

УДК 612.821+612.014+612.43

## СЕЗОННЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ГЕМОДИНАМИКИ И БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА

В.П. Рожков, С.С. Бекшаев, С.И. Сороко

*Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург*

Исследовали гемодинамику и электрическую активность мозга у школьников-северян 7–17 лет в осенний и весенний сезоны, отличающиеся контрастными изменениями светового и температурного режимов. Сезонные влияния на гемодинамику мозга проявились изменениями скорости кровотока, тонуса мозговых сосудов, а также вазомоторной реактивности. Изменения ЭЭГ в весенний период характеризовались топически-избирательным увеличением спектральной мощности тета-, альфа- и бета-частот в лобных и височных областях, а также генерализованным снижением мощности дельта-частот, отражающими повышение активности лимбико-ретикулярного комплекса и тонуса активирующей системы ствола мозга. Методом электромагнитной томографии низкого разрешения показана активация лимбической области, характеризующая повышенные нагрузки на регуляторные механизмы мозга в весенний период.

**Ключевые слова:** адаптация, мозговое кровообращение, ЭЭГ, сезоны, развитие, дети, Север.

**Введение.** Жесткий климат Севера с его коротким летом и длинным осенне-зимним периодом с низкими температурами, более выраженными колебаниями гелиогеофизических факторов, неустойчивостью атмосферных процессов, повышенным фоном космической радиации оказывает неблагоприятное влияние на человека [2; 4]. Воздействие целого ряда наиболее значимых факторов Севера не является постоянным. Особую роль играют контрастные изменения в течение года светового и температурного режимов. В течение года организм проходит естественные циклы сезонной акклиматизации к холодному и теплomu периоду [6].

Сезонные перестройки у жителей Севера обнаруживаются на уровне метаболических процессов и, так или иначе, затрагивают все системы организма [2]. Известны цирканнуальные ритмы нейроэндокринных функций [8; 20]. Яркие проявления сезонной зависимости выявляются в функционировании кардиореспираторной системы [6].

Адаптивные реакции к контрастным сезонным изменениям природных факторов связаны с механизмами регуляции различных звеньев системы кровообращения. Изменения

показателей сердечно-сосудистой системы служат маркером характера адаптационных процессов в организме и одними из первых сигнализируют о состояниях напряжения, истощения и патологии [12].

Менее изучены особенности гемодинамики мозга и ее перестройки в связи с сезонными изменениями природных факторов. По данным реоэнцефалографических исследований, к зимнему сезону наблюдается нарастание негативных тенденций в системе кровоснабжения мозга в виде снижения тонуса сосудов. В весенне-летний период отмечено повышение сосудистого сопротивления, уменьшение скоростных показателей кровенаполнения, что указывает на снижение эффективности мозгового кровотока [18]. Допплерографические исследования показали, что у детей-северян обнаруживаются нарушения регуляции тонуса мозговых сосудов, проявляющиеся в виде билатеральной асимметрии линейных скоростей кровотока [13].

Регуляторные механизмы обеспечивают адекватность кровоснабжения мозга при поддержании его функциональной активности. Пластичность центральных механизмов регуляции является одним из важнейших свойств,

определяющих приспособляемость организма в измененных условиях существования [10; 15]. Действие специфического комплекса раздражителей вызывает функциональную перестройку активности коры больших полушарий и подкорковых центров. Показано, что среди коренного населения Сибирского Севера значительно больший процент лиц с правополушарным и симметричным типом латерализации сенсомоторных функций, что связывается с проявлением генетически закрепленных адаптаций [1].

Воздействие неблагоприятных экологических и социально-бытовых условий оказывает более выраженное влияние на функционально менее зрелые, чем у взрослого, физиологические системы растущего организма, что может приводить к более раннему истощению физиологических резервов и торможению возрастного развития у детей [20]. Важное теоретическое и практическое значение имеют исследования особенностей морфофункционального развития мозга детей в условиях адаптации к природно-климатическим условиям Севера.

**Цель исследования.** Изучение у детей и подростков-северян особенностей формирования биоэлектрической активности мозга в их взаимосвязи с сезонными перестройками церебральной гемодинамики.

**Материалы и методы.** В Архангельской обл. (Коношский район, 61° с.ш., 41° в.д.) обследованы 27 мальчиков и 30 девочек от 7 до 17 лет – учащиеся сельской школы. Исследования проведены на одном и том же контингенте учащихся в конце октября и начале апреля – в переходные периоды от осени к зиме и от зимы к весне с контрастными изменениями температурного и светового режима.

Ультразвуковое доплерографическое исследование сосудов мозга проведено на аппарате «Сономед 300/П» («Спектрмед», Россия). Интракраниально датчиком 2 мГц исследовали по стандартной методике [22] средне-мозговые артерии (СМА), передние мозговые артерии (ПМА), задние мозговые артерии (ЗМА), основную артерию (ОА). Идентификацию артерий осуществляли исходя из зоны, глубины и угла локации, направления потока, результатов компрессионной пробы [22].

По спектрам доплеровского сдвига частот определяли линейные скорости кровотока (ЛСК). Анализировали систолическую и среднюю ЛСК, а также индекс резистивности RI. Показатель межполушарной асимметрии кровотока ( $K_{ac}$ ) вычисляли по формуле:

$$K_{ac}=100 \% \times (V_1 - V_2)/V_1,$$

где  $V_1$  – большая,  $V_2$  – меньшая средняя ЛСК в одноименных сосудах.

Оценку метаболической регуляции мозгового кровотока (в бассейнах СМА) проводили с помощью проб, вызывающих изменения концентрации газов крови. Рассчитывали коэффициент реактивности (КР) на гипоксическую нагрузку:

$$KР_{(-)}=1 - V_{(-)}/V_0,$$

где  $V_{(-)}$  – средняя ЛСК в СМА на 25–35-й секундах гипервентиляции,  $V_0$  – ЛСК в исходном состоянии.

Дилятаторную реактивность церебральных сосудов оценивали с помощью пробы с максимальной произвольной задержкой дыхания. Рассчитывали коэффициент реактивности на гипоксически-гиперкапническую нагрузку:

$$KР_{(+)}=V_{(+)} / V_0,$$

где  $V_{(+)}$  – диастолическая ЛСК в СМА на максимуме задержки дыхания,  $V_0$  – ЛСК в исходном состоянии. Для обобщенной оценки реактивности рассчитывали индекс вазомоторной реактивности (ИВМР):

$$ИВМР=100 \% \times (V_{(+)} - V_{(-)}) / V_0.$$

ЭЭГ регистрировали на компьютерном электроэнцефалографе-анализаторе ЭЭГА 21/26 «Энцефалан-131-03» (НПКФ «Медиком» МТД, Россия) в 21 отведении по схеме «10–20». Использовали отведения с объединенным референтным электродом на мочках ушей. Запись ЭЭГ производили в положении сидя. Исследование проводили по стандартной клинической программе. Представленные результаты характеризуют состояние

спокойного бодрствования с закрытыми глазами.

При компьютерном анализе ЭЭГ использованы стандартный спектральный анализ, оригинальные методы изучения динамической структуры взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ. Предварительно применяли цифровую фильтрацию, ограничивая ЭЭГ полосой от 1,7 до 30 Гц, а также исключали фрагменты ЭЭГ, содержащие артефакты. Спектры мощности вычислялись на эпохах анализа 2 с при 50 % перекрытии эпох. Анализировали параметры спектров в 5 частотных диапазонах: дельта (1,7–3,5 Гц), тета (3,5–7,0 Гц), альфа-1 (7,0–12,5 Гц), альфа-2 (7,0–12,5 Гц), бета (12,5–30,0 Гц). С целью нормализации распределений для спектров мощности использовали логарифмическое преобразование  $y = \log(x)$ .

Временную организацию волновой структуры ЭЭГ, отражающую характер межцентральных взаимоотношений, оценивали по взаимодействию компонентов ЭЭГ. Метод основан на анализе матриц переходных вероятностей между волнами ЭЭГ различных диапазонов частот [15]. По матрице вероятностей переходов строили вероятностный ориентированный граф, вершинам которого соответствуют ритмы ЭЭГ (бета, тета, альфа, дельта), ребрам графа – вероятности переходов. Для описания вероятностных ориентированных графов использованы понятия теории потоков в сетях. Некоторая вершина в графе является источником, стоком или сохраняющей поток, если разность между суммой выходящих из нее и входящих в нее вероятностей будет положительной, отрицательной или нулевой соответственно. Численно величину потоков ( $\Pi$ ) рассчитывали по матрице вероятностей переходов. Если  $\Pi_i < 0$ , то частотный компонент ЭЭГ с номером  $i$  называется «стоком» и участвует в формировании устойчивого «функционального ядра» ЭЭГ [15]. Если  $\Pi_i > 0$ , то частотный компонент ЭЭГ с номером  $i$  называется «источником». Переход  $\Pi_i$  через нулевое значение является критическим моментом в перестройке паттерна ЭЭГ.

*Статистическая обработка.* С целью изучения возрастной динамики показателей

каждый школьник был определен в одну из трех возрастных групп: младшую – от 7 до 10,9 лет, среднюю – от 11 до 13,9 лет, старшую – от 14 до 17,9 лет. Использовали трехфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с целью изучения влияния факторов Сезон (осень, весна), Пол (мальчики, девочки), Возраст (младшая, средняя, старшая группы) на показатели мозгового кровотока и ЭЭГ. Для сравнения средних применяли t-критерий Стьюдента, нулевая гипотеза отклонялась при вероятности ошибки  $p < 0,05$ . В тексте приведены значения средних со стандартными отклонениями ( $m \pm s.d.$ ). Статистическая обработка данных производилась при помощи пакета программ Statistica-6 for Windows.

**Результаты и обсуждение.** Климат Коношского района Архангельской обл. характеризуется как умеренно континентальный со среднегодовой температурой воздуха  $+1,1$  °С. По материалам районирования Севера России, Коношский район относится к зоне дискомфорта для человека.

Метеорологические условия в период проведения исследований (по данным сайта <http://meteo.infospace.ru>) характеризовались следующими показателями. За 9-дневный период в октябре среднесуточная температура варьировала от  $+1,4$  °С до  $+7,1$  °С, атмосферное давление (приведенное к уровню моря) – от 766 до 748 мм рт. ст., относительная влажность – от 84 до 95 %. За 12-дневный период наблюдений в апреле среднесуточная температура варьировала от  $-5,6$  °С до  $+6,7$  °С, атмосферное давление – от 757 до 773 мм рт. ст., относительная влажность – от 44 до 71%. Таким образом, осенний сезон наблюдений отличался от весеннего сниженным фоном атмосферного давления, повышенной влажностью и облачностью, меньшим среднесуточным разбросом температур.

*Сравнительная оценка артериального мозгового кровотока у детей-северян в осенне-зимний и зимне-весенний периоды.* Оценку влияния фактора Сезон производили с учетом зависимости показателей кровотока от возраста и возможных различий в величине этих показателей у девочек и мальчиков. Трехфакторный дисперсионный анализ выявил значимое влияние фактора Возраст на

систолическую и среднюю ЛСК по всем исследуемым артериям (табл. 1).

Фактор Пол не оказывал значимого влияния на ЛСК по ПМА, ЗМА и основной артерии. Однако в СМА скоростные показате-

тели кровотока у девочек в среднем были значимо выше, чем у мальчиков. Фактор Сезон оказывался значимым для показателя RI по СМА и ЗМА, а также влиял на ЛСК по ПМА.

Таблица 1

**Влияние факторов Сезон, Возраст, Пол на линейные скорости кровотока в артериях основания мозга у школьников Архангельской области**

Артерии	Фактор		
	Сезон	Возраст	Пол
Среднемозговые	1,5	11,5***	10,6**
Переднемозговые	4,5*	3,4*	0,3
Заднемозговые	0,6	4,0*	1,0
Основная	0,3	5,2**	0,7

**Примечание.** В ячейках таблицы даны значения фактора F. Для парных артерий (СМА, ПМА, ЗМА) представлены данные дисперсионного анализа с повторными измерениями. Уровень значимости: \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ .

Возрастная динамика изменения ЛСК имеет сезонные особенности, хотя по данным дисперсионного анализа влияние фактора Сезон могло не достигать уровня значимости. Так, коэффициент корреляции (КК) между средней ЛСК по СМА и возрастом школьника значим в сезоне Осень (КК = -0,51), тогда как в сезоне Весна значимо не отличался от нуля (КК = -0,27). Для ПМА, ЗМА и ОА снижение средней ЛСК с возрастом больше выражено у школьников-мальчиков, чем у девочек. Значимые КК между ЛСК и возрастом выявлены только у мальчиков: для ПМА в сезоне Весна (КК = -0,35), для ЗМА в сезоне Осень (КК = -0,39), для ОА как в сезоне Осень (КК = -0,53), так и в сезоне Весна (КК = -0,46).

Статистические оценки ЛСК приведены по данным дисперсионного анализа с включением процедуры апостериорных сравнений, которая, в частности, служила основанием для объединения оценок по возрастным группам, где эти показатели значимо не различались между собой.

Средние ЛСК по СМА в младшей группе были  $93,1 \pm 13,1$  см/с у мальчиков и  $98,2 \pm 13,5$  см/с у девочек, в объединенной средней и старшей группе составили  $76,8 \pm 13,4$  см/с у мальчиков и  $85,1 \pm 11,4$  см/с у девочек.

Средние ЛСК в ПМА в младшей группе различались по сезонам: были меньше в сезоне Осень ( $67,4 \pm 10,9$  см/с), чем в сезоне Весна ( $71,5 \pm 9,2$  см/с). Средние ЛСК в ПМА в средней и старшей группах значимо не различались по сезонам и составили  $63,6 \pm 9,7$  см/с. Средние ЛСК по ЗМА у школьников младшей группы составили  $56,3 \pm 7,5$  см/с, у школьников средней и старшей групп –  $53,8 \pm 7,6$  см/с. При этом средняя ЛСК по ЗМА у школьников младшей группы была значимо больше, чем в средней и старшей, только в сезоне Осень.

Известно, что линейные и объемные скорости кровотока возрастают в первые годы жизни ребенка, достигая максимальных величин в 6–7-летнем возрасте, после чего градуально снижаются к 16–17 годам, выходя на плато [19; 23]. Мы также наблюдали снижение ЛСК: относительно более быстрое у школьников от младшей к средней возрастной группе, чем от средней к старшей группе. Скоростные показатели кровотока в СМА в младшей и старшей группах, по ПМА, ЗМА и ОА в младшей группе соответствовали нормативным данным [14; 23]. В старших группах ЛСК в ПМА, ЗМА и ОА в среднем на 7–9 см/с превышали норматив.

В старшей группе у девочек ЛСК в магистральных сосудах мозга были выше, чем у

мальчиков (значимо – для СМА), по-видимому, в связи с особенностями гормонального профиля, обусловленными завершением процесса полового созревания. Дифференцированные по полу нормативы ЛСК отсутствуют в большинстве руководств по доплерографии [14; 19; 23], однако имеются сведения о более высоких у женщин, чем у мужчин, ЛСК по СМА и ОА как во взрослом, так и в подростковом [9] возрасте.

Диагностически важным показателем является асимметрия средней ЛСК в артериях левой и правой стороны. В среднем асимметрия ЛСК по СМА составила 7,6 %. В 19 (12 %) случаях асимметрия ЛСК по СМА превышала 15 %, у 4 школьников – 20 %. По ПМА средняя асимметрия ЛСК составила 11,7 %. В 26 (14 %) случаях асимметрия ЛСК по ПМА превышала 20 %, в 8 случаях – 30 %. Не обнаружено влияния факторов Сезон, Пол, Возраст на величину асимметрии ЛСК в СМА и ПМА.

В среднем асимметрия ЛСК по ЗМА составила 9,9 %. В 19 (12 %) случаях асимметрия ЛСК по ЗМА превышала 20 %, в 9 случаях – 25 %. При этом асимметрия ЛСК по ЗМА выявлена у 15 % школьников в сезоне Осень и только у 4 % – в сезоне Весна (различия по частоте  $p < 0,05$ ).

В клинической практике [19] в качестве значимой отмечают асимметрию ЛСК, превышающую 15 % для СМА и 30 % – для ПМА и ЗМА. При этом наблюдения [14] показывают, что даже у здоровых детей различного возраста асимметрия ЛСК по СМА и ЗМА обычно не превышает 10 %. Таким образом, у школьников-северян средние величины асимметрии ЛСК превышали значения, которые были получены на выборках из популяций детей, проживающих в более комфортных условиях, а у 13–29 % (в зависимости от выбранного критерия) детей асимметрия ЛСК хотя бы в одной паре артерий мозга превышала норматив. Мы полагаем, что более высокие показатели асимметрии ЛСК у детей-северян являются результатом негативных влияний экологических условий Севера (в сочетании с социально-бытовыми факторами) и обусловлены повышенной нагрузкой на механизмы регуляции тонуса артерий.

Индекс резистивности (RI) был предложен для косвенной оценки циркуляторного сопротивления сосудистого русла. По данным дисперсионного анализа, обнаружено влияние фактора Возраст на показатель RI для ПМА ( $F=4,2$ ;  $p < 0,02$ ) и ЗМА ( $F=4,3$ ;  $p < 0,02$ ), а также фактора Сезон – для СМА ( $F=10,8$ ;  $p < 0,002$ ) и ЗМА ( $F=6,0$ ;  $p < 0,02$ ).

Величины RI для СМА и ЗМА в сезоне Осень (СМА,  $0,54 \pm 0,05$ ; ЗМА;  $0,49 \pm 0,05$ ) были больше, чем в сезоне Весна, главным образом за счет сезонной разницы у школьников младшей и средней группы.

Циркуляторное сопротивление сосудистого русла зависит от тонуса резистивных сосудов и внутричерепного давления. При этом на величину показателя RI оказывают влияние и такие факторы, как ЧСС, амплитуда артериального давления, эластичность сосудов и вязкость крови [22]. Это не дает возможности однозначно интерпретировать динамику RI. В сопоставлении с данными РЭГ исследования [13] более низким значениям RI соответствовали более высокие значения дикротического индекса, что характеризует более высокий тонус артерий мелкого калибра и артериол [21]. Если это так, то в весеннем исследовании у учащихся тонус сосудов резистивного типа был сравнительно выше, чем в осеннем.

Изменения средних ЛСК по СМА под влиянием дыхательных нагрузок измеряли у школьников всех трех возрастных групп. Обнаружено влияние фактора Сезон на показатели реактивности (КР) на гипоксическую ( $F=4,3$ ;  $p < 0,04$ ), гипоксически-гиперкапническую ( $F=11,2$ ;  $p < 0,001$ ) нагрузку и суммарную оценку – ИВМР ( $F=18,1$ ;  $p < 0,001$ ). Фактор Возраст оказывал влияние только на величину КР на гипоксическую нагрузку ( $F=6,8$ ;  $p < 0,002$ ). Величина ИВМР у мальчиков была выше, чем у девочек ( $F=4,6$ ;  $p < 0,04$ ).

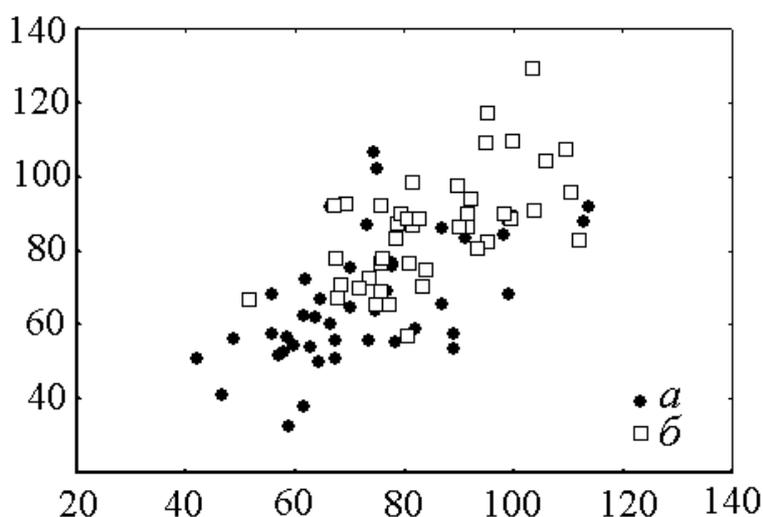
КР на гипоксическую нагрузку у обследованных школьников варьировал от 0,25 до 0,61. В сезоне Весна КР на гипоксическую нагрузку значимо не различался у школьников трех возрастных групп. В сезоне Осень величина КР у школьников младшей группы была выше, чем у школьников сред-

ней ( $p < 0,02$ ) и старшей ( $p < 0,001$ ) групп. Эффект изменения величины КР с возрастом в сезоне Осень обусловил межсезонные различия в величинах КР: весной реактивность на гипокапническую нагрузку у учащихся средней ( $p < 0,01$ ) и старшей ( $p < 0,05$ ) возрастных групп была выше, чем осенью.

Величины КР на гипоксически-гиперкапническую нагрузку в сезоне Весна были выше, чем в сезоне Осень, значимо для младшей

( $p < 0,005$ ) и средней ( $p < 0,03$ ) групп (главным образом за счет более высокой реактивности сосудов на задержку дыхания у мальчиков).

Величины ИВМР, характеризующие весь диапазон реактивности, в сезоне Весна были выше, чем в сезоне Осень (рис. 1), значимо различаясь для младшей ( $p < 0,02$ ) и средней ( $p < 0,01$ ) групп, также главным образом за счет значимо более высоких ИВМР у мальчиков в сезоне Весна.



**Рис. 1.** Оценки вазомоторной реактивности в бассейнах СМА у школьников-северян в осенний (а) и весенний (б) сезоны.

По оси абсцисс – величины ИВМР (в %) для правой СМА; по оси ординат – величины ИВМР (в %) для левой СМА. Значками представлены индивидуальные данные

Как показывают наши данные, величина реакции на гипоксически-гиперкапническую нагрузку превышала величину реакции на гипокапническую нагрузку. Есть основания полагать, что преобладание одной или другой реакции связано с исходным уровнем тонуса сосудов сопротивления [25]. При сниженном тонусе сосудов резистивного типа можно ожидать преобладания констрикторной реакции (на гипокапнию), при повышенном – преобладания дилататорной реакции (на гипоксию-гиперкапнию). В таком случае полученные нами данные указывают на исходно повышенный тонус артериол у детей-северян в осенний период с тенденцией к дальнейшему повышению в весенний.

Таким образом, по данным доплерографического исследования выявлены сезонные изменения мозгового кровотока у школьников-северян. Эти изменения больше выражены для детей младшей группы. Изменения от

осени к весне включали повышение ЛСК по ПМА, сглаживание возрастных различий ЛСК по СМА и ЗМА за счет снижения ЛСК у детей младшей группы, повышение тонуса мозговых сосудов, а также возрастание реактивности на гипокапническую нагрузку и общей вазомоторной реактивности.

Полученные нами данные в целом согласуются с результатами косвенной оценки мозгового кровотока методом реоэнцефалографии. Так, у студентов, проживающих в г. Архангельске, были выявлены более низкие показатели пульсового кровенаполнения и более высокие значения дикротического индекса (ДКИ) в весенний период исследований в сравнении с осенним [18]. При этом возрастание ДКИ, характеризующее повышение сопротивления кровотоку и снижение эластичности стенок сосудов, может свидетельствовать о повышении сосудистого тонуса в весенний период, что авторы рассматри-

вают как снижение эффективности мозгового кровотока [18].

Адекватность кровоснабжения мозга при поддержании его функциональной активности зависит от регуляторных механизмов, которые обеспечивают относительную независимость мозгового кровотока от изменений условий внешней среды и системной гемодинамики.

Здоровые дети на Севере по сравнению со сверстниками средней полосы России имеют более низкий уровень показателей гемодинамики и внешнего дыхания [6]. Особенно наглядно эти отклонения проявляются в периоды года, связанные с переходом от осени к зиме, от зимы к весне. В период сезонных переходов у детей-северян отмечается повышенный тонус сосудов, низкий уровень систолического и минутного объема кровотока. Увеличение общего периферического сопротивления сосудов приводит к повышению показателей систолического и диастолического артериального давления, а также среднего гемодинамического давления, что указывает не только на процесс мобилизации сердечно-сосудистой системы, но и на повышение энергетических затрат и уменьшение эффективности работы сердца [6; 12].

В процессе приспособления к холоду одним из мощных нейрогуморальных регуляторов является повышение активности симпатoadрeнaлoвoй системы [6; 12]. Преобладание активности симпатического отдела ВНС в регуляции физиологических функций в зимний период находит отражение в показателях вариабельности сердечного ритма. В зимне-весенний период перенапряжение симпатического контура регуляции тонуса приводит к росту активности центральных механизмов регуляции и повышению роли парасимпатического отдела ВНС [6].

Изменения показателей мозгового кровообращения могут быть отражением как синергично действующих процессов, связанных с балансом симпатических и парасимпатических влияний, так и компенсаторных реакций в ответ на перестройку системной гемодинамики. Регуляция мозгового кровообращения в высокой степени автономна и включает собственные механизмы адаптивных и ком-

пенсаторно-приспособительных реакций, например таких, как перераспределение кровотока в пользу жизненно важных центров в условиях острой гипоксии [3]. К сожалению, нет ясного понимания адаптивных процессов со стороны сердечно-сосудистой системы к воздействию одного из самых значимых факторов Севера – холодового. Так, у взрослых известны различные варианты действия холодного климата на артериальное давление человека: гипотензивное, гипертензивное, разнонаправленные сдвиги [6].

Выявленные в весенний в сравнении с осенним периодом перестройки мозгового кровообращения, как и системного, связаны с адаптационными реакциями в ответ на резкие изменения геофизических и метеорологических условий в весенний период, когда резко возрастают инсоляция, длительность дня, температура воздуха, физическая активность детей (после нескольких месяцев относительной гипокинезии). О напряжении деятельности сердечно-сосудистой системы в это время свидетельствует также увеличение частоты неблагоприятных (особенно сосудистого) типов ее саморегуляции [15], то есть адаптационная перестройка этой системы у школьников в весеннее время года на Севере протекает с ухудшением типа саморегуляции, снижением функциональных возможностей и истощением резервов.

В нашем исследовании средняя величина индекса вазомоторной реактивности составила осенью 76–84 % (по трем группам), весной – 90–98 %. Осенние значения оказались ниже нормативных, полученных при исследовании молодых взрослых [11; 14], весенние соответствовали им.

В исследовании в г. Санкт-Петербурге [8] у детей 6–12 лет ИВМР составил  $85 \pm 14$  %, что соответствует нашим данным, полученным в осенний период. Показательно, что у школьников, представляющих аборигенное население севера Магаданской обл., показатели ИВМР были ниже, чем у потомков пришлое население [13], хотя аборигены а priori лучше приспособлены к экологическим условиям Севера. Нельзя исключить, что повышение ИВМР в весенний период не столько отражает «нормализацию» цереброваскуляр-

ной реактивности, сколько является следствием адаптивных перестроек кровоснабжения в зимний период в ответ на воздействие гипоксически-холодового фактора. Об этом может свидетельствовать формирование у подростков Дальневосточного Севера – потомков пришлого населения – феномена повышенной вазомоторной реактивности на дыхательные нагрузки [13].

*Влияние сезонных факторов на функциональное состояние мозга у школьников-северян.* Пластичность центральных механизмов регуляции является одним из важнейших свойств, определяющих пределы приспособляемости организма в измененных условиях существования [10]. Действие специфического комплекса раздражителей вызывает функциональную перестройку активности коры больших полушарий и подкорковых вегетативных центров. В связи с этим мы сопоставили характеристики основных физиологических ритмов ЭЭГ у школьников-северян осенью и весной – в сезоны с быстрыми и противоположно направленными изменениями температурного и светового режимов.

Дисперсионный анализ показал значимое влияние факторов Сезон и Возраст на спектральные параметры ЭЭГ, избирательное как по диапазону частот, так и топическим характеристикам изменений. Снижение спектральной мощности с возрастом у школьников было наиболее выраженным и касалось всех отведений ЭЭГ в дельта- и тета-диапазонах частот. В альфа-1 и бета-диапазонах тенденция к такому снижению отмечалась в лобных и лобно-височных областях (в альфа-1 – также и в затылочных).

Сезонные изменения в дельта-диапазоне ЭЭГ характеризовались генерализованным снижением спектра мощности в весенний период в сравнении с осенним (рис. 2, а). Изменения спектра мощности в тета-, альфа- и бета-диапазонах были топически избирательными и относительно сходными между собой (рис. 2, б-д). Спектральная мощность ЭЭГ во всех этих диапазонах в лобно-височных (F7, F8) и височных (T3, T4, T5, T6) областях весной была больше, чем осенью, а в затылочных (O1, O2) областях и отведениях Fz, Cz,

Pz, расположенных по сагиттальной линии, – осенью больше, чем весной.

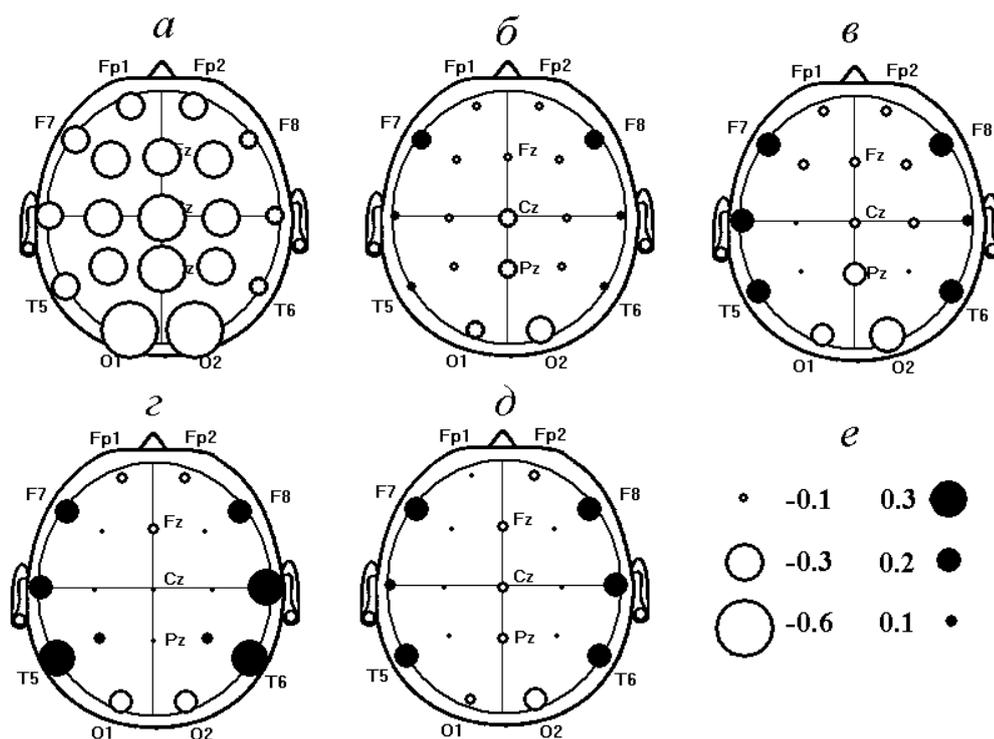
Два сезона исследований различаются противоположным характером фотопериодизма, в конце октября значительно больше продолжительность темного времени суток, в начале апреля – светлого. Установлена взаимосвязь между показателями гормонального статуса человека с длительностью светового дня [8], при этом изменившийся гормональный фон создает предпосылки для дальнейшего развития процесса акклиматизации к изменениям температурного режима [6].

Сдвиг частотного спектра ЭЭГ в сторону медленноволнового (особенно дельта-активности) диапазона в осенний период может как быть связан с перестройками гормонального профиля (снижение концентрации в крови тироксина, тестостерона, эстрадиола [8; 20]), так и отражать снижение общего уровня активации мозга вследствие сокращения афферентации со стороны зрительной системы (относительная сенсорная депривация).

«Восстановление» гормонального профиля, активация зрительной системы в условиях высокой инсоляции в весенний период, очевидно, обуславливает повышение тонуса восходящей активирующей системы мозга. Это приводит к уменьшению амплитудных показателей не только в медленноволновых диапазонах ЭЭГ, но выявляется даже для альфа-ритма (в зонах его типичной локализации).

Дефинитивная организация ЭЭГ характеризуется не только амплитудными соотношениями колебаний потенциалов основных частотных диапазонов ЭЭГ, но и степенью упорядоченности временного взаимодействия волн каждого диапазона со всеми остальными. Для оценки структуры этих взаимодействий использовали показатель Поток, который рассчитывали по матрицам взаимопереходов волн ЭЭГ.

Влияние фактора Возраст на величину показателя Поток особенно заметно в тета-диапазоне частот. Величина показателя значительно возрастает в 12 отведениях из 19, что отражает уменьшение с возрастом роли тета-диапазона частот ЭЭГ как функционального ядра взаимодействия ритмов.



**Рис. 2.** Изменения спектральной мощности в основных диапазонах частот ЭЭГ: сравнение двух сезонов. Белый фон кружков – снижение мощности, черный – повышение (весной по отношению к осени). Шкала в  $\log_{10}(P)$ .  
*a* – дельта-, *б* – тета-, *в* – альфа-1-, *г* – альфа-2-, *д* – бета-диапазоны частот ЭЭГ

Такая динамика показателя Поток соответствует выявленной ранее тенденции к постепенному замещению тета-альфа-ядра взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ у детей младшего возраста на альфа-бета-ядро у школьников средней и старшей возрастной группы [17].

Фактор Сезон оказывал самое заметное влияние (в 11 из 19 отведений) на показатель Поток в тета-диапазоне частот, менее выраженное (в 6 из 19 отведений: P3, P4, C3, T3, T4, T5) в бета-диапазоне и наименьшее (в O2) – в альфа-диапазоне. Во всех случаях весной величина показателя была выше, чем осенью. С учетом численного значения показателя это могло означать увеличение в области положительных значений для тета-диапазона – возрастание его роли в организации устойчивых динамических паттернов волновых компонентов ЭЭГ, увеличение в области отрицательных значений для бета- и альфа-частот – снижение «мощности» данных диапазонов как аттракторов в формировании ядра взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ.

Иными словами, в весенний период обнаруживается тенденция к уменьшению сте-

пени «жесткости» временной упорядоченности волнового паттерна ЭЭГ (ослабление «функциональных ядер» в диапазонах альфа- и бета-ритмов), что может характеризовать пластичность межцентральных взаимодействий, обеспечивающую процесс саморегуляции функционального состояния мозга под давлением комплекса внешних условий и внутренних факторов.

Адекватная работа центральных механизмов управления зависит от полноценности «гомеостатических реакций», которые обеспечивают сохранение определенного функционального уровня структур ЦНС [10]. При изменении условий среды «гомеостатические» механизмы мозга препятствуют значительному отклонению, устраняют развившиеся изменения, возвращают систему к исходному уровню или устанавливают новый функциональный уровень [10; 15].

В условиях чрезвычайных, экстремальных воздействий (на определенных стадиях острой гипоксии) можно видеть постепенное «разрушение» альфа-бета-ядра и формирование тета-функционального ядра взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ. Наблюдае-

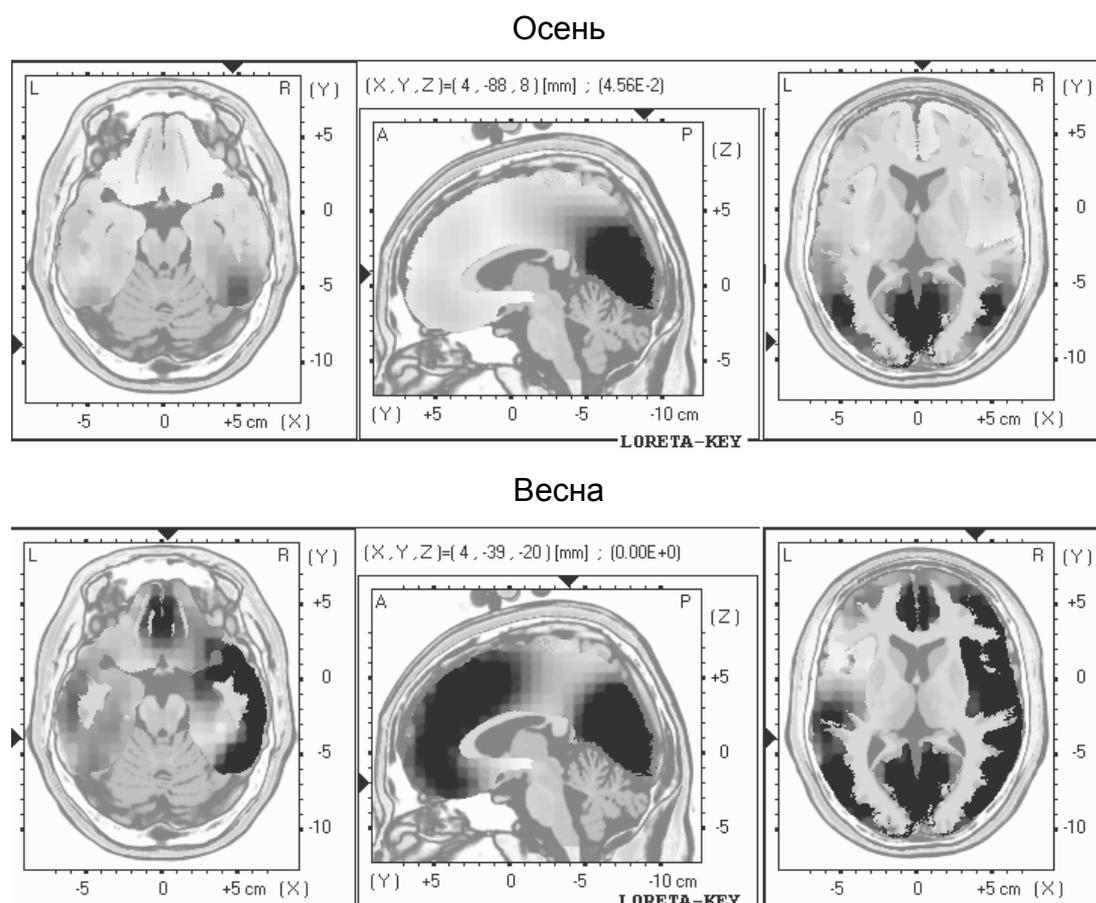
ния электрических эквивалентных дипольных источников показывают, что этим перестройкам соответствует возрастание плотности источников в проекции медиальных и базальных отделов височной и лобной долей, что, по-видимому, связано с активацией этих образований ЦНС [16]. Высказано предположение, что подобное перераспределение источников отражает переключение механизмов регуляции с корково-таламического на более филогенетически древний лимбико-диэнцефальный уровень для обеспечения более устойчивой регуляции основных систем жизнеобеспечения.

В данном исследовании мы также наблюдаем повышение мощности тета-активности в височных областях, однако при этом в тета-диапазоне частот не только не формируется ядро взаимодействия волновых компонентов ЭЭГ, но усиливается роль тета-

активности в качестве «донора» волн. Этим может обеспечиваться стабилизация паттерна межволновых взаимодействий, характерного для деятельного состояния коры больших полушарий и продуктивной когнитивной деятельности.

Применение метода электромагнитной томографии низкого разрешения [24] позволяет проследить изменения плотности источников токов, характеризующих распределение потенциалов на поверхности головы, в структурах коркового типа как на конвексимальной поверхности, так и в базальных и медиальных областях больших полушарий мозга, включая лимбические области.

В исходном состоянии (осень, рис. 3, а) наибольшая плотность источников выявляется в затылочных отделах, что соответствует максимуму топического распределения основного ритма ЭЭГ.



**Рис. 3.** Вовлечение коры медиальных и базальных отделов височных и лобных долей в функциональную реорганизацию активности мозга при напряжении регуляторных механизмов мозга в зимне-весенний период. По осям – расстояние в см. X, Y, Z – плоскости проекции. Срезы (слева – направо): горизонтальный – на уровне парагиппокампальной извилины; парасагиттальный; горизонтальный – на уровне поясной извилины

В весенний период обнаруживается существенное возрастание плотности диполей в базальных и медиальных областях височной и лобной долей, включая передние отделы поясной извилины (рис. 3, б). Очевидно, что это связано с повышением уровня возбуждения структур лимбической системы мозга в весенний период.

Лимбической системе принадлежит центральная роль в интеграции эмоционально-мотивационных и вегетативно-висцеральных компонентов деятельности организма в различных условиях [5]. По-видимому, в условиях длительного воздействия неблагоприятных факторов среды (в том числе холодого, недостаточной инсоляции) возрастает напряжение физиологических систем организма, мозг переходит к иному, чем в обычных условиях, типу регулирования межцентральных отношений.

В определенном смысле усиление влияния лимбико-гипоталамического уровня регуляции в сопоставлении с неокортикальным может отражать возврат к более «раннему» иерархическому уровню морфо-функциональной интеграции ЦНС, который обеспечивает также и более устойчивую гомеостатическую регуляцию основных систем организма в экстремальных условиях.

#### Выводы

1. Сезонный фактор оказывает влияние на показатели гемодинамики мозга у школьников-северян, больше выраженное для детей младшей группы. Изменения от осени к весне включали снижение ЛСК по ЗМА и повышение – по ПМА, повышение тонуса мозговых сосудов, а также возрастание вазомоторной реактивности и реакции на гипокапническую нагрузку.

2. Сезонные изменения ЭЭГ в тета-, альфа- и бета-диапазонах частот характеризовались топически-избирательным повышением спектральной мощности в лобных и височных областях и снижением – в затылочных и теменно-центральных областях в весенний период. По сравнению с осенним периодом спектральная мощность в дельта-диапазоне снижалась во всех отведениях.

3. Сопоставление в осенний и весенний периоды динамики взаимопереходов между

волновыми компонентами ЭЭГ, отражающих взаимодействие основных ритмов ЭЭГ, выявило перестройку процессов саморегуляции функционального состояния мозга. Важную роль в обеспечении и поддержании устойчивости паттернов ЭЭГ играет тета-диапазон частот.

4. В регуляции функционального состояния мозга особое значение имеют структуры лимбической области. Методом электромагнитной томографии низкого разрешения показана активация структур лимбической области, характеризующая повышенные нагрузки на регуляторные механизмы в весенний период в сравнении с осенним.

5. Повышенные нагрузки на механизмы регуляции физиологических функций в осенне-зимний период, находящие отражение в показателях мозгового кровотока, усугубляющиеся воздействием гипоксически-холодового фактора, могут приводить к перестройке в зимне-весенний период процессов саморегуляции функционального состояния мозга на фоне нарастающего дефицита адаптационных резервов.

1. *Аршавский, В.В.* Межполушарная асимметрия в системе поисковой активности (к проблеме адаптации человека в приполярных регионах северо-востока СССР) / В.В. Аршавский. – Владивосток : Изд-во АН СССР, 1988. – 136 с.

2. *Бойко, Е.Р.* Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере / Е.Р. Бойко. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 190 с.

3. *Гельсгорн, Э.* Регуляторные функции автономной нервной системы / Э. Гельсгорн. – М. : Иностранная литература, 1948. – 414 с.

4. *Данишевский, Г.М.* Патология человека и профилактика заболеваний на Севере / Г.М. Данишевский. – М. : Медицина, 1968. – 412 с.

5. *Дуус, П.* Топический диагноз в неврологии / П. Дуус. – М. : ИЦП «Вазар-Ферро», 1996. – 381 с.

6. *Евдокимов, В.Г.* Модулирующее влияние факторов Севера на кардиореспираторную систему человека в онтогенезе / В.Г. Евдокимов, О.В. Рогачевская, Н.Г. Варламова. – Екатеринбург : УРО РАН, 2007. – 257 с.

7. *Королева, М.Н.* Адаптационные возможности мозгового кровотока и варианты их нарушений при церебральной ангиодистонии у детей : автореф. дис. ... канд. мед. наук / М.Н. Королева. – СПб. : МАПО, 2000. – 23 с.

8. Кубасов, Р.В. Адаптивные реакции эндокринной системы у детей в условиях контрастной фотопериодики / Р.В. Кубасов, Д.Б. Демин, А.В. Ткачев // Физиология человека. – 2006. – Т. 32, №4. – С. 89–96.
9. Лелюк, В.Г. Ультразвуковая ангиология / В.Г. Лелюк, С.Э. Лелюк. – М. : Реальное Время, 2003. – 323 с.
10. Медведев, В.И. Адаптация человека / В.И. Медведев. – СПб. : Ин-т мозга человека РАН, 2003. – 584 с.
11. Оценка функциональных резервов организма человека на основе метода ультразвуковой доплерографии / Н.А. Агаджанян и др. // Физиология человека. – 2008. – Т. 34, №3. – С. 65–69.
12. Раппопорт, Ж.Ж. Адаптация ребенка на Севере / Ж.Ж. Раппопорт. – Л. : Медицина, 1979. – 192 с.
13. Рожков, В.П. Сравнительная оценка показателей гемодинамики мозга у детей школьного возраста, проживающих на Дальневосточном и Европейском Севере / В.П. Рожков, И.В. Николаев, С.И. Сороко // Российский физиологический журн. им. И.М. Сеченова. – 2011. – Т. 97, №10. – С. 1113–1133.
14. Росин, Ю.А. Допплерография сосудов головного мозга у детей / Ю.А. Росин. – СПб. : Санкт-Петербургское книжное изд-во, 2004. – 110 с.
15. Сороко, С.И. Основные типы механизмов саморегуляции мозга / С.И. Сороко, С.С. Бекшаев, Ю.А. Сидоров. – Л. : Наука, 1984. – 152 с.
16. Сороко, С.И. «ЭЭГ-маркеры» нарушения системной деятельности мозга при гипоксии / С.И. Сороко, С.С. Бекшаев, В.П. Рожков // Физиология человека. – 2007. – Т. 33, №5. – С. 39–53.
17. Сороко, С.И. ЭЭГ корреляты генофенотипических особенностей возрастного развития мозга у детей аборигенного и пришлого населения Северо-Востока России / С.И. Сороко, С.С. Бекшаев, В.П. Рожков // Российский физиологический журн. им. И.М. Сеченова. – 2012. – Т. 98, №1. – С. 3–26.
18. Чеснокова, В.Н. Изменение гемодинамики у студентов в условиях северного региона в течение учебного года / В.Н. Чеснокова, А.В. Грибанов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №1. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/101-5139>.
19. Шахнович, А.Р. Диагностика нарушений мозгового кровообращения. Транскраниальная доплерография / А.Р. Шахнович, В.А. Шахнович. – М. : Медицина, 1996. – 446 с.
20. Эндокринная система и обмен веществ у человека на Севере / А.В. Ткачев и др. – Сыктывкар : Коми НЦ УрО РАН, 1992. – 156 с.
21. Яруллин, Х.Х. Клиническая реоэнцефалография / Х.Х. Яруллин. – М. : Медицина, 1983. – 271 с.
22. Aaslid, R. Transcranial Doppler sonography / Ed.R. Aaslid. – Wien ; N.Y. : Springer Verlag, 1986. – P. 39–56.
23. Bode, H. Pediatric applications of transcranial Doppler sonography / H. Bode. – Wien ; N.Y. : Springer Verlag, 1988. – 280 p.
24. Pascual-Marqui, R.D. Review of methods for solving the EEG inverse problem / R.D. Pascual-Marqui // International Journal of Bioelectromagnetism. – 1999. – Vol. 1. – P. 75–86.
25. Pickard, J.D. Cerebrovascular reactivity and its application / J.D. Pickard, R.J. Nelson, A.H. Lovick // Cerebral blood flow and metabolism. – Manchester ; N.Y. : Manchester University Press, 1990. – P. 48.

## SEASONAL CHANGES OF THE BRAIN HEMODYNAMICS AND BIOELECTRICAL ACTIVITY IN CHILDREN AND ADOLESCENTS FROM THE EUROPEAN NORTH

V.P. Rozhkov, S.S. Bekshaev, S.I. Soroko

*I.M. Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg*

The brain hemodynamics and bioelectrical activity were studied in schoolchildren from the North aged 7–17 years during autumn and spring seasons that distinguished by contrast changes of temperature and light regimes. Seasonal effects upon the brain hemodynamics consist of alterations of blood velocities, tone of cerebral vessels and vasomotor reactivity. EEG changes characterized during spring period by topic-selective increase of spectral power in theta-, alpha- and beta-frequencies in frontal and temporal areas as well as generalized decrease of delta-frequencies that reflected a rise of both activity of the limbic-reticular complex and the brainstem reticular system tone. The low resolution electromagnetic tomography showed the limbic region activation that related to the brain regulatory mechanisms overloading during winter-spring period.

**Keywords:** adaptation, cerebral circulation, EEG, seasons, children, North.