нейронной сети, включающей специализированные нейронные ансамбли различных корковых зон.

Морфологическое развитие коры головного мозга на первом году жизни

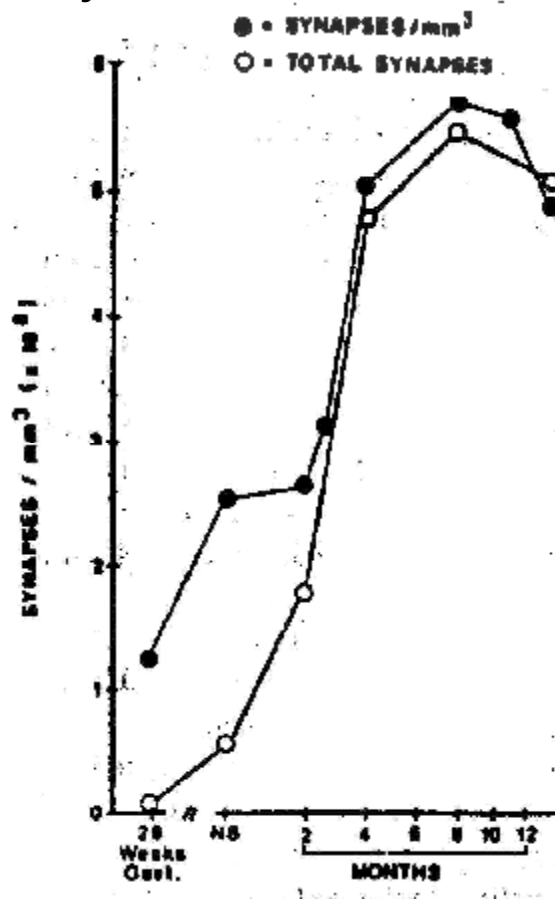
У новорожденного нейронные колонки в 19 зрительном поле состоят из 1-2 близко расположенных рядов слабо дифференцированных нервных клеток

В течение первого года жизни происходят наиболее интенсивный рост **ширины коры** во всех зрительных зонах. В 17 и 18 полях эти изменения наиболее выражены в первом полугодии (в 1,6 раза), в 19 поле в течение всего года (в 1,7 раза).

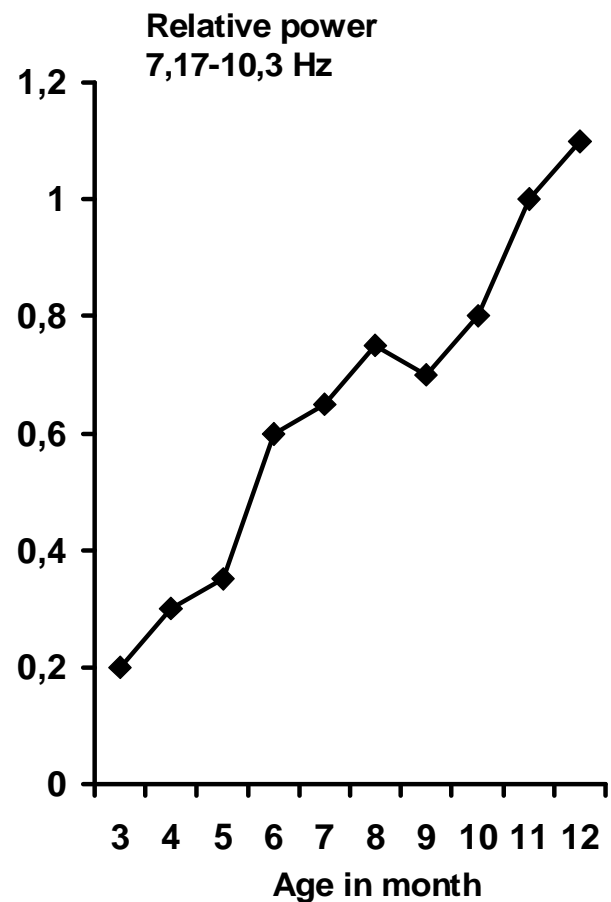
В этот же период происходят наиболее выраженные преобразования нейронов 17 и 18 поля, приводящие к их **дифференциации**.

Выраженное увеличение **толщины коры** происходит и в другой сенсорно-специфической зоне – соматосенсорной (поле 3), в полях 1 и 2 этот процесс продолжается до 3 – х лет.

Развитие нейронов зрительной проекционной коры и увеличение мощности альфа-ритма ЭЭГ затылочной области

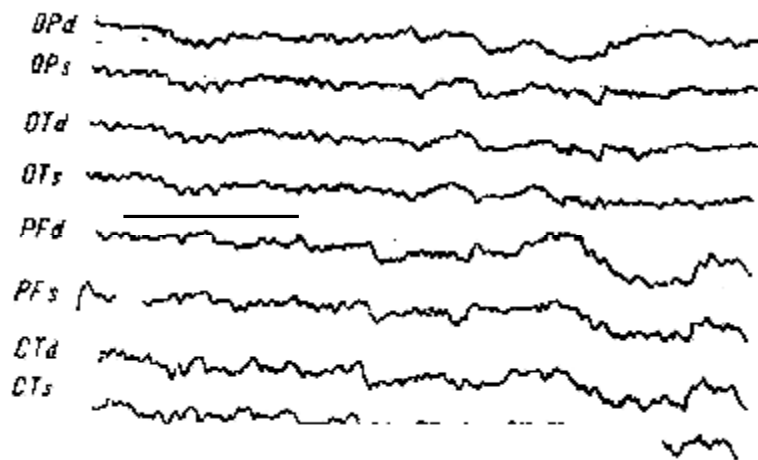


Рост синаптической плотности и общего числа синапсов в зрительной коре в течение первого года жизни (Huttenlocher, 1992)

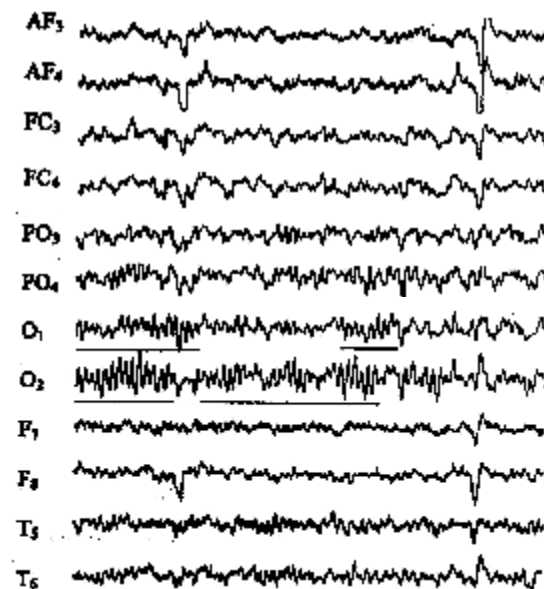


Увеличение относительной мощности альфа-ритма ЭЭГ затылочной области в течение первого года жизни (Mazuno et al., 1970)

Изменения ЭЭГ в течение первого года жизни



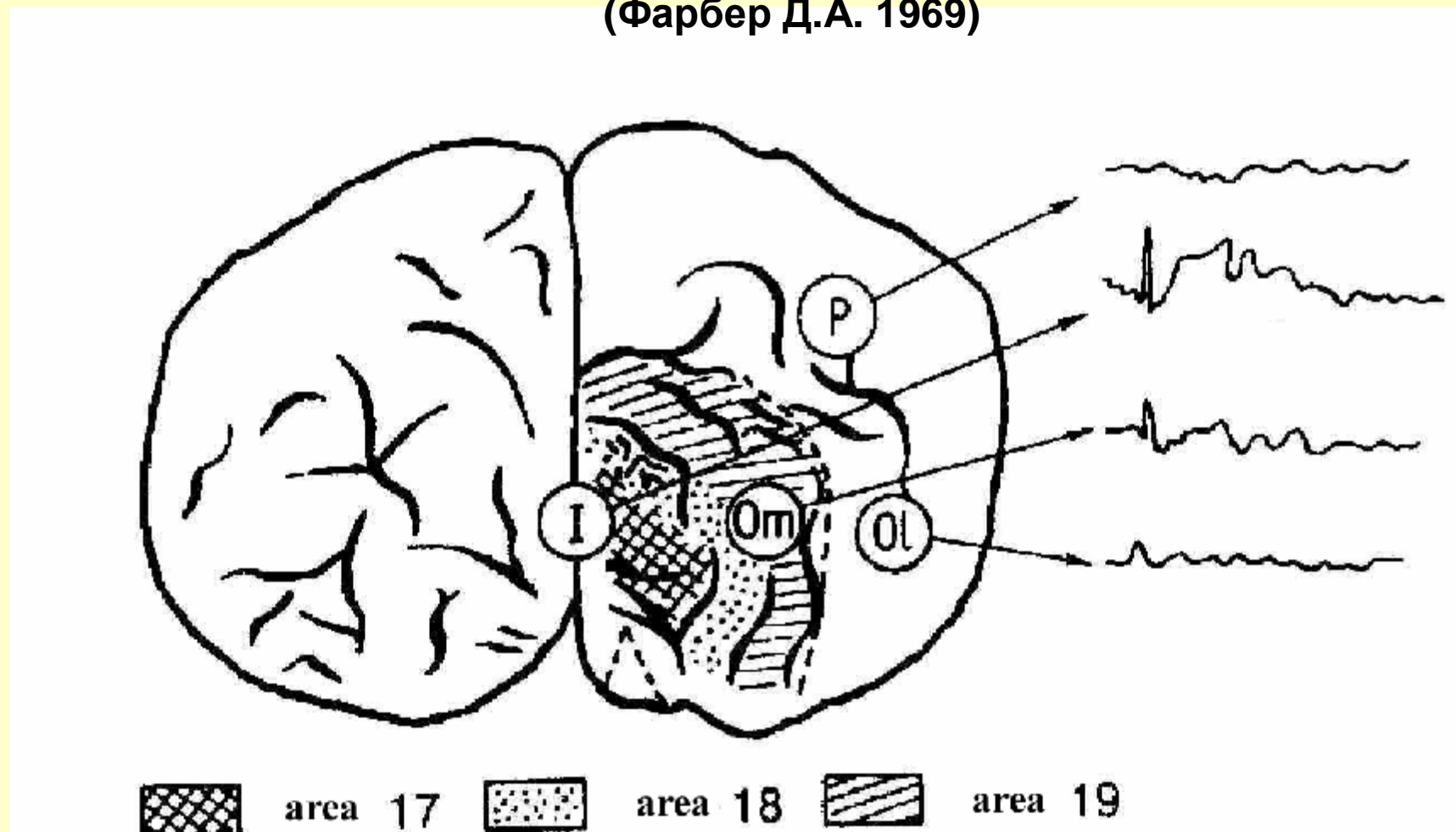
ЭЭГ новорожденного.
Ритмические колебания 4-6 Hz в
каудальных отделах. (Фарбер,
1969)



ЭЭГ ребенка 8 мес. Ритм 6-9
Гц в затылочных областях.
(Строгонова, 1999).

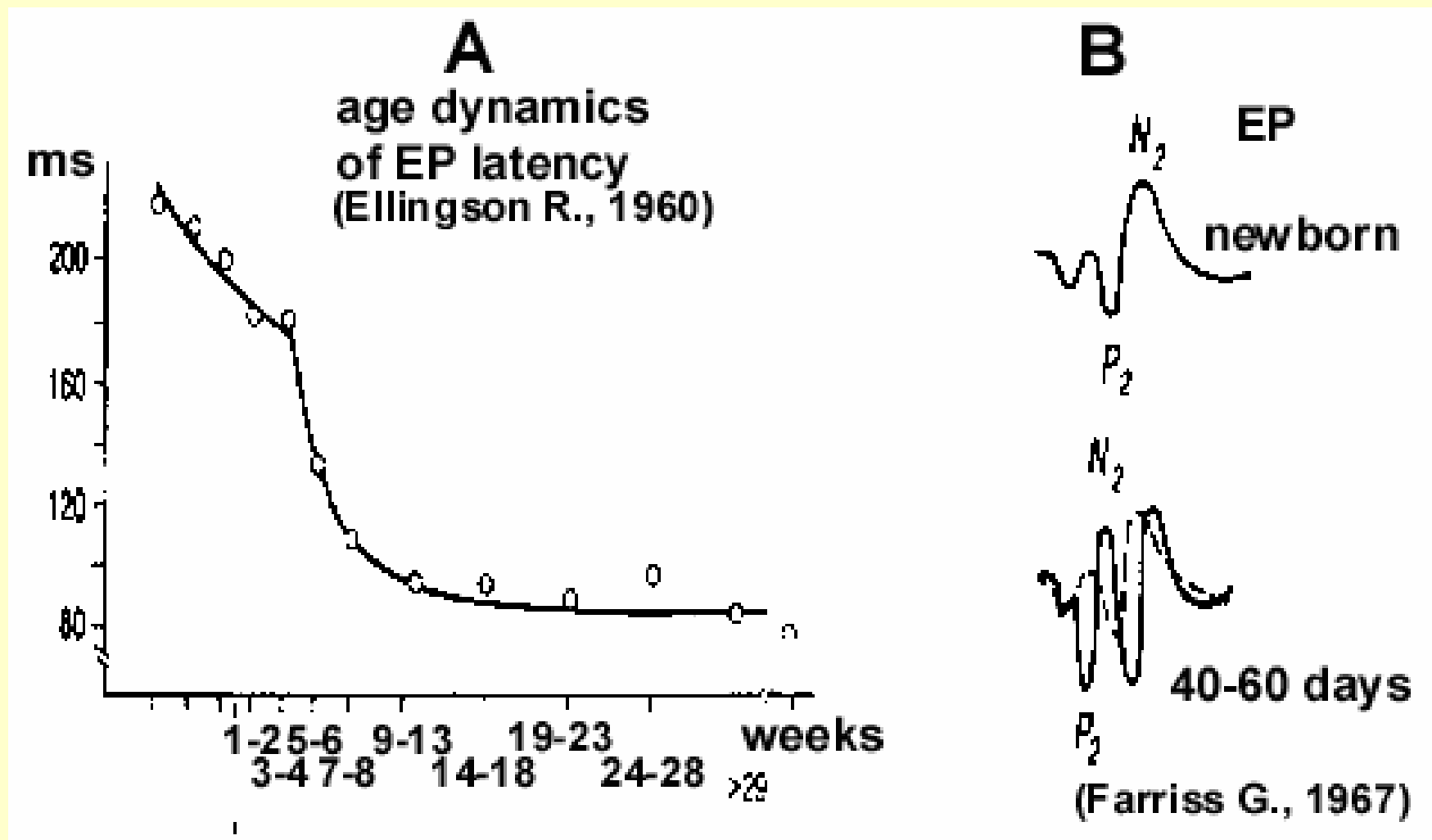
Выраженное увеличение представленности и амплитуды альфа-ритма, связанное с морфо-функциональным созреванием нейронного аппарата зрительной проекционной коры

**Вызванные потенциалы на вспышку света у
новорожденного
(Фарбер Д.А. 1969)**



**Реакция наблюдается только в зрительной
проекционной коре**

Изменения параметров зрительного ВП младенцев от рождения до 2-3 месяцев.



Усложнение структуры и сокращение латентности

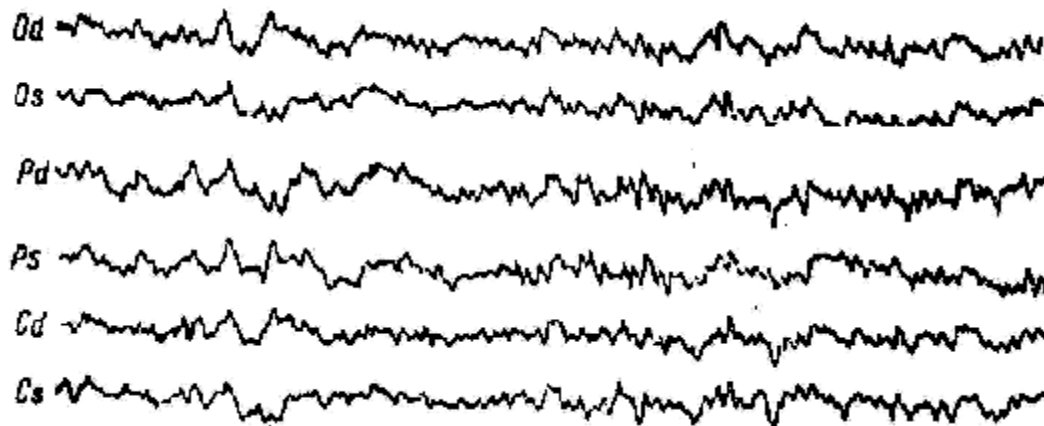
**Морфологическое развитие ассоциативной коры
от 1 года до 3-х лет**

**ØВ течении первых 2-х лет жизни
существенно увеличивается толщина
нейронных колонок в зрительных
ассоциативных зонах и ТРО (третичная
ассоциативная височно-теменно-затылочная
область)**

**ØВ тот же период усложняется ветвление
дендритов и аксонов.**

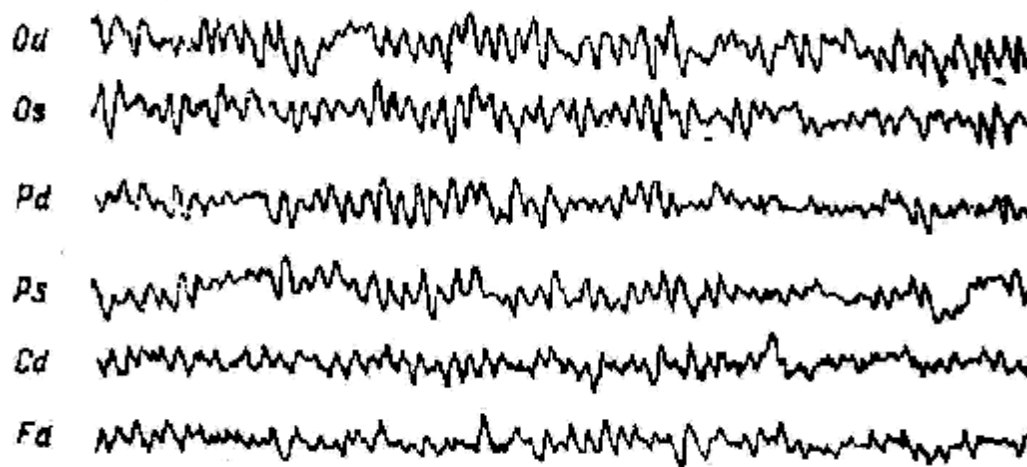
Изменения ЭЭГ у детей от 1 года до 3 -х лет (Фарбер, 1969)

14 месяцев



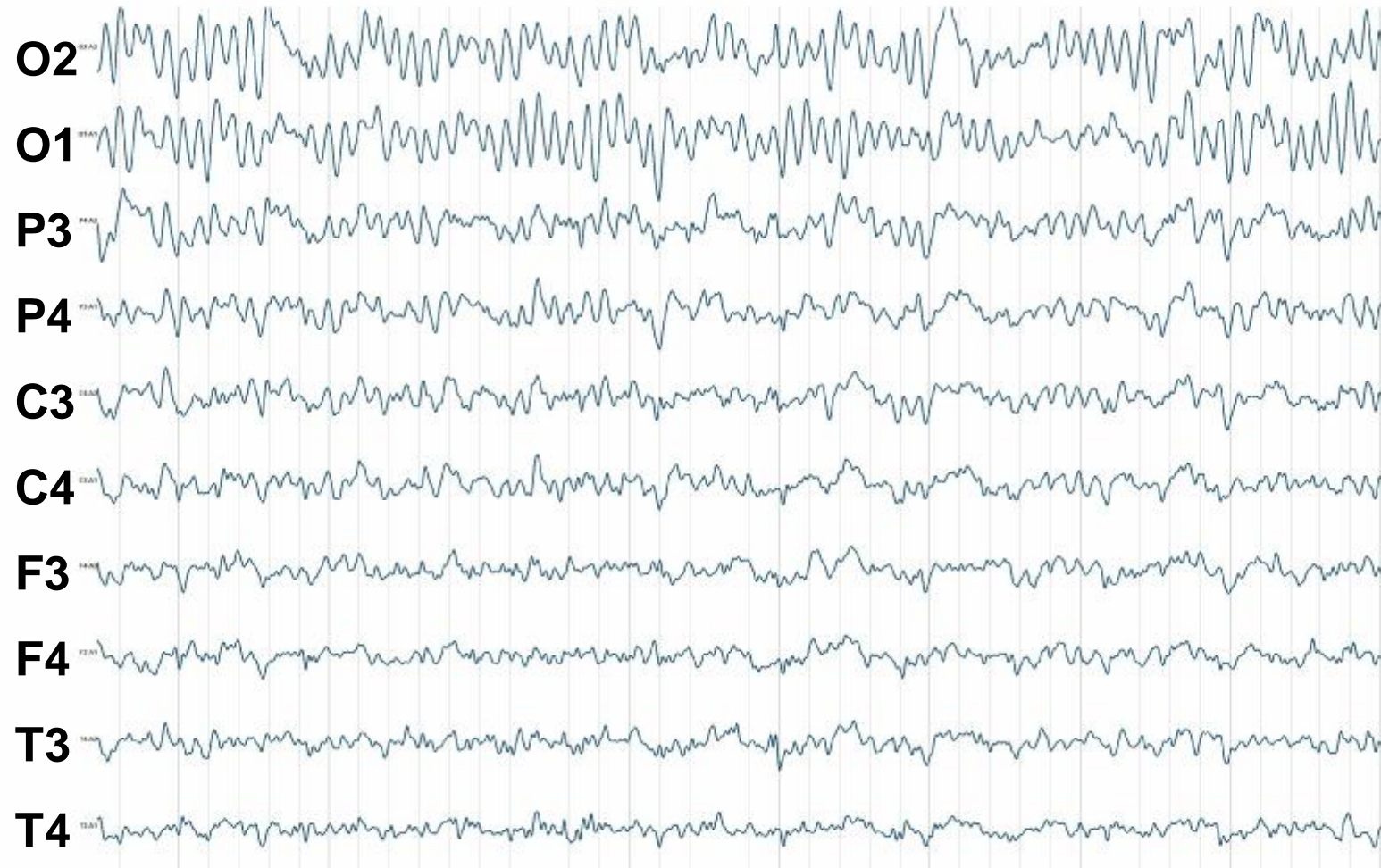
Увеличение представленности медленных колебаний на ЭЭГ, связанное с созреванием таламо-кортикальных и лимбико-кортикальных связей

3 года



Выраженное увеличение амплитуды и представленности альфа-ритма во всех зонах коры, связанное с морфофункциональным созреванием внутризональных и дистантных связей коры и формированием множества "фокусов" альфа-ритма

ЭЭГ ребенка 2, 5 лет



Морфологическое развитие коры головного мозга от 3 до 7 лет

- ü К 5-7 годам пирамидные и звездчатые клетки в слоях III и IV зрительной коры приобретают форму свойственную взрослым**
- ü Кроме узких колонок у детей к 5 годам уже формируются широкие группировки корковых нейронов, которые чаще встречаются в ассоциативной коре**
- ü Толщина коры в 19 зрительном ассоциативном поле увеличивается до 7 лет**
- ü В соматосенсорной коре увеличиваются размеры пирамидных и вставочных нейронов, изменяется их форма и увеличивается ветвление. Наиболее интенсивно эти процессы протекают в период от 3 до 6 лет.**
- ü Во фронтальной коре толщина нейронных группировок в вертикальных колонках значительно увеличивается во всех областях к 5 годам**
- ü К 5-6 годам система горизонтальных связей между корковыми зонами становится существенно более сложной благодаря удлинению и увеличению ветвления латеральных и базальных дендритов пирамидных нейронов и развитию боковых ответвлений апикальных дендритов**

Структурные преобразования в коре головного мозга человека в процессе онтогенеза. Задняя ассоциативная зона (поле 37, ТРО)

Ребенок 6-ти лет

Ребенок 3 –х

Новорожденный



**Cyto-architectonics in Layer III
of TPO**

Возрастные изменения ансамблевой организации нейронных группировок в задней ассоциативной коре

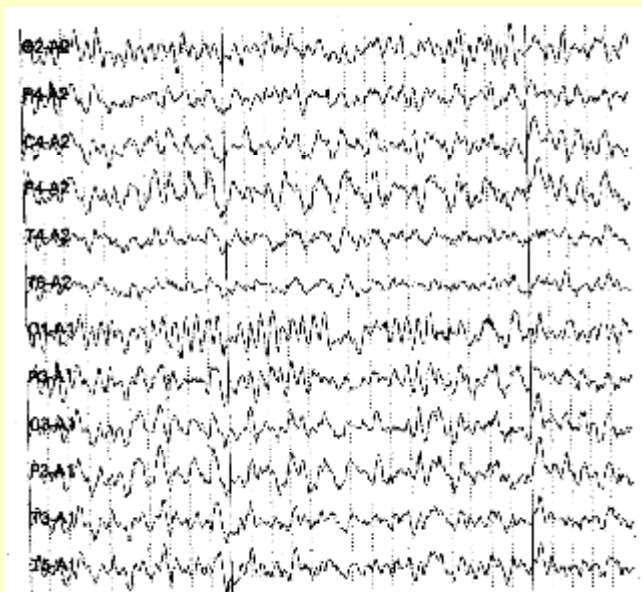
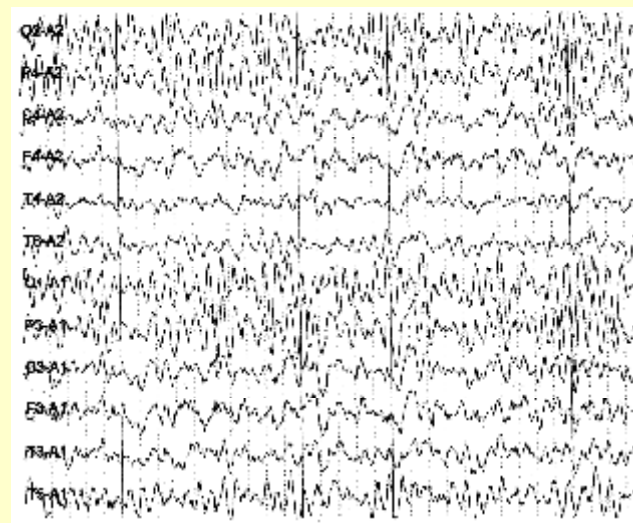
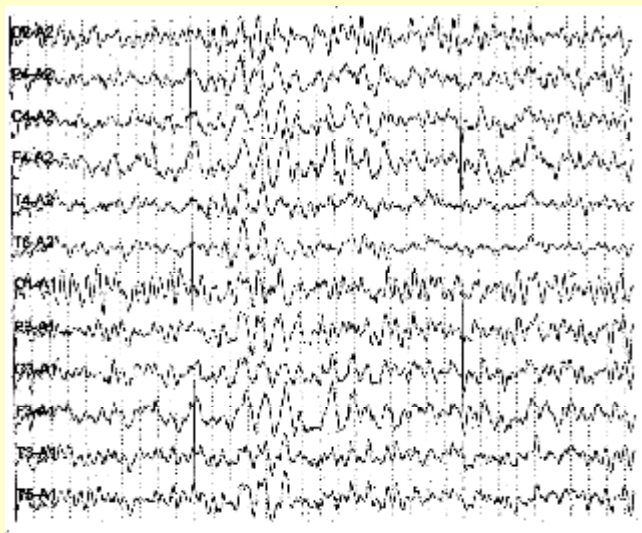


3 года



7 лет

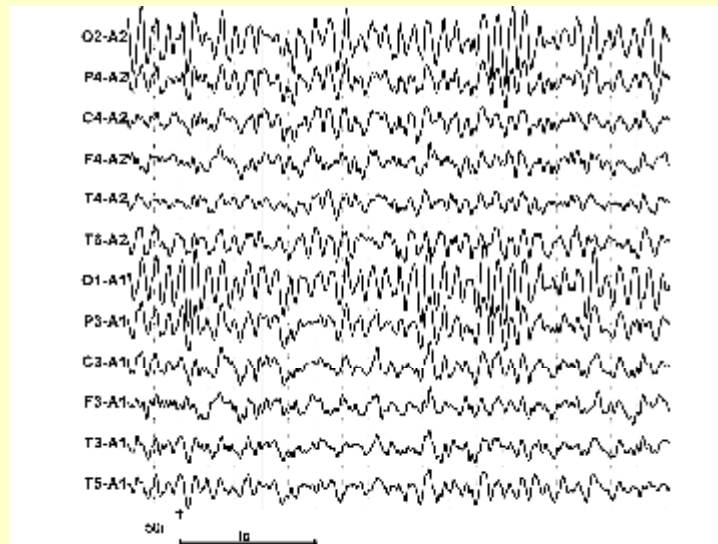
Индивидуальные варианты ЭЭГ детей 4-5 лет



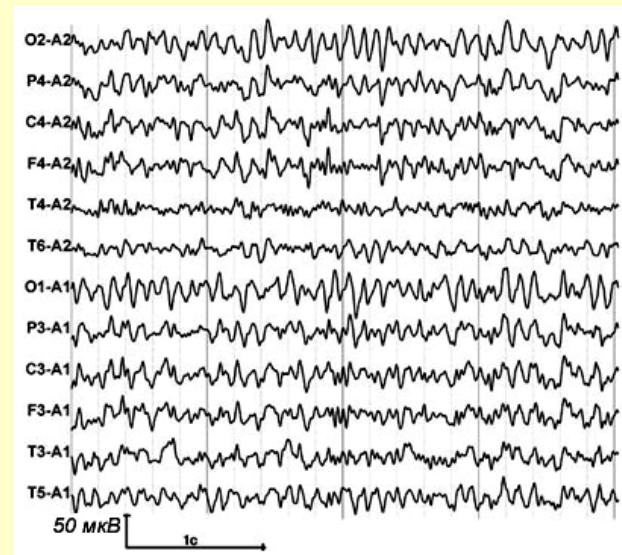
- **Альфа-ритм**, локализованный в каудальных областях мозга, становится более регулярным и частым (8-9 Hz)
- Появление различных типов билатерально-синхронных волн в различных зонах мозга отражает активность **глубинных регуляторных структур** разного уровня и их развитие их связей с корой.

Варианты альфа-ритма в ЭЭГ детей 5-8 лет

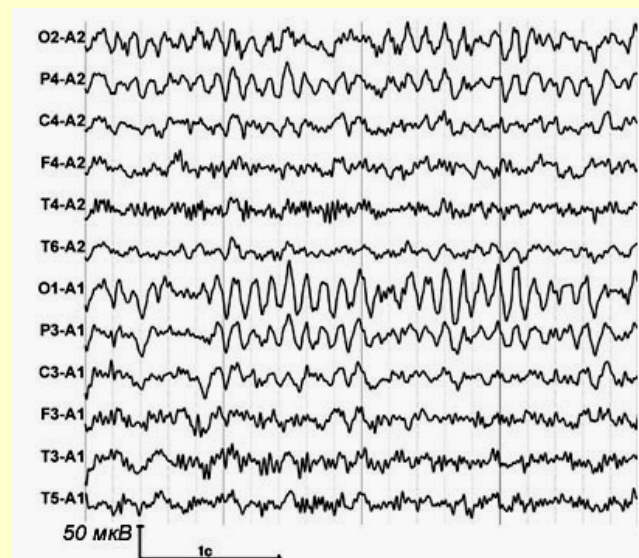
Регулярный модулированный



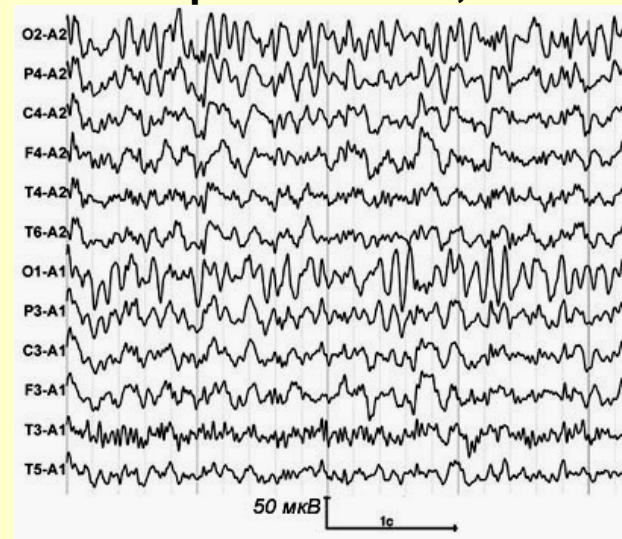
Дезорганизованный



Альфа-ритм сниженной частоты

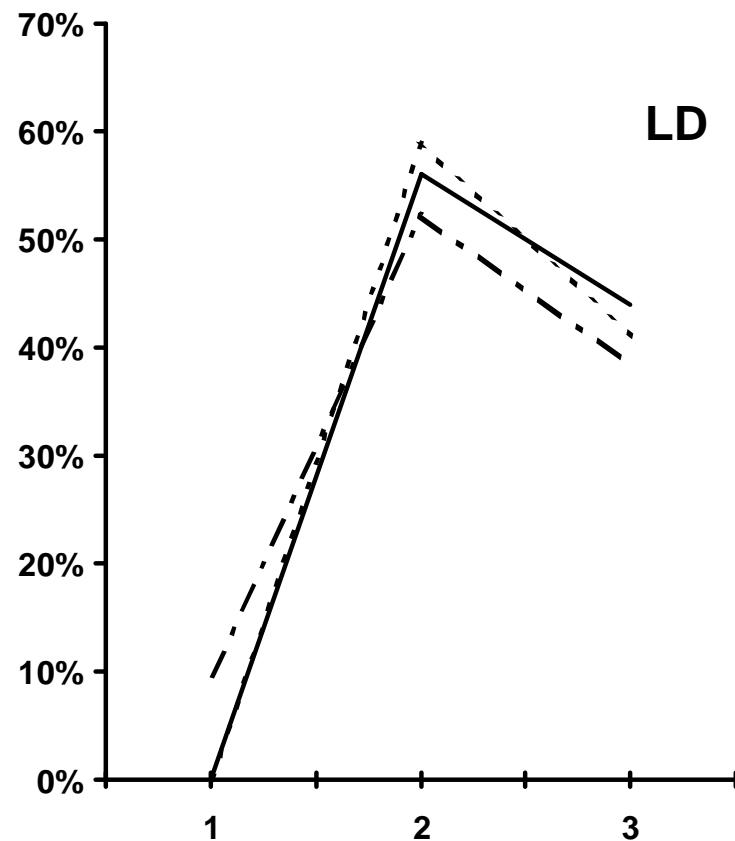
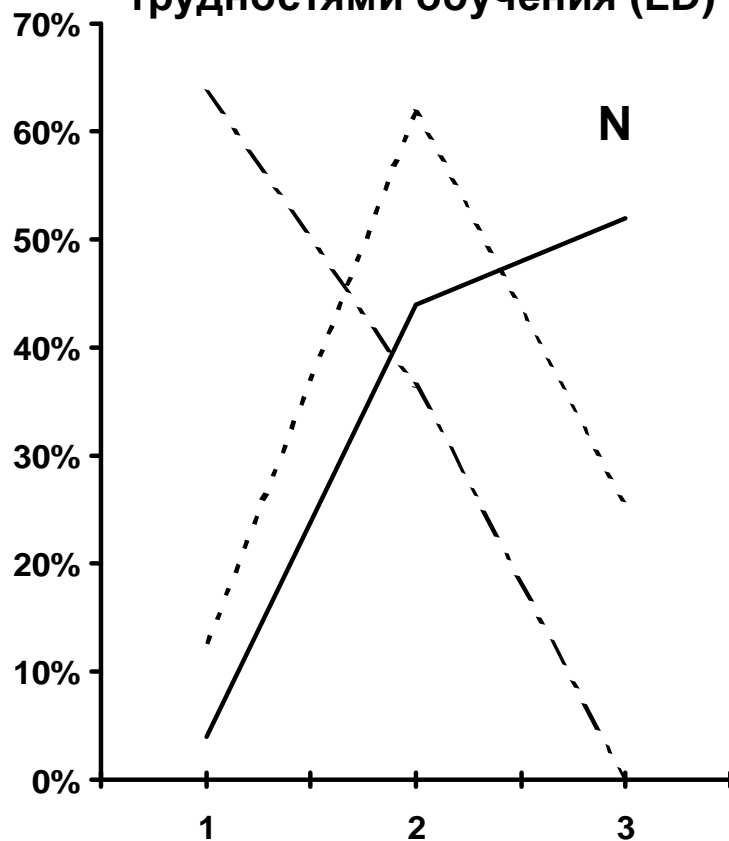


Полиритмичный (частота варьирует в интервале более, чем 4 Гц)



Функциональное созревание коры у детей 5-8 лет.

Распределение различных вариантов альфа-ритма (в %) на ЭЭГ детей 5-6, 6-7 и 7-8 лет с хорошей успеваемостью (N) и трудностями обучения (LD)



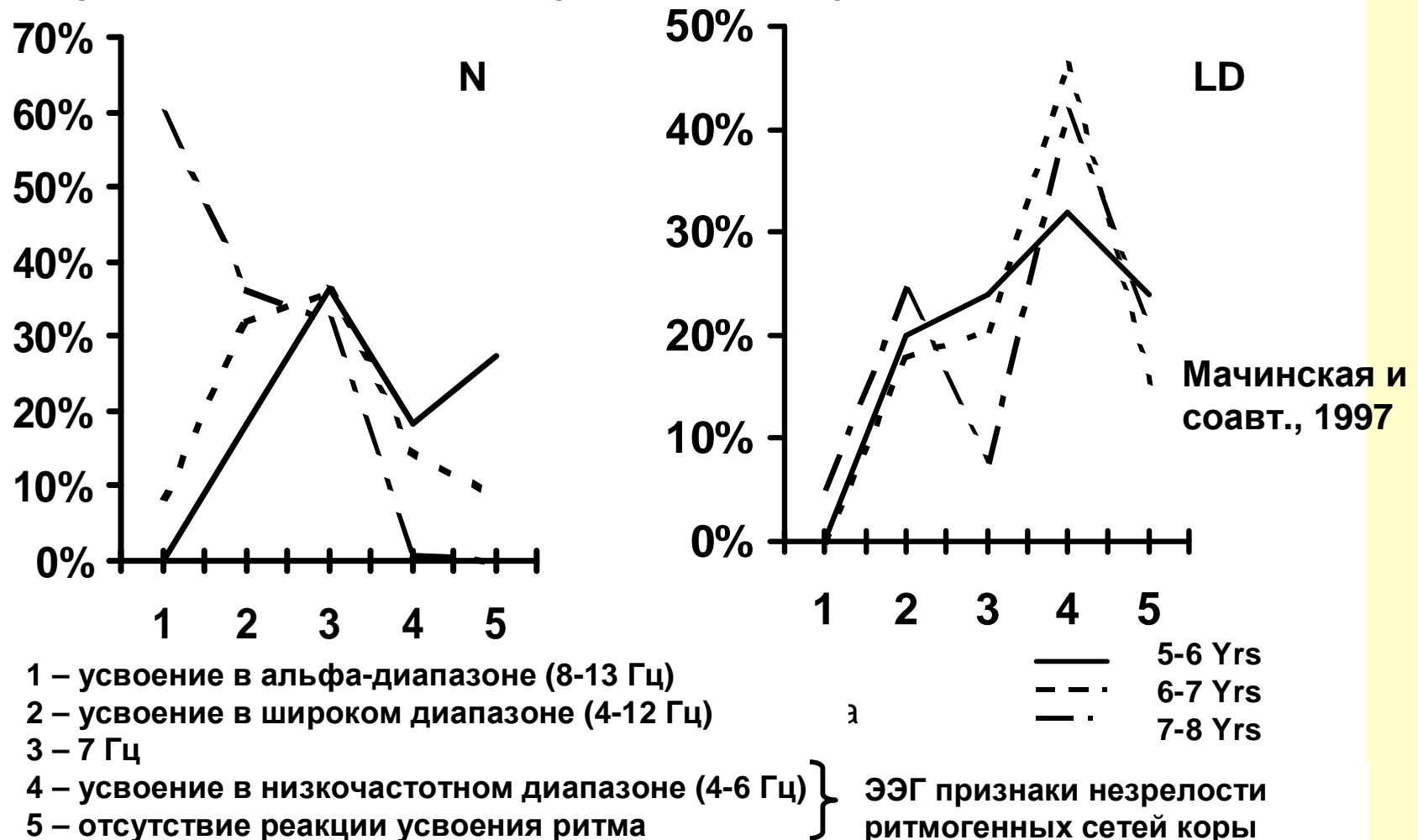
1 -регулярный модулированный альфа-ритм
2 - дезорганизованный альфа-ритм
3 - полиритмичный альфа-ритм или альфа-ритм
сниженной частоты - ЭЭГ признак функциональной
незрелости корковых нейронных сетей.

— 5-6 Yrs
- - - 6-7 Yrs
- · - 7-8 Yrs

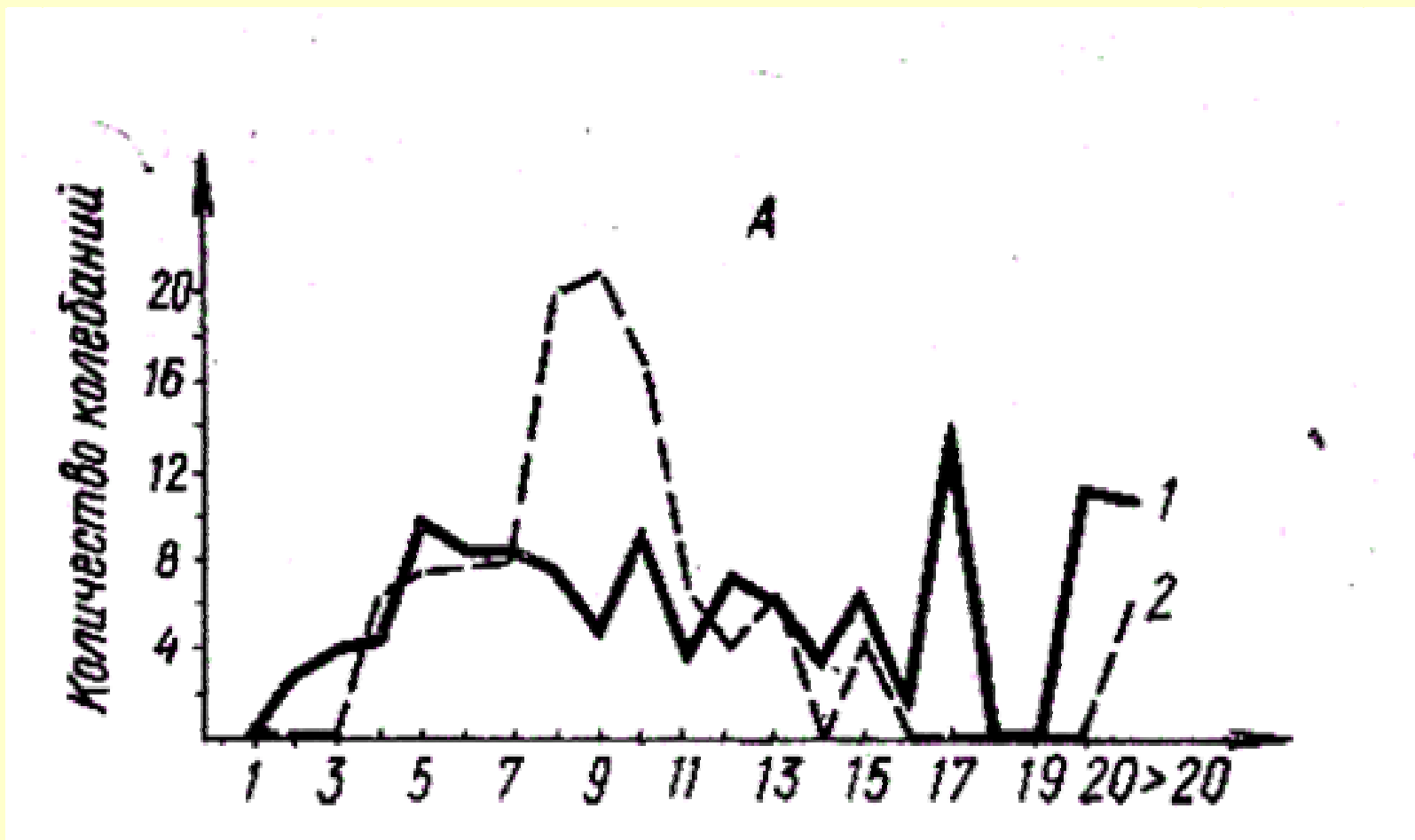
Мачинская и
соавт., 1997

Функциональное созревание коры у детей 5-8 лет. Реакция усвоения ритма

Распределение различных вариантов реакции усвоения ритма мельканий у детей трех возрастных групп с хорошей успеваемостью (N) и трудностями обучения (LD)



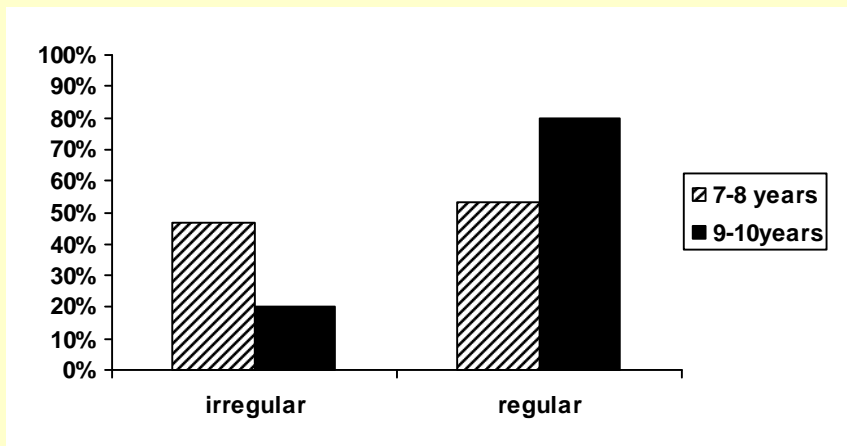
Формирование основного ритма у ребенка дошкольного возраста



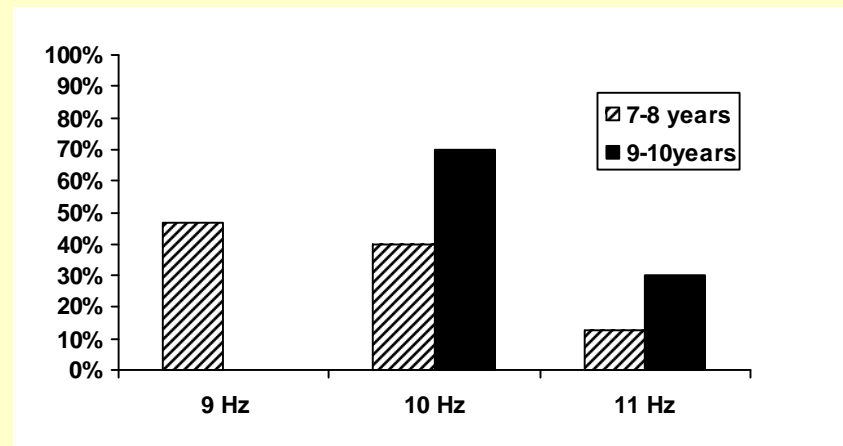
Частотный спектр ЭЭГ одного и того же ребенка в 5 (1) и 6(2) лет (Фарбер, 1969)

Возрастные изменения альфа-ритма в период от 7-8 до 9-10 лет

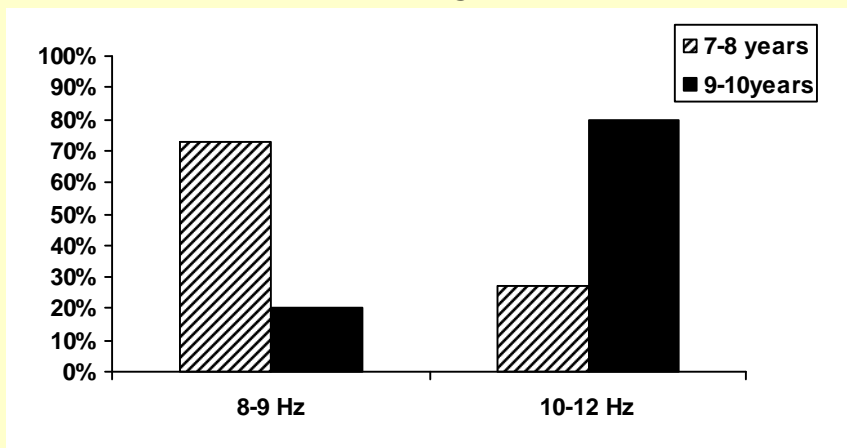
Характер альфа-ритма



Частота альфа-ритма



Частота реакции усвоения ритма



В возрасте 9-10 лет альфа-ритм становится более регулярным и быстрым, что соответствует прогрессивному формированию корковых нейронных сетей.

Мачинская, 2001

ЭЭГ критерии соответствия уровня развития ЭА коры возрастной норме для детей дошкольного и младшего школьного возраста.

Уровень развития ритмогенных структур коры				
ЭЭГ признаки	возраст			
	5-6 лет	6-7 лет	7-8 лет	9-10 лет
Характер альфа-ритма				
полиритмичный	+	+	Н	Н
Сниженной частоты	+	+	Н	Н
Дезорганизованный и/или заостренный	+	+	+	+
Регулярный модулированный 8-9 Гц	-	+	+	+
Регулярный модулированный 10-11 Гц	-	-	-	+
Реакция основного ритма на ритмическую фотостимуляцию				
Отсутствие следования	+	Н	Н	Н
Следование ритму 4-6 Гц при отсутствии усвоения частот в диапазоне 7-12 Гц	+	+	Н	Н
Следование ритму 7 Гц изолировано и/или наряду с усвоением 4-6 Гц	+	+	Н	Н
Следование ритму в диапазоне альфа-частот 8-9 Гц изолировано или наряду с другими частотами	-	+	+	+
Следование ритму в диапазоне альфа-частот 10-12 Гц изолировано или наряду с другими частотами	-	-	+	+

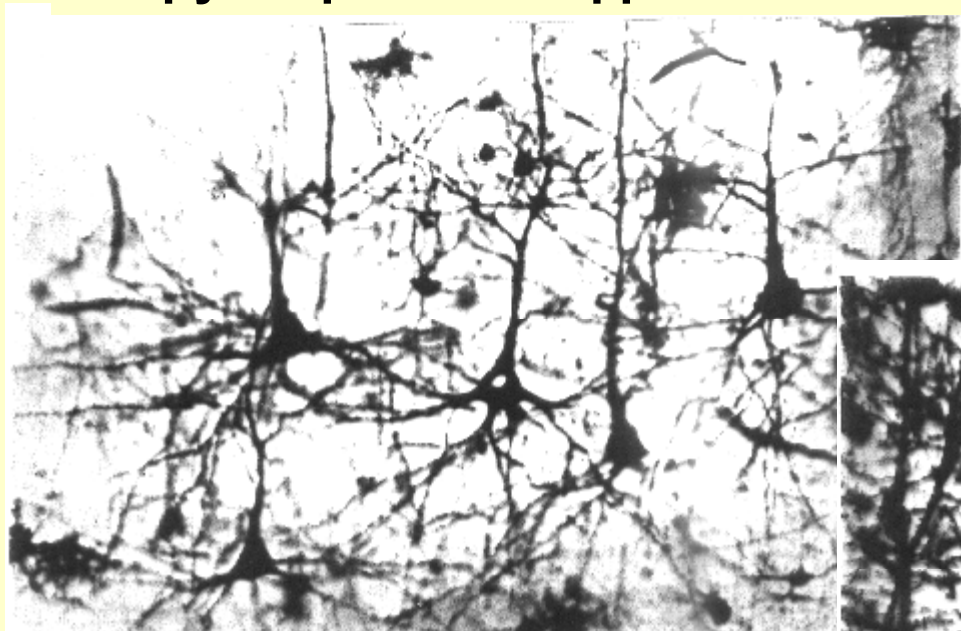
www.neurodev.net.ru

Структурные преобразования неокортекса человека в лобной ассоциативной коре (поля 8, 10, 45)

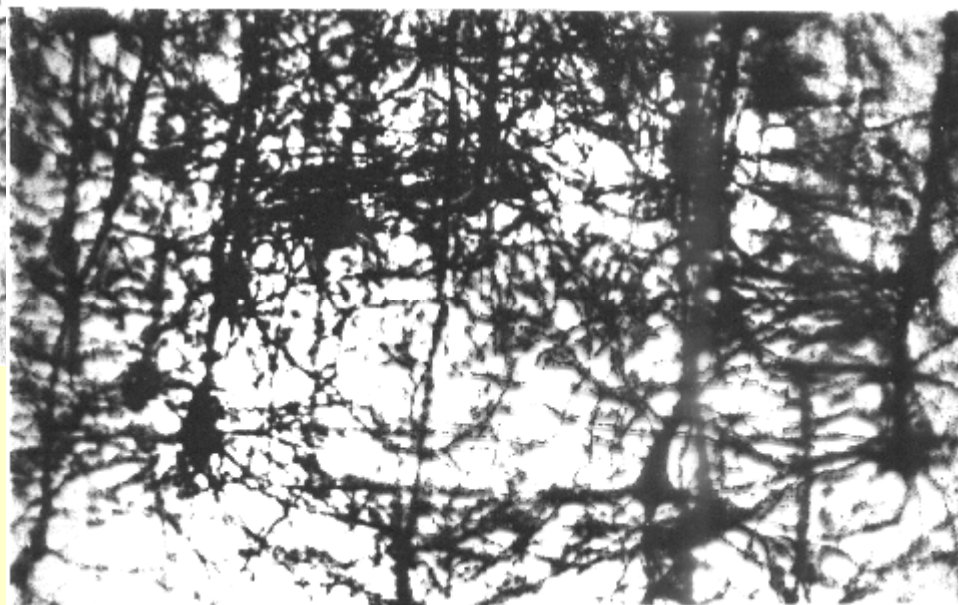
Развитие ансамблевой организации нейронных сетей:

- Ø У новорожденного есть вертикальная колончатая организация
- Ø К трем месяцам снижается плотность нейронов и в слоях III и V отмечаются отдельные группировки гнездного и лестничного типа.
- Ø К трем годам формируется отчетливая ансамблевая организация в лобной коре. Группировки включают до 12 типов нейронов
- Ø Толщина клеточных группировок наиболее интенсивно увеличивается в следующие возрастные периоды:
 - в поле 45 в 6 месяцев, 1 год и 3,9,10 и 18 лет;
 - в поле 8 в 6 месяцев, 1 год и 12 лет;
 - **во всех полях в 5 лет**

Возрастные изменения ансамблевой организации нейронных группировок во фронтальной ассоциативной коре (поле 10)



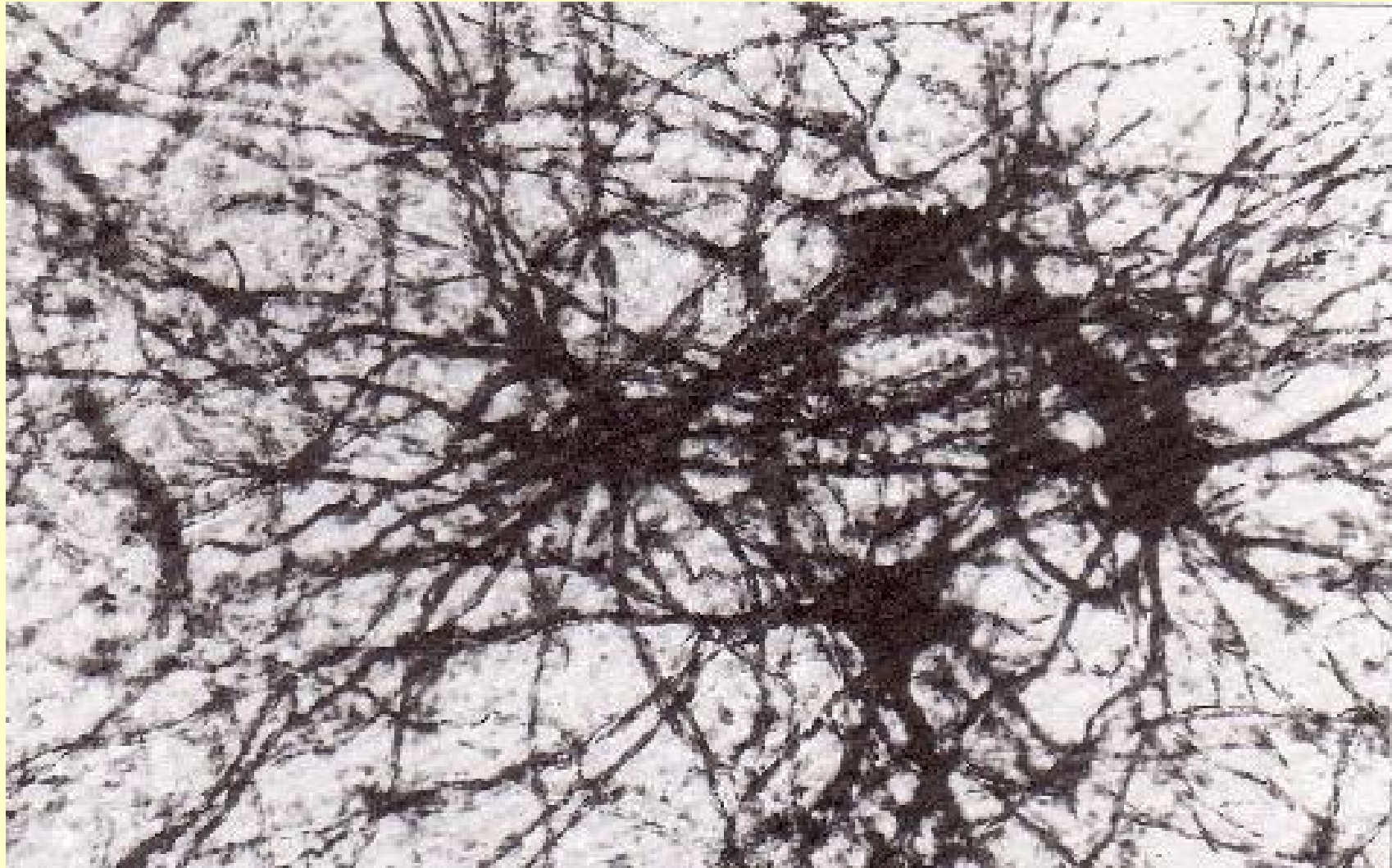
6-лет



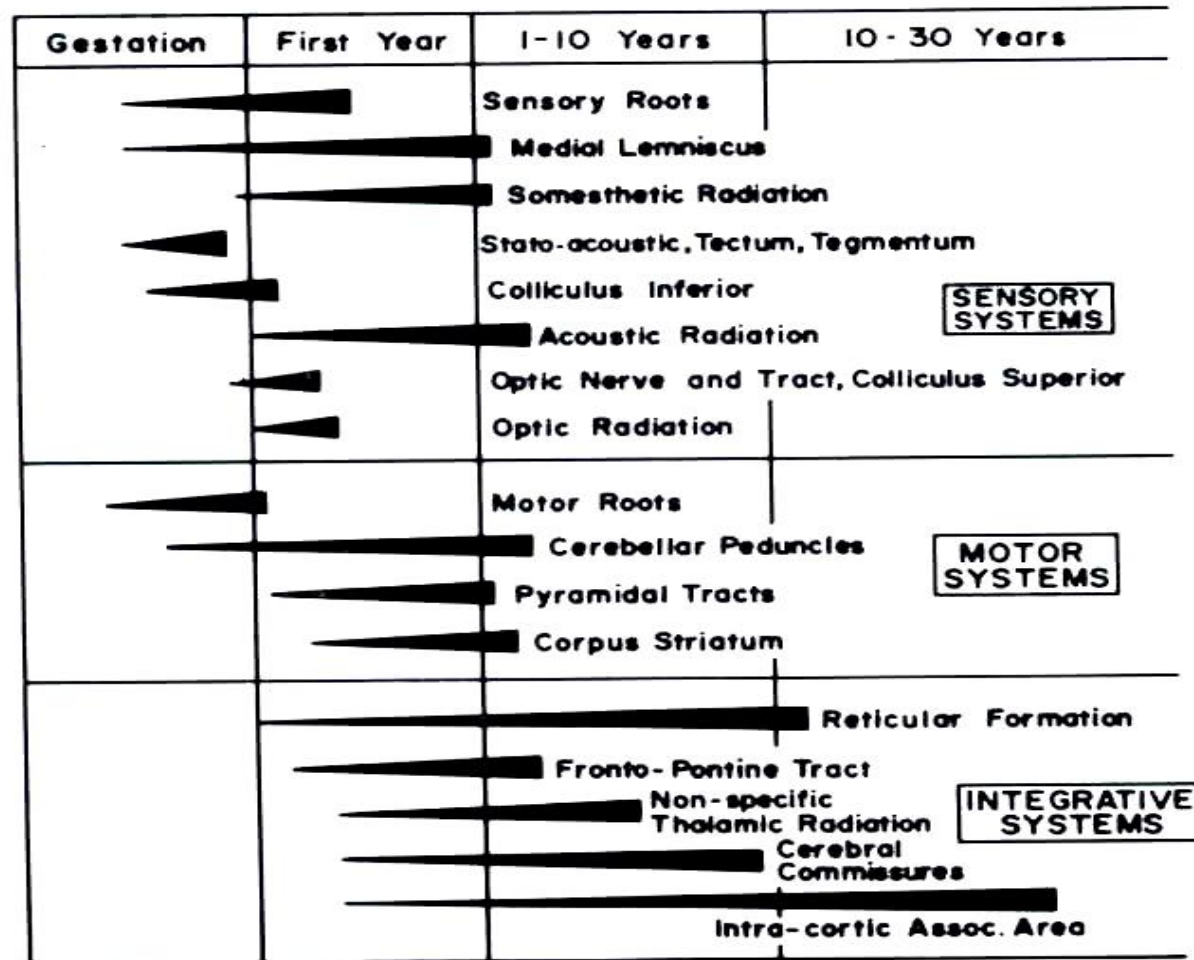
19-лет

Наиболее выраженные изменения происходят на первом году жизни и в 3, 5-6, 9-10, 12-14 и 18-20 лет

Нейронные ансамбли в лобной коре взрослого



Myelin Development

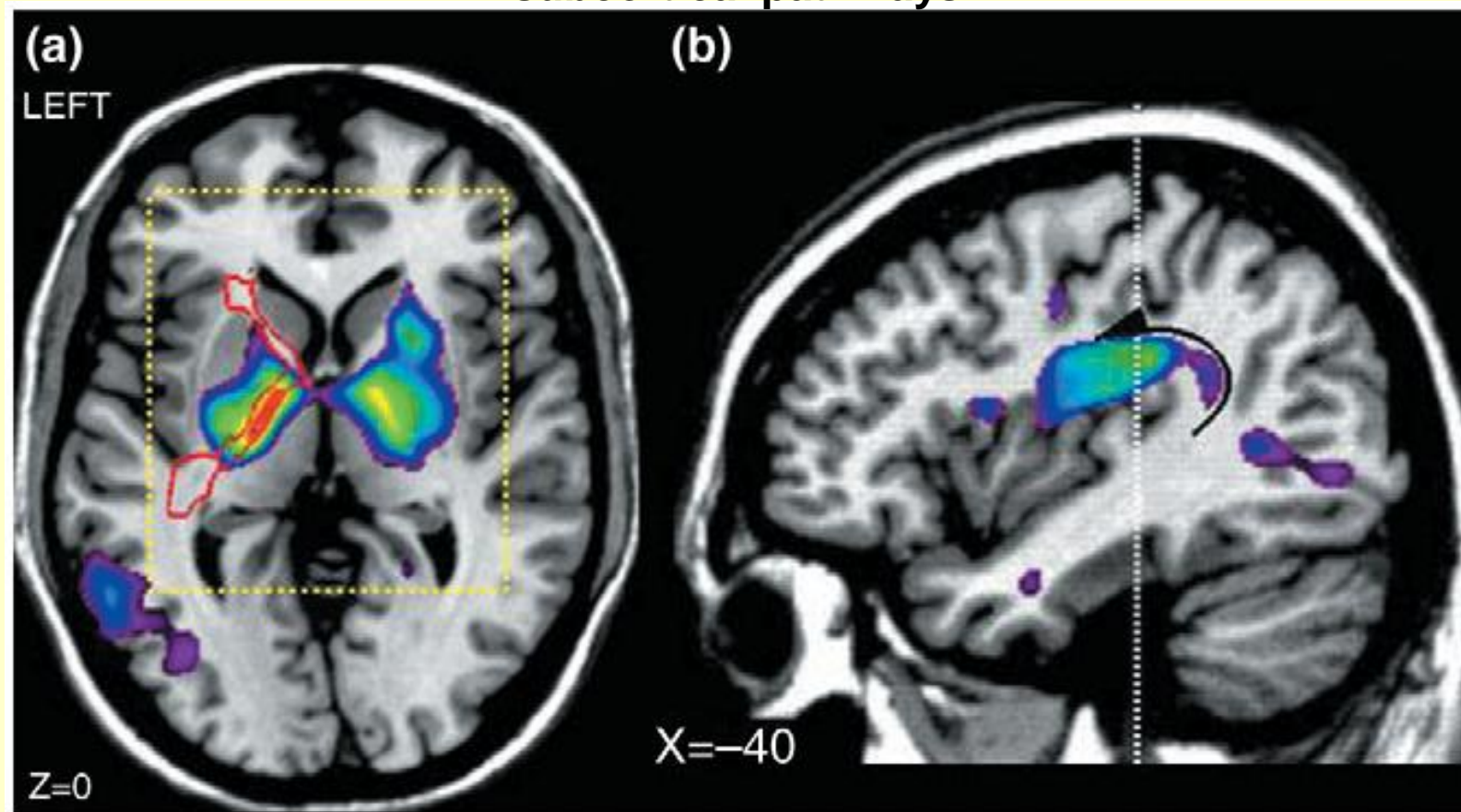


The myelogenetic cycles of regional maturation in the human brain (Yakovlev and Lecours 1967).

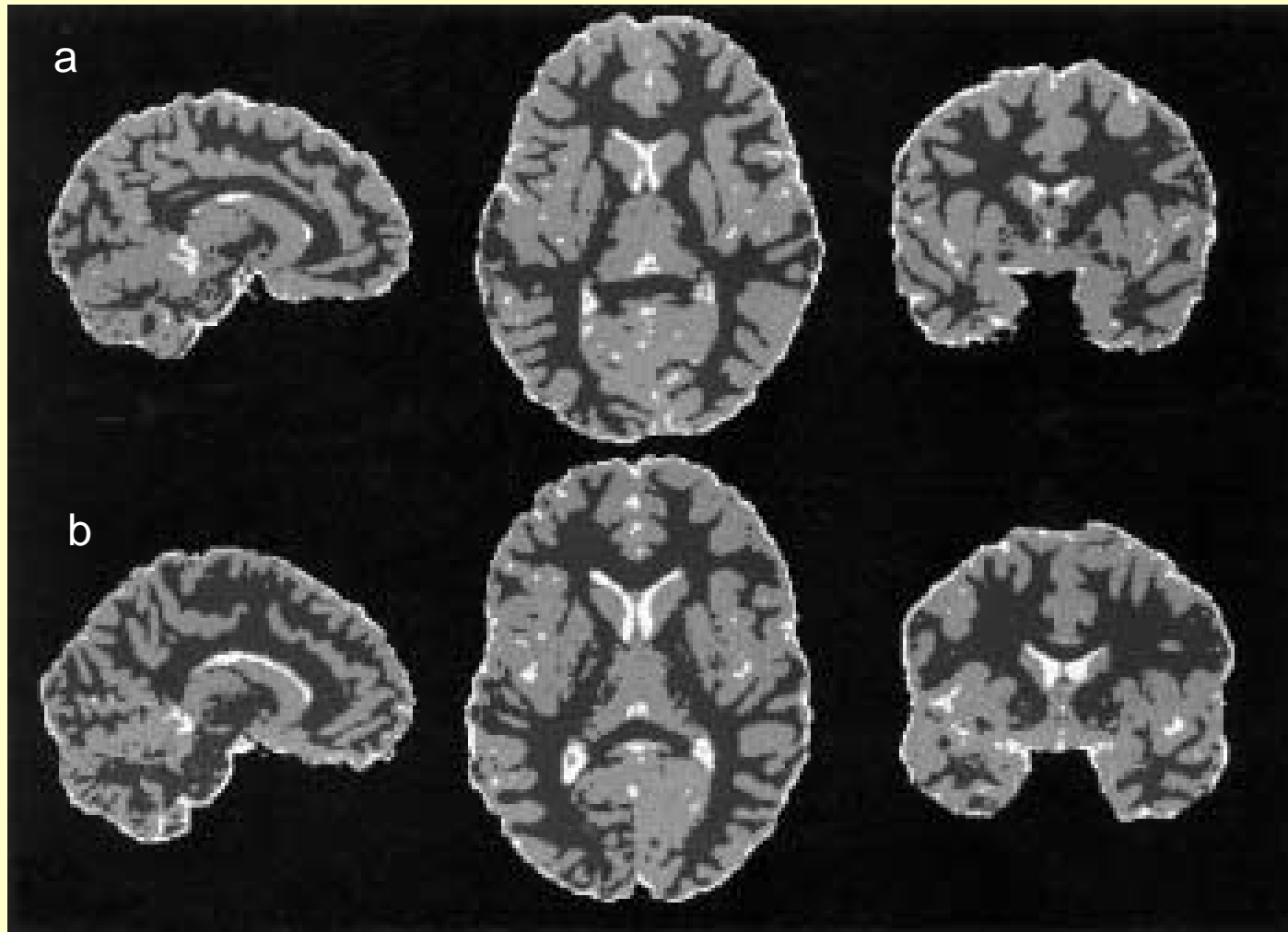
Что известно о постнатальном морфологическом созревании подкорковых структур и корково-подкорковых путей?

- 1. Микроструктура медиодорзального ядра таламуса (MD) формируется до 7-8 лет (Human Brain Development, 1965 (in Russian); Amunz V. Citoarchitectonics of mediodorsal nucleus of thalamus in human ontogenesis, 2000 (in Russian))**
- 2. Современные МРТ данные демонстрируют увеличение плотности белого вещества (проводящие пути) в возрасте от 4 до 19 лет в глубине лобных долей, во внутренней капсуле, в базальных ганглиях и таламических путях, а также мозолистом теле, т.е. структурах мозга, которые обеспечивают сложные формы познавательной деятельности. (Paus, T. et al. Science, 1999. 283, 1908–1911; Barnea-Goraly Cerebral et al. Cortex, 2005. 15(12):1848-1854)**

Postnatal morphological maturation of subcortical structures and cortico-subcortical pathways

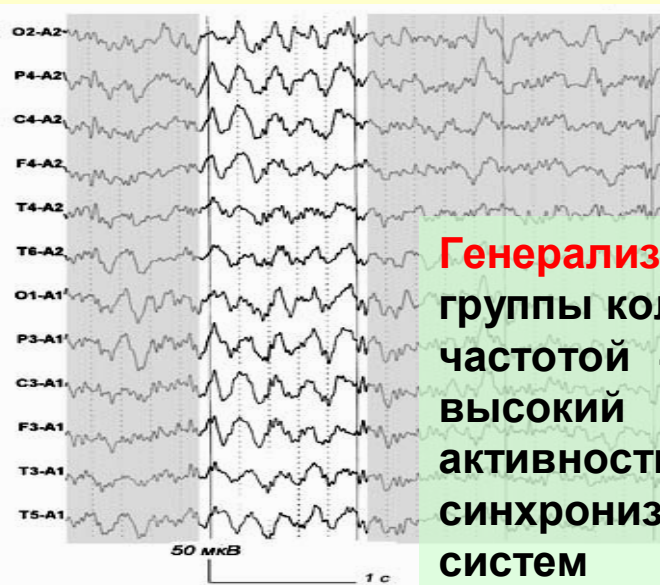


Age-related changes in white-matter density in (a) the internal capsule, and (b) the left arcuate fasciculus connecting the anterior (Broca) and posterior (Wernicke) speech regions. Thresholded maps of t-statistic values are superimposed on axial (capsule) and sagittal (arcuate) sections through the MR image of a single subject. The images depict the exact brain locations that showed statistically significant ($t = 4.0$) correlations between white-matter density and the subject's age (nZ111; age 4–17 yrs). Paus, T. et al. *Science*, 1999. 283, 1908–1911

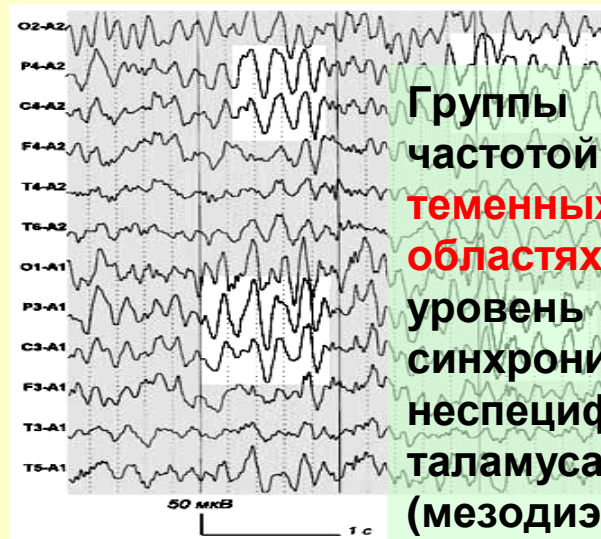


Representative spatially registered, tissue segmented images from one (a) 7-year-old individual and one (b) 15-year-old individual. All voxels that segmented as gray matter are shown in light gray, and **white-matter voxels are shown in dark gray**. CSF(cerebrospinal fluid) is shown in white. Note the 15-year-old's brain is 12% larger than the 7 year old's brain. The older participant has 19% more white matter and only 8% more gray matter, despite the overall volume difference. (*Sowell E. **Developmental Medicine & Child Neurology** 2002, 44: 4–16*)

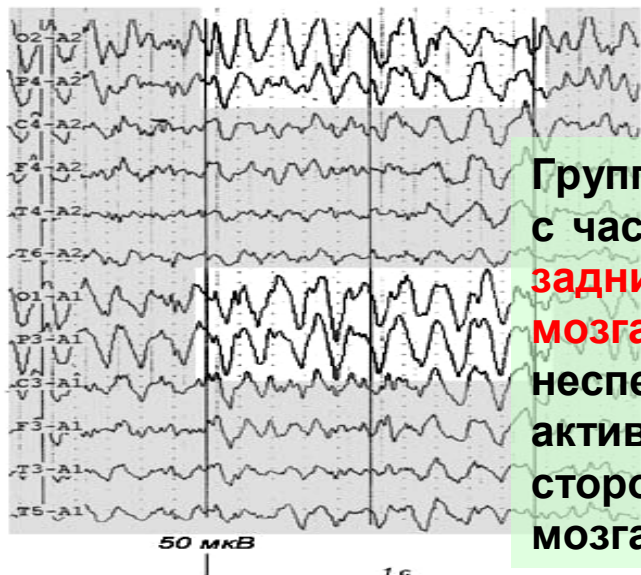
ЭЭГ паттерны, характеризующие функциональное состояние глубинных регуляторных структур мозга



Генерализованные группы колебаний с частотой 4-6 Гц - высокий уровень активности синхронизирующих систем ствола мозга



Группы колебаний с частотой 4-6 Гц в **теменных и центральных областях** - высокий уровень синхронизирующих систем таламуса (мезодизэнцефальный уровень)



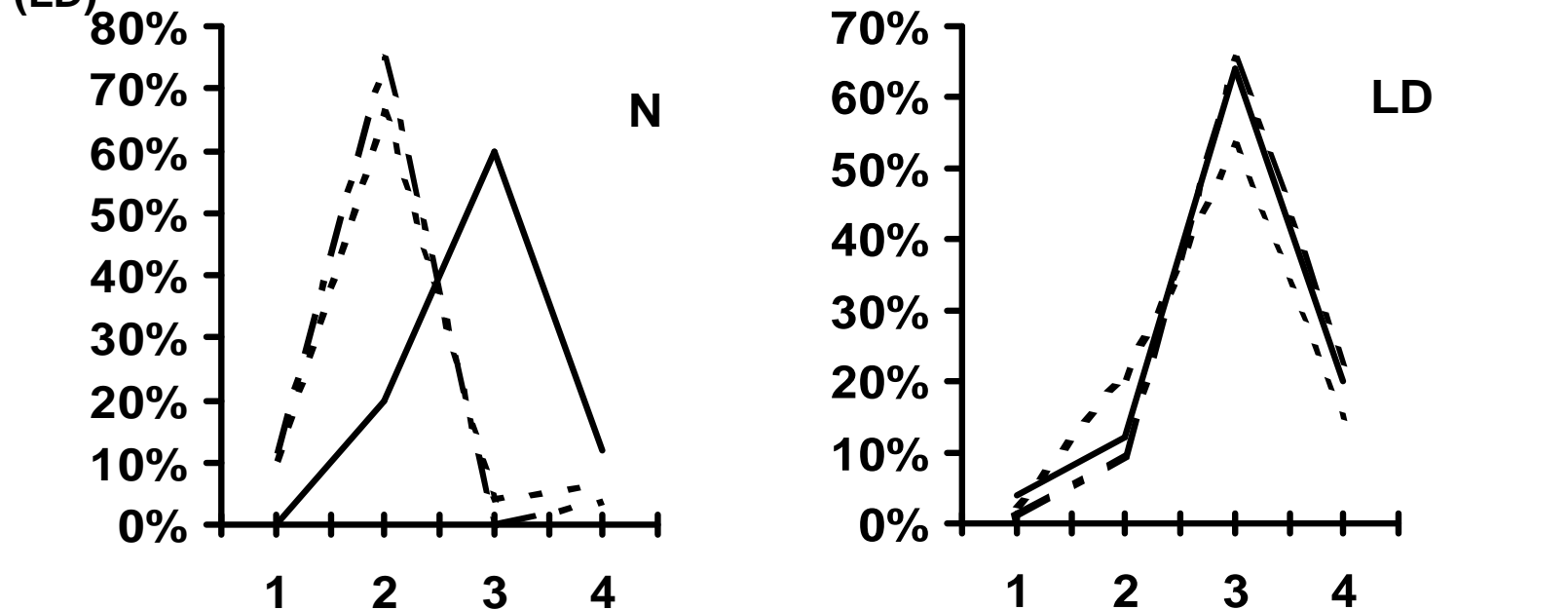
Группы колебаний с частотой 4-6 Гц в **задних отделах мозга** - дефицит неспецифической активации со стороны РФ ствола мозга



Группы колебаний с частотой 4-6 Гц в **передних отделах мозга** - изменение функционального состояния фронто-таламической регуляторной системы

Функциональное созревание глубинных регуляторных структур у детей 5-8 лет

Распределение различных вариантов ЭЭГ признаков изменения функционального состояния регуляторных структур (в %) у детей 5-6, 6-7 и 7-8 лет с хорошей успеваемостью (N) и трудностями обучения (LD)



- 1 - отсутствие билатерально-синхронных изменений ЭЭГ
- 2 - Генерализованные группы колебаний 4-6 Гц - высокий уровень активности синхронизирующих стволовых систем
- 3 - Группы колебаний 4-6 Hz в передних отделах мозга - ЭЭГ признаки функциональной незрелости фронто-таламической регуляторной системы
- 4 - Группы колебаний 4-6 Hz в задних отделах мозга - ЭЭГ признаки дефицита неспецифической активации со стороны РФ

— 5-6 Yrs
 - - - 6-7 Yrs
 - · - 7-8 Yrs

Мачинская и соавт., 1997

ЭЭГ критерии соответствия функционального состояния глубинных регуляторных структур возрастной норме

Билатерально-синхронные изменения электрической активности	5-6 лет	6-7 лет	7-8 лет	9-10 лет
Генерализованные колебания или группы колебаний с частотой 4-6 Гц	+	+	+	+
Генерализованные альфа и/или бета веретена дизэнцефального генеза	-	-	-	+
Группы колебаний 4-6 Гц в лобно-центральных областях ЭЭГ признак функциональной незрелости ФТС	+	Н	Н	Н
Гиперсинхронный альфаритм и/или группы колебаний 4-6 Гц в затылочно-теменных областях ЭЭГ признак дефицита неспецифической активации	+	Н	Н	Н

www.neurodev.net.ru

Функциональное созревание мозга и риск школьных трудностей у детей 7-8 лет

Суммарные показатели риска в:

I – Организации познавательной деятельности

II – межмодальной интеграции

III – зрительном восприятии

Результаты Anova

Факторы		df	Суммарные показатели					
			I		II		III	
			F	P<	F	P<	F	P<
Функциональная коры (2)	незрелость	1	1,1	-	4,7	0,05	4,2	0,05
Функциональная РС(3)	незрелость	2	14,3	0,01	1,9	-	1,2	-

Безруких и соавт. 1999

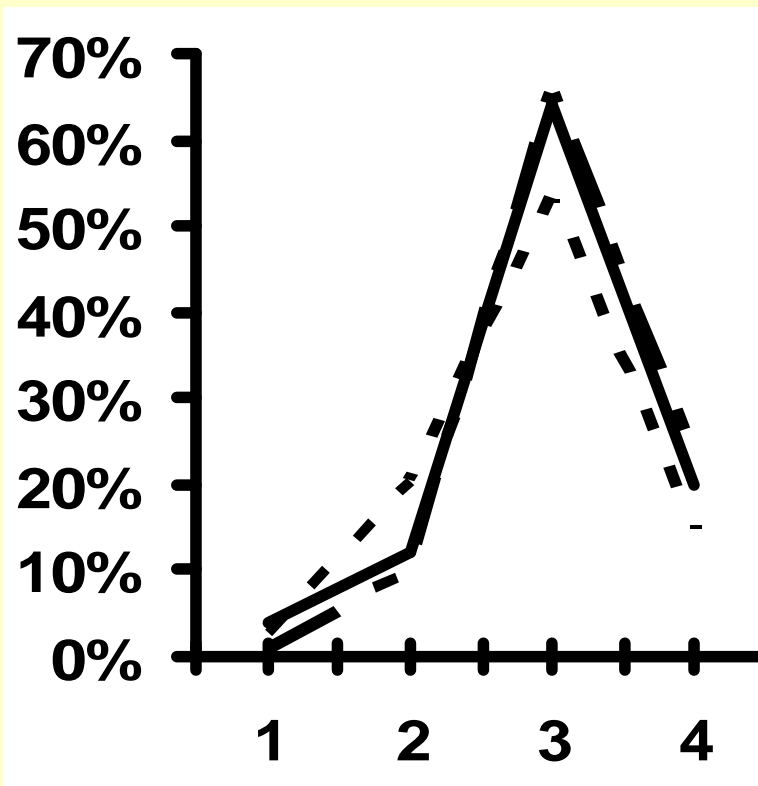
В критические периоды онтогенеза в функционировании мозга ребенка наиболее ярко проявляются индивидуальные различия в темпах созревания мозговых систем, обеспечивающих реализацию познавательных процессов.

У детей 7-8 лет качественный анализ паттернов ЭЭГ выявил значительный индивидуальный разброс в уровне функциональной зрелости регуляторных систем (РС) мозга

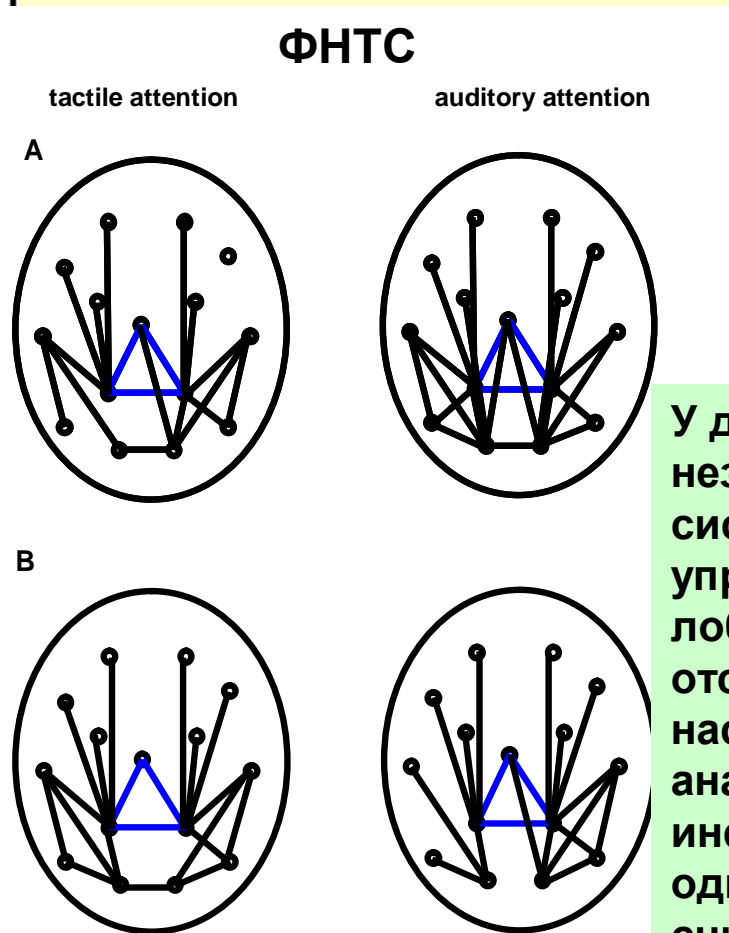
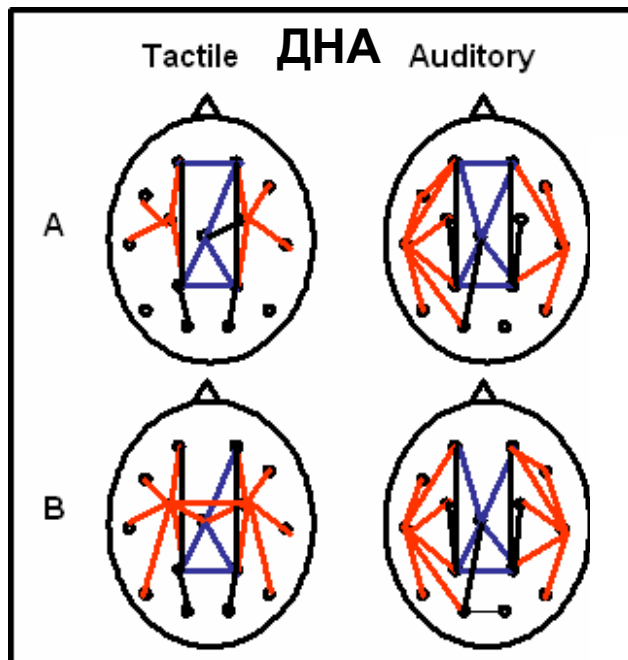
У детей с трудностями обучения было обнаружено два типа отклонений от возрастной нормы в функциональном состоянии РС – незрелость ФТС и незрелость (дефицит) неспецифической активации со стороны РФ ствола мозга

Как это сказывается на формировании механизмов произвольной организации деятельности?

Распределение различных вариантов ЭЭГ паттернов, характеризующих функциональное созревание регуляторных систем мозга (в %) у детей 5-6, 6-7 и 7-8 лет с трудностями обучения



3 – незрелость фронто-таламической системы (ФТС), 4 – незрелость системы неспецифической активации



Значимый рост КОГ
основного ритма в
ситуации
предстимульного
избирательного
внимания у детей 7-8
лет с ЭЭГ признаками
незрелости РС

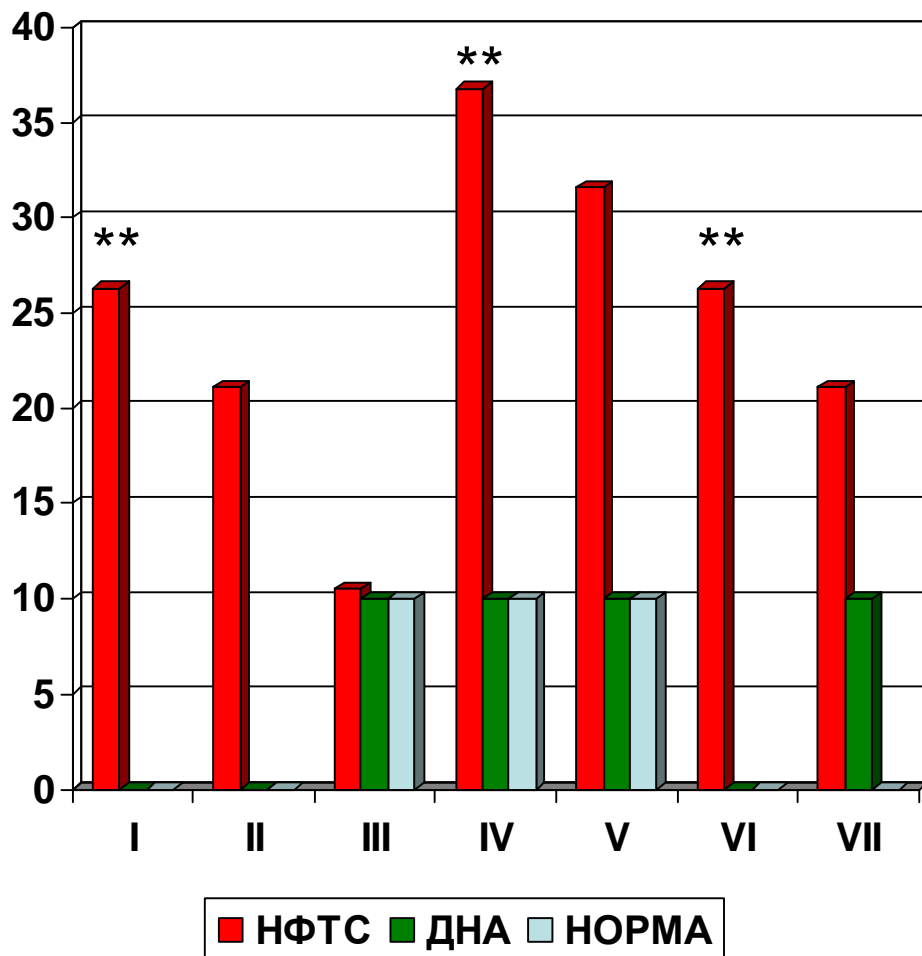
А – стимулы адресованы
левому полушарию

В – стимулы адресованы
правому полушарию

У детей с функциональной незрелостью регуляторных систем, осуществляющих управляющие влияния от лобных отделов мозга, отсутствует избирательная настройка корковых зон к анализу значимой информации, что является одной из основных причин снижения эффективности произвольного внимания и произвольной организации деятельности, и как следствие, трудностей обучения в 7-8 лет

Мачинская,
2006

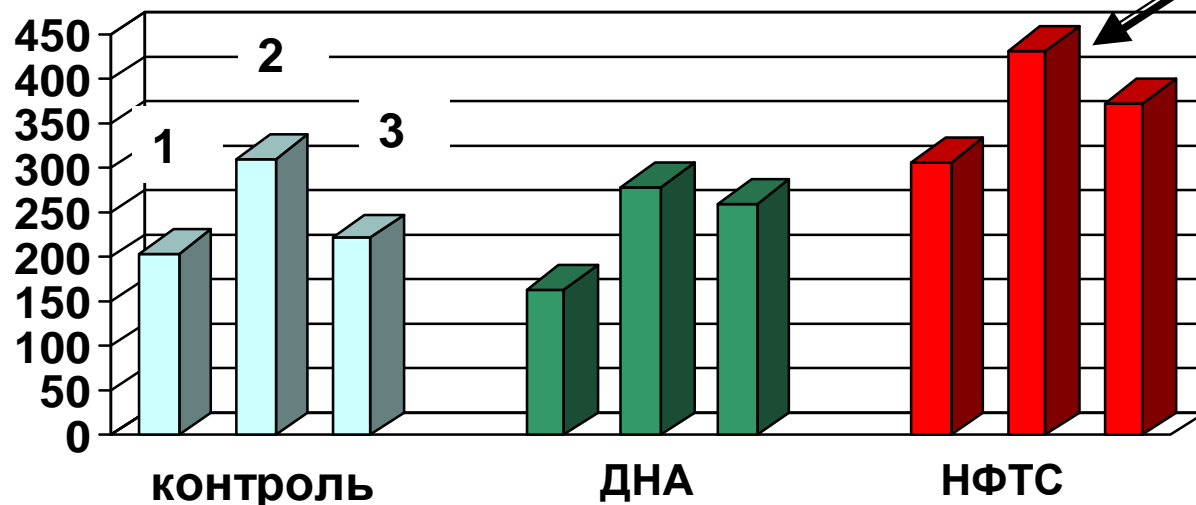
Распределение случаев (в %) с выраженными трудностями программирования, регуляции и контроля деятельности в трех группах детей 7-8 лет с различной степенью зрелости РС мозга.



Анализируемые трудности	
I	импульсивность (эхо ответы и опережающее поведение)
II	инертность элемента программы (персеверация)
III	трудности переключения на другую программу
IV	неустойчивость программы
V	трудности выполнения сложных программ
VI	трудности создания стратегии деятельности
VII	трудности самоконтроля

Мачинская, Семенова, 2004

**Разница во времени реакции при правильном опознании
локального и глобального аспектов иерархической буквы**



**Трудности
селективного
внимания при
опознании
локального
аспекта стимула в
группе детей 7-8
лет с НФТС**

**Уровень
достоверности
групповых различий**

Тип стимулов:

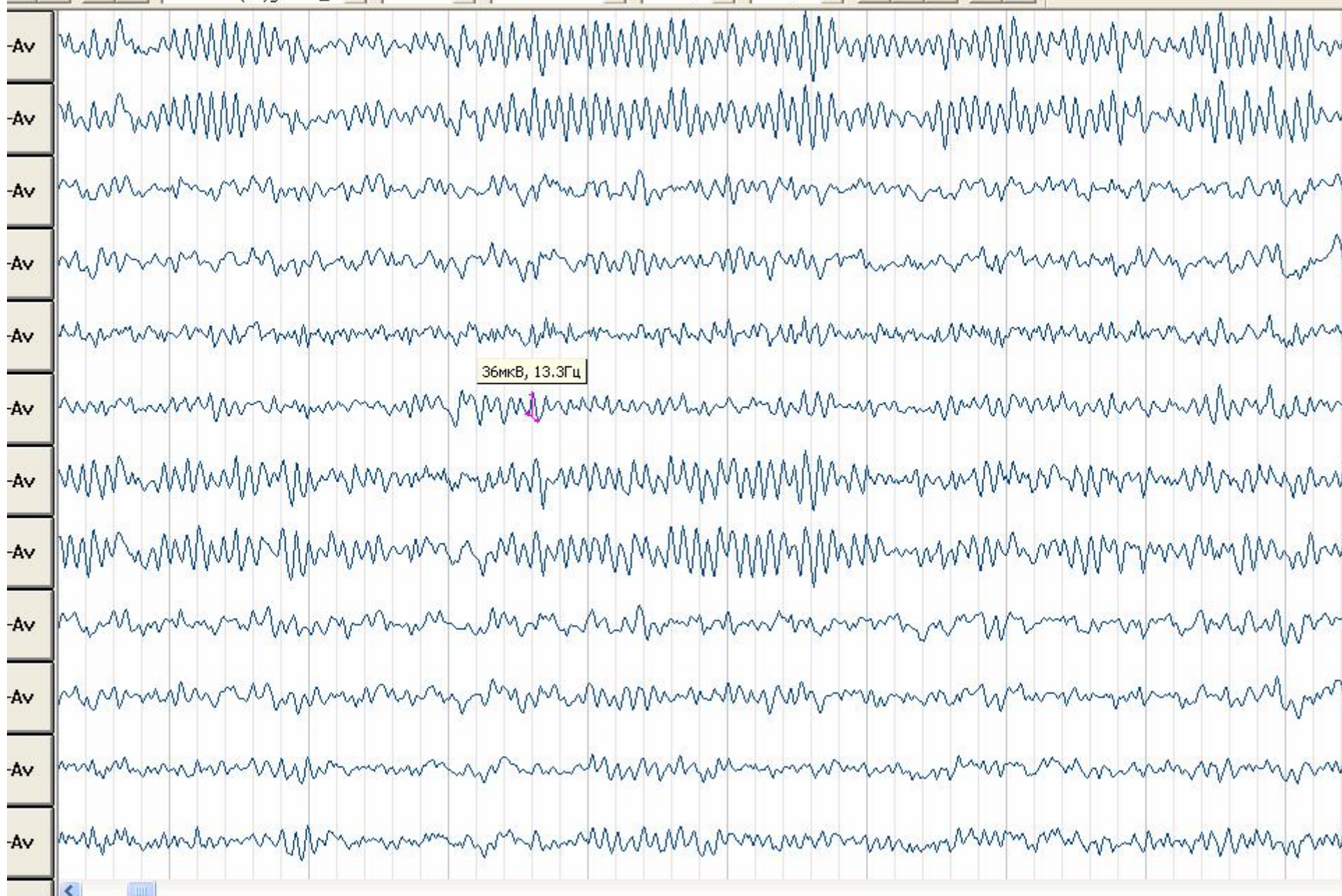
- 1-совпадающие
- 2- конфликтные
- 3-нейтральные

Мачинская, Крупская, 2008 (в печати)

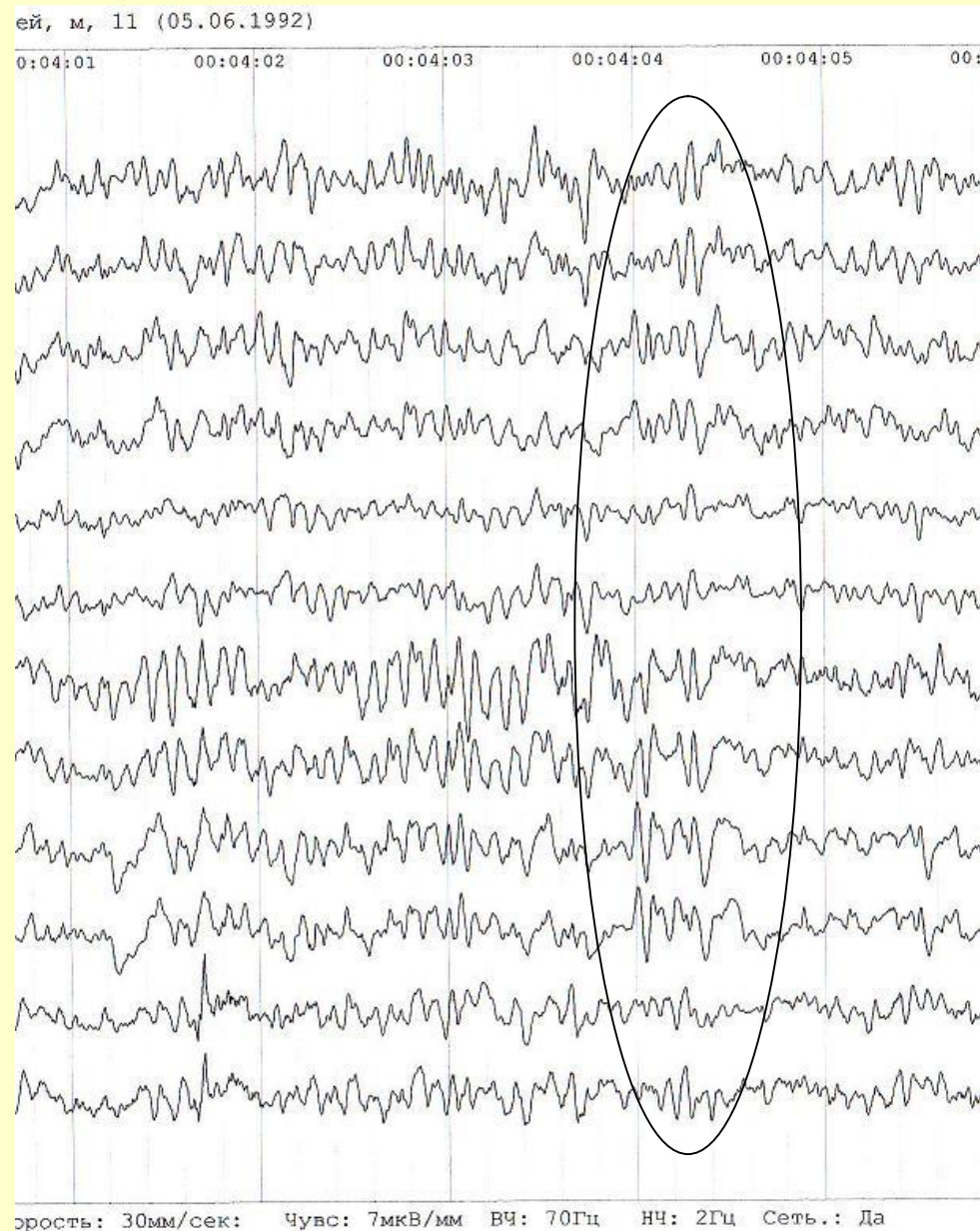
Разница ВР L-G	Контроль/ ДНА	ДНА/ НФТС	НФТС/ контроль
совпадающие	0,444	0,011	0,037
Конфликтные	0,652	0,024	0,036
нейтральные	0,478	0,023	0,002

Междисциплинарный анализ возрастных и индивидуальных особенностей произвольной регуляции деятельности и внимания у детей показал, что критическим периодом в развитии мозговых механизмов этих функций является возраст от 6 до 8 лет

На этом этапе онтогенеза ключевую роль в формировании нейрональных механизмов нисходящей избирательной модуляции активности коры в соответствии с задачами деятельности играет созревание фронто-таламической регуляторной системы



Особенности ЭЭГ подростков

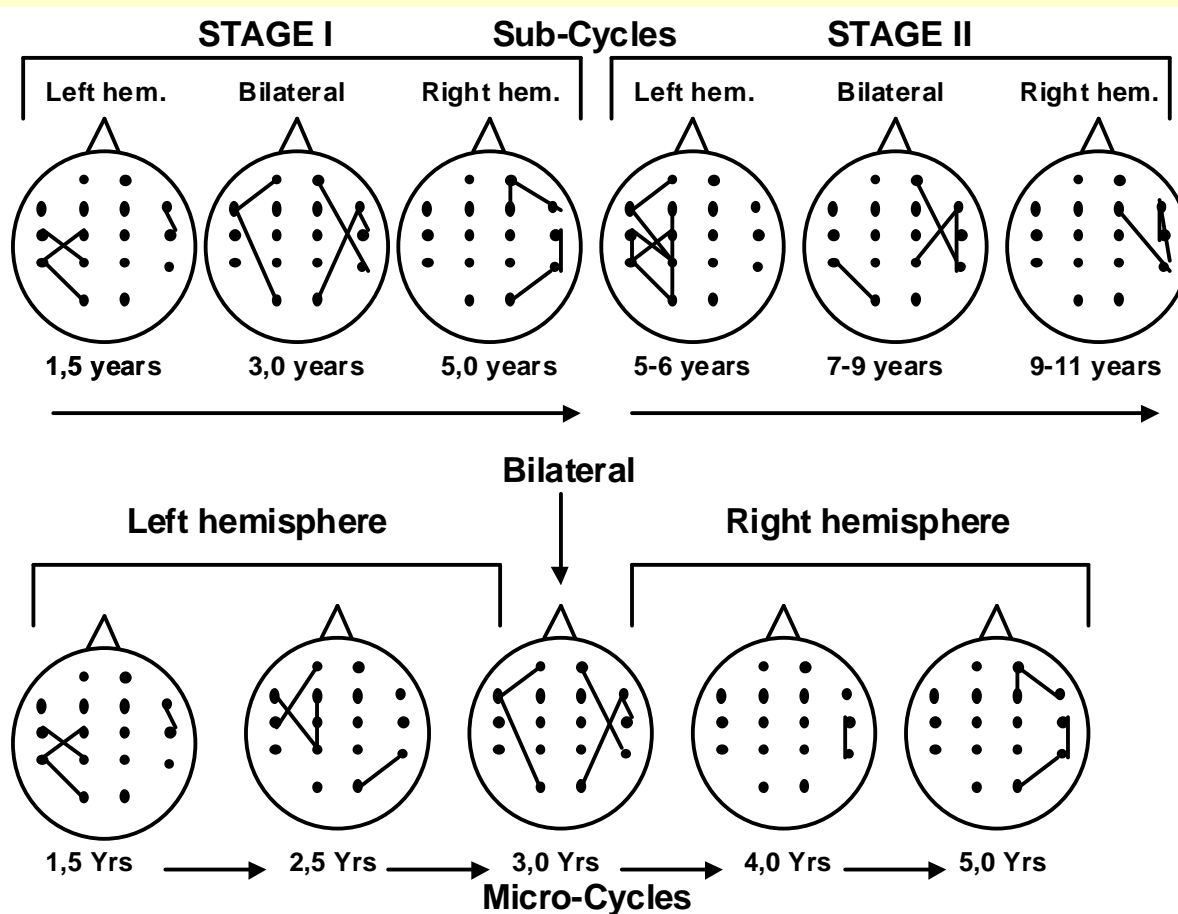


Основное отличие от предыдущего возрастного периода – дезорганизация альфа-ритма и наличие признаков изменения функционального состояния диэнцефальных (гипоталамических) структур мозга. Эти изменения отражают повышение активности диэнцефальных структур, связанное с половым созреванием.

Формирование функциональной организации коры (внутрикорковых связей) в покое

- Ø Зрительный анализ и количественный спектральный анализ ЭЭГ не позволяют оценить процессы созревания корковых связей, которые очень важны для формирования специализированных функциональных систем в процессе познавательной деятельности ребенка**
- Ø Более пригодным для этого являются различные численные способы оценки согласованности во времени ритмических составляющих ЭЭГ, например оценка когерентности**
- Ø В электрофизиологии рост когерентности интерпретируется как свидетельство формирования морфологических (в покое) и функциональных (в покое и при когнитивной деятельности) связей между парами областей коры.**

Циклическое развитие функциональных связей корковых областей (Thatcher, 1992)



Основные тенденции:

Чередование в каждом цикле преимущественного формирования связей в **левом** и **правом** полушарии через **билатеральный** «рост»;

«движение» от **латеральных** связей к **медиальным** в **левом** полушарии и от **медиальных** к **латеральным** в **правом**;

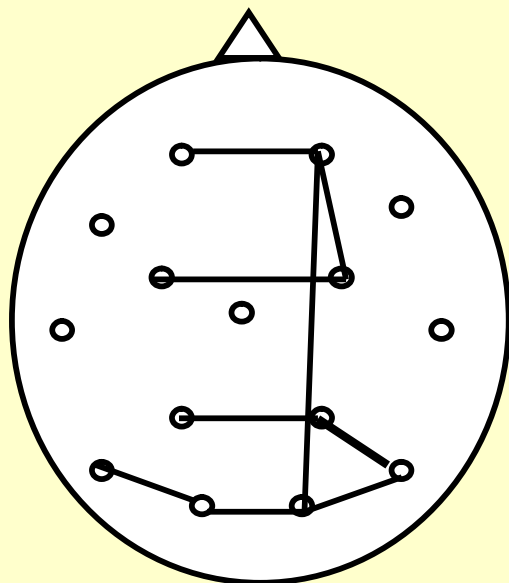
Возрастание связей **лобных** отделов с **другими** областями;

Интеграция коротких связей в **левом** полушарии и **дифференциация** длинных связей в **правом** полушарии

Возрастные особенности функциональной организации коры в покое

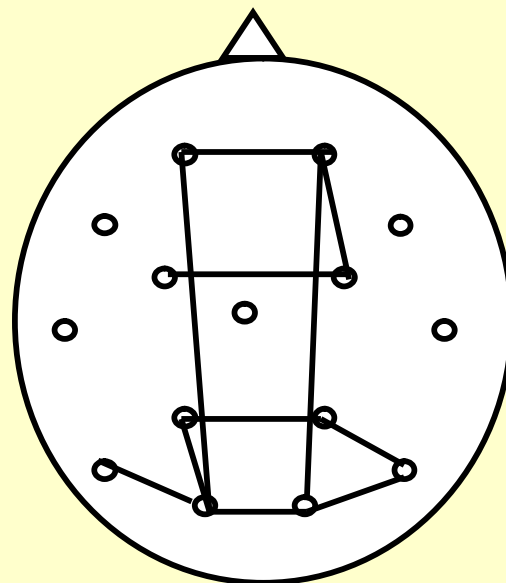
Дети 7-8 лет по сравнению со взрослыми

А



Дети 9-10 лет по сравнению со взрослыми

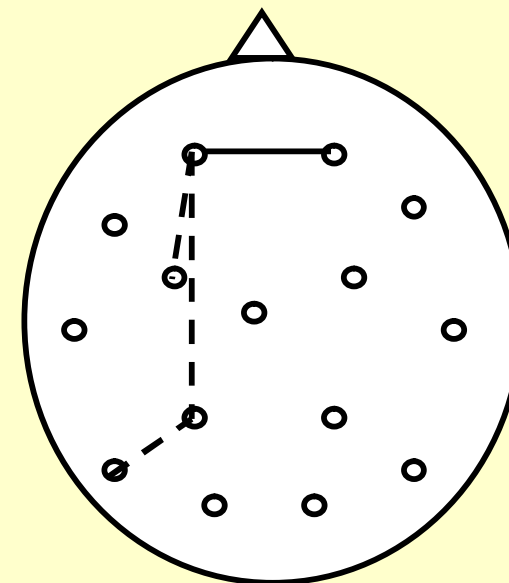
В



Дети 9-10 лет по сравнению с детьми 7-8 лет

лет

С



Линии соединяют пары отведений, где были выявлены значимые различия

Увеличение с возрастом —————

Снижение с возрастом - - - - -

Мачинская, Соколова, Крупская
2007

**Основные факторы функционального созревания мозга,
влияющие на когнитивное развитие:**

- **Морфо-функциональное созревание нейронного аппарата коры**
- **Развитие функциональных связей между областями коры**
- **Морфо-функциональное созревание регуляторных структур мозга. Наиболее значимым для формирования когнитивных процессов является развитие высших центров регуляции – лобных отделов.**