



СЛОЖНОСТЬ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ ВРЕМЕННОЙ СИСТЕМНОЙ ДЕДИФФЕРЕНЦИАЦИИ

БАХЧИНА А.В.*, ФГБУН ИП РАН, Москва; ФГАОУ ВО НИУ ННГУ имени Н.И. Лобачевского,
Нижегород, Россия,
e-mail: nastya18-90@mail.ru

АЛЕКСАНДРОВ Ю.И.**, ФГБУН ИП РАН, Москва, Россия
e-mail: yuraalexandrov@yandex.ru

В статье приводятся результаты исследования соотношения характеристик variability сердечного ритма с характеристиками системной организации поведения, которая описывается как актуализация функциональных систем разного «возраста». Соотношение количества «старых» (реализующих менее дифференцированные взаимодействия) и «новых» (реализующих более дифференцированные взаимодействия) систем отражает степень дифференцированности актуализированного в поведении набора функциональных систем. Variability сердечного ритма отражает согласование активности клеток сердца с активностью клеток других органов и тканей, которое лежит в основе реализации функциональных систем. Основная гипотеза исследования состояла в следующем: при временной системной дедифференциации (сдвиге соотношения «старых» и «новых» систем в актуализированном наборе в пользу первых) сложность сердечного ритма снижается. В исследовании проводили измерения RR-интервалов в условиях стресса и приема алкоголя. Сложность сердечного ритма оценивали вычислением аппроксимированной энтропии. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о снижении энтропии сердечного ритма в обоих экспериментальных условиях, и, следовательно, можно говорить о том, что временная системная дедифференциация отражается в снижении сложности динамики сердечного ритма.

Ключевые слова: variability сердечного ритма, системная организация поведения, системная дедифференциация, аппроксимированная энтропия, стресс, алкоголь.

Введение

Вариability сердечного ритма (ВСР) – это изменчивость временных расстояний между соседними циклами сердечных сокращений (RR-интервалов).

Современные теории, описывающие природу ВСР, такие, например, как модель нейровисцеральной интеграции (Thayer, Lane, 2012), двухконтурная модель нервно-гуморальной регуляции сердечного ритма (Баевский, 2004), поливагальная теория (Porges, 2009),

Для цитаты:

Бахчина А.В., Александров Ю.И. Сложность сердечного ритма при временной системной дедифференциации // Экспериментальная психология. 2017. Т. 10. № 2. С. 114–130. doi:10.17759/exppsy.2017100210

* Бахчина А.В. Кандидат психологических наук, научный сотрудник, Институт психологии Российской академии наук (ФГБУН ИП РАН); научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского» (ФГАОУ ВО НИУ ННГУ имени Н.И. Лобачевского). E-mail: nastya@mail.ru

** Александров Ю.И. Доктор психологических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт психологии Российской академии наук (ФГБУН ИП РАН). E-mail: yuraalexandrov@yandex.ru



строятся на изначальных идеях К. Бернарда (конец XIX в.) о нейрокардиальных связях и развивают их, лишь уточняя границы структур мозга, изменения активности которых сопровождаются изменениями сердечного ритма. В основе данных концепций лежит положение о том, что нервная система управляет активностью сердца (или регулирует ее) в соответствии с запросами внешней среды. В таком подходе ВСР как феномен является результатом циклических модуляций со стороны регуляторных центров продолговатого и промежуточного мозга, различных отделов коры. Эти модуляции вносятся в активность синоатриального узла сердца посредством передачи эфферентных сигналов через нервные пути парасимпатического и симпатического отделов вегетативной нервной системы. ВСР, таким образом, является результатом нервного управления активностью сердца.

В результате многочисленных исследований, выполненных в рамках описанных концепций, была сформулирована система физиолого-медицинских интерпретаций ВСР (Malik et al., 1996; von Borell et al., 2007). В первом случае интерпретация ВСР проводится в терминах функциональных состояний как специфических режимов энергообеспечения организма. В данном случае на основании параметров ВСР определяется статус организма по шкале (разного уровня сложности: от линейных до трехмерных) адаптивности (большая/меньшая адаптивность или более/менее ресурсозатратный режим) (Баевский, 2004; Машин, 2011). Второй вариант, являющийся логическим предшественником первого, предоставляет описание относительной активности отдельных физиологических структур, участвующих в управлении/регуляции сердечного ритма, а именно парасимпатического и симпатического отделов вегетативной нервной системы (Баевский, 2004; Рунова и др., 2013; Borell et al., 2007). Так, применяя спектральный анализ, вычисляются мощность низкочастотных колебаний ВСР (НЧ, 0,04–0,15 Гц), которая интерпретируется как активность симпатической нервной системы, и мощность высокочастотных колебаний ВСР (ВЧ, 0,15–0,6 Гц), которая интерпретируется как активность парасимпатической нервной системы; коэффициент НЧ/ВЧ отражает соотношение симпатических и парасимпатических воздействий на сердце. При этом динамика ВСР рассматривается как сумма этих воздействий.

Данные интерпретации являются предметом активной научной дискуссии, поскольку исследователями был накоплен целый ряд противоречащих им эмпирических данных (подробнее см. обзоры: Billman, 2013; Reyes del Paso et al., 2013). Кроме того, существенным недостатком обсуждаемых концепций является специфика эмпирической базы – в их основе лежат результаты экспериментов, проведенных на животных – наркотизированных или обездвиженных (Курьянова, 2010; Lombardi et al., 1990), с участием человека, находящегося в покое (лежа или сидя, с закрытыми глазами) (Баевский, 2004; Malik et al., 1996), т. е. условия данных экспериментов исключают поведенческую активность субъекта исследования. Следовательно, невозможно экстраполировать результаты такого рода экспериментов и полученные в них закономерности на реальную поведенческую активность субъекта.

Разрешение приведенных противоречий представляется возможным в рамках системно-эволюционного подхода (Швырков, 1995) с построением системного описания механизмов поведения в связи с ВСР. Именно в рамках теории функциональных систем и сформированного на ее основе системно-эволюционного подхода разработано представление об общеорганизменных системах, в которых согласуется активность нейронов и элементов, принадлежащих к самым разным органам и тканям организма. Это согласование, устанавливающееся в актах научения, в процессе которых осуществляется, в частности, «пригонка ... вегетативного компонента к задаче» формируемого поведения (Анохин, 1968, с. 361),



и обеспечивает достижение результатов в целостном взаимодействии индивида и среды. В таком случае классические представления о природе ВСР (приведенные выше) требуют существенного пересмотра в связи с лежащей в их основе антисистемностью «управленческой» и «регуляторной» терминологии, на которую указывал еще П.К. Анохин: «... выражение “управляющая система” (УС) ... ни семантически, ни логически не может быть принято теорией функциональных систем. <...> Что означает это выражение? Ничего, кроме традиционного игнорирования результата системы при обсуждении кибернетических закономерностей. Выражение “УС” ... предполагает, что управляемый объект не является компонентом “УС”, т. е. ... находится за пределами самой “УС”» (1973, с. 36).

Ранее другой отечественный физиолог В.Н. Черниговский также провел анализ механизмов включенности внутренних органов в общеорганизменные процессы, основываясь на теории функциональных систем (Черниговский, 1975). В.Н. Черниговский полагал, что поведение висцеральных «систем» в организме (их саморегуляция), обусловленное реализацией генетически детерминированной программы, находится в согласовании с высшими отделами нервной системы. Тогда поведение висцеральных «систем» можно определить как процесс оптимизации всех внутренних перестроек организма (изменения в активности внутренних органов) в соответствии с текущими задачами взаимодействия субъекта со средой. В данном случае ВСР рассматривается как индикатор оптимизации активности сердца в соответствии с результатами реализуемого поведения, т. е. проявлением процесса взаимодействия элементов функциональной системы (по П.К. Анохину).

Системная организация поведения. Системно-эволюционный подход рассматривает физиологическое и психическое как разные аспекты описания единых системных процессов – актуализации в поведении взаимодействующих функциональных систем, составляющих структуру индивидуального опыта (Александров, 2009). С этих позиций, как уже отмечалось, функциональные системы рассматриваются не только как «мозговые», но и как общеорганизменные, т. е. подразумевается, что клетки разных тканей, а не только нейроны, проявляют активность и *взаимосодествуют* в системах, направленных на достижение пусть и различных, но единых для целостного организма результатов. Следовательно, не только характеристики активности нейронов, но также и характеристики клеток «тела» непосредственно связаны с особенностями реализуемых в поведении функциональных систем. Так, П.К. Анохин, подробно описывая специфику работы дыхательного компонента поведенческой активности, его взаимодействие с другими физиологическими компонентами и подстройку к особенностям того или иного поведения, заключает: «*дыхательный компонент ... не может не быть специфичным для каждого отдельного состояния животного*» (Анохин, 1968, с. 361; курсив П.К. Анохина).

Реализация конкретного поведенческого акта обеспечивается активностью набора функциональных систем в их взаимодействии. Функциональная система (ФС) как элемент структуры индивидуального опыта фиксируется в специализации группы нейронов. Фиксация новой ФС в процессе научения не вытесняет ФС из уже имеющегося набора, а модифицирует их. Развитие индивида проявляется в структуре индивидуального опыта как формирование новых ФС, обеспечивающих более дифференцированные взаимодействия индивида со средой, чем ранее сформированные ФС (Александров, 2009; Швырков, 1995).

Исходя из системных представлений об организации поведения, можно полагать, что сердце, включаясь в обеспечение поведенческих актов, направленных на достижение разных результатов, согласует свою активность с другими элементами организма, образуя, таким



образом, ФС. Поэтому активность сердца, согласуясь, в частности, с активностью центральных и периферических нейронов, как мы полагаем, непосредственно взаимосвязана с целью поведения. Тогда ВСР является результатом процесса согласования активности различных элементов организма и зависит от базовых характеристик системной организации реализуемого поведения, в том числе от степени дифференцированности актуализированного набора систем, т. е. от соотношения «старых» (приобретенных относительно давно в онтогенезе) и «новых» (приобретенных относительно недавно) систем в актуализированном наборе. Так, поведение, сформированное на более поздних этапах развития, является, как правило, более дифференцированным соотношением организма и среды и обеспечивается набором систем сравнительно более высокой дифференциации (Александров, 2009; Чуприкова, 1997).

Системная дедифференциация – это обратимое увеличение вклада ранее сформированных систем в обеспечение поведения (Александров, 2016). Дедифференциация характеризуется такими аспектами поведения, как повышение эмоциональности, упрощение, игнорирование деталей, снижение когнитивного контроля и пр. (Александров, 2016). Мы полагаем, что временная системная дедифференциация сопровождается редукцией ВСР, так как уменьшается и количество актуализированных в поведении систем, и количество межсистемных связей – как вертикальных (между системами разного возраста), так и горизонтальных (между системами, принадлежащими к одному периоду развития).

Сложность сердечного ритма. Вместо классических статистических или спектральных показателей ВСР, о которых говорилось выше, мы предлагаем использовать методы нелинейной динамики, а именно – оценку сложности ВСР.

Понятия сложности и энтропии являются базовыми в теории информации. А.Н. Колмогоров дал алгоритмическое определение понятию сложности: «относительной сложностью» (или энтропией) объекта y при заданном x является минимальная длина «программы» p получения y из x » (Колмогоров, 1965). Такое определение стало универсальным определением сложности и позволило применять эти понятия к описанию «индивидуальных (конечных) объектов» (Колмогоров, 1969; Звонкин, Левин, 1970). Во многом поэтому понятие сложности, преобразованное в понятие «сложность сигнала», смогло перейти из математики в биологию, электрофизиологию (Дарховский и др., 2002; Richman, Moogman, 2000) и психофизиологию (Крылов, 2014). В этих областях методы нелинейной динамики стали представлять как наиболее подходящие для изучения и понимания биологических «систем».

Относительно неравномерных временных рядов, какими являются последовательности RR-интервалов, энтропийные способы определения сложности последовательности стали применяться и развиваться с 1991 г. – после определения аппроксимированной энтропии (Pincus, 1991). Аппроксимированная энтропия (ApEn) является характеристикой «внутреннего порядка» временной последовательности RR-интервалов (Гудков, 2009; Acharya et. al., 2006). Математически ApEn отражает вероятность обнаружения в последовательности двух соседних векторов, отличающихся при переходе из пространства размерностью m в пространство размерностью $m+1$. Иначе говоря, ApEn последовательности тем выше, чем больше в ней присутствуют неодинаковые изменения.

Наиболее существенными для психофизиологических исследований преимуществами ApEn (по сравнению с другими методами нелинейной динамики) являются следующие ее характеристики: 1) ApEn выражает степень сложности сигнала, т. е. чем выше регулярность сигнала, тем ниже величина ApEn (ниже сложность) и наоборот; 2) алгоритм вычисления ApEn нечувствителен к кратковременным, локальным шумам в сигнале; 3) ApEn



позволяет получать надежные оценки, используя короткие последовательности данных; 4) АрЕп не коррелирует с выраженностью дыхательной аритмии в сердечном ритме и со стандартным отклонением и спектральными показателями анализируемой последовательности, т. е. является относительно независимым показателем (Манило, Зозуля, 2007; Pincus, 1991; Acharya et al., 2006; Seely, Maclem, 2004).

Предлагаемое ниже исследование направлено на проверку гипотезы о том, что временная системная дедифференциация, т. е. сдвиг системной организации поведения в сторону повышения «веса» функциональных систем, сформированных на более ранних этапах развития, будет сопровождаться изменениями в активности сердца в сторону снижения сложности динамики сердечного ритма.

Программа исследования

Было проведено две экспериментальные серии с формированием условий временной дедифференциации состояния субъекта поведения: стресс и введение алкоголя.

Первая экспериментальная серия. Стресс является одним из состояний, в которых наблюдается временная системная дедифференция (Александров, 2016). Это обосновано тем, что в исследованиях стресса показаны такие характерные для этого состояния аспекты, как: повышенная эмоциональность, игнорирование деталей (Schwabe et al., 2011), проявление более привычных стратегий поведения (Schwabe, Walraf, 2009), проявление более онтогенетически ранних форм поведения в ситуации «морального выбора», регрессия (Знаменская и др., 2016), переход от аналитических (рациональных) к интуитивным обоснованиям при принятии решений (Yu, 2016), переход к более эволюционно старым механизмам поведения (Парин и др., 2007). Кроме того, прямые нейрогистохимические эксперименты показали понижение уровня активации нейронов (по экспрессии гена *c-fos*) корковых (но не подкорковых) структур в ситуации стресс-индуцированного научения (Булава, Гринченко, 2016).

В качестве экспериментальной модели стресса использовалось значимое для участников эксперимента публичное выступление (как часть признанной модели Trier Social Stress Test (Childs et al., 2006)), а именно проводилась регистрация сердечного ритма у студентов и аспирантов при защите квалификационных работ (22 человека, 11 мужчин, возраст от 19 до 30 лет, $M = 24,14$, $SD = 3,48$, $Med = 24$). Все испытуемые дали информированное письменное согласие на участие в исследовании.

Беспроводная регистрация сердечного ритма проводилась с использованием датчика Zephyr (НхМ ВТ) и программы «HR-reader» (Полевая и др., 2012). Фиксировались моменты начала и окончания выступления. Характеристики сердечного ритма оценивались за период 5 мин до начала выступления и в течение собственно выступления.

Вторая экспериментальная серия. Введение алкоголя можно использовать как экспериментальное условие временной дедифференциации состояния субъекта поведения, так как алкоголь оказывает угнетающее влияние на активность более «новых» элементов индивидуального опыта (Alexandrov et al., 1993), а именно относительное количество нейронов, фиксирующих такие элементы при обучении индивида инструментальному поведению, уменьшается (Александров и др., 1990). Это может проявляться в трудностях при обучении новому поведению и автоматизации приобретенного навыка (Безденежных, Александров, 2014) или в снижении мозгового обеспечения выполнения задачи категоризации слов (в большей степени при использовании позднее усвоенного иностранного по сравнению с ранее приобретенным родным языком (Alexandrov et al., 1998)).



Введение алкоголя производилось следующим образом: у участников исследования, которых заранее информировали о необходимости не употреблять алкоголь минимум за сутки до эксперимента, измеряли массу тела (кг) и концентрацию алкоголя в выдыхаемом воздухе (BrAC – breath alcohol content, мг/л, алкотестер: AlcoDigital AL7000 Pro Breathalyzer). Далее участники в течение 30 мин выпивали два стакана с алкогольным (экспериментальная группа) или безалкогольным (контрольная группа) напитком при просмотре фильма, выбранного из серии «БиБиСи Планета Земля» (длительность фильмов 40–45 мин). Затем вновь проводилось измерение BrAC. Этанол применялся в дозе 1 г/кг массы тела. В исследовании был использован медицинский спирт, ≈96% этанола. Расчет объема спирта (мл) проводился умножением веса испытуемого на коэффициент 1,3. Средний уровень алкоголя BrAC в конце эксперимента в экспериментальной группе составлял $0,72 \pm 0,11$ мг/л. Спирт смешивали с фруктовым соком, итоговый объем всегда составлял 750 мл. В контрольной группе сок смешивали с водой в тех же пропорциях.

В ходе всего времени эксперимента производилась запись сердечного ритма с использованием датчика Zephyr (HxM BT) и программы «HR-reader» Характеристики сердечного ритма сравнивались за периоды 10, 20, 30, 40 минут от начала приема напитка.

В эксперименте приняли участие 37 человек: экспериментальная группа – 19 человек (15 мужчин, возраст от 22 до 36 лет, $M = 26,68$, $SD = 3,88$, $Med = 26$), контрольная группа – 18 человек (14 мужчин, возраст от 22 до 34 лет, $M = 25,56$, $SD = 3,57$, $Med = 25$). Все участники исследования подписали письменное информированное согласие.

Вычисление аппроксимированной энтропии для анализируемых последовательностей RR-интервалов (длина последовательностей $N = 300$) производилось по стандартному алгоритму (Pincus, 1991) с входными параметрами: $m = 2$ (размерность вложения), $r = 0,5 * \epsilon$ («фильтрующий фактор»). Алгоритм вычислений был реализован в программе для ЭВМ на языке Python (Демидовский А.А.). Дополнительно для последовательностей RR-интервалов вычисляли среднюю частоту сердечных сокращений (ЧСС, уд/мин) и стандартное отклонение (SDNN, мс).

Для *статистического анализа* полученных данных использовали программу STATISTICA 10. Для проверки нормальности распределения переменных использовали критерий Шапиро–Уилка. Для сравнения переменных в условиях до и во время стресса использовали критерий Стьюдента для связанных выборок (для переменных, имеющих нормальное распределение: ЧСС) и критерий Уилкоксона (для переменных, распределения которых отличались от нормального: ApEn, SDNN). Для оценки динамики переменных от момента приема алкогольного или безалкогольного напитков использовали дисперсионный анализ с повторными измерениями (ANOVA) (для переменных, имеющих нормальное распределение: ApEn, ЧСС) и критерий Фридмана (для переменных, распределения которых отличались от нормального: SDNN). Для сравнения контрольной и экспериментальной групп использовали критерий Стьюдента для независимых выборок (для переменных, имеющих нормальное распределение: ApEn, ЧСС) и критерий Манна–Уитни (для переменных, распределения которых отличались от нормального: SDNN). Во всех статистических оценках достоверными считали различия при уровне $p \leq 0,05$.

Результаты исследования

Сравнение характеристик ВСР до и во время стресса показало достоверное снижение ApEn ($p < 0,05$, критерий Уилкоксона) (рис. 1Б), стандартного отклонения RR-интервалов



($p < 0,01$, критерий Уилкоксона) и возрастание ЧСС ($p < 0,05$, критерий Стьюдента для связанных выборок) (табл. 1).

Таблица 1

Описательные статистики характеристик variability сердечного ритма до и во время стресса

Показатель ВСР	До стресса				Во время стресса			
	М	Med	SD	25% 75%	М	Med	SD	25% 75%
ApEn	0,58	0,56	0,18	0,45 0,75	0,48	0,43	0,19	0,35 0,57
SDNN (мс)	49,50	43,17	25,11	34,17 62,50	32,30	26,91	21,87	14,25 49,01
ЧСС (уд/мин)	102	101	17,5	88 118	129	128	21,8	113 146

Примечание: «*» – $p \leq 0,05$, критерий Стьюдента для ЧСС и критерий Уилкоксона для ApEn и SDNN.

В экспериментальной группе при сравнении характеристик ВСР за периоды времени от начала приема спиртного напитка (10, 20, 30, 40 мин) была выявлена динамика снижения ApEn сердечного ритма от начала к 30 минуте (табл. 2, рис. 1А) ($F[3]=13,17$, $p < 0,01$, ANOVA). От 30 мин к 40 мин наблюдалось увеличение энтропии ($p < 0,05$, критерий Стьюдента), но не достигающее изначального уровня – ApEn в начале эксперимента (10 мин) была выше, чем в конце (40 мин) ($p < 0,01$, критерий Стьюдента). В динамике SDNN отсутствовали достоверные изменения ($\chi^2=3,57$, $p > 0,05$, критерий Фридмана). Динамика ЧСС характеризовалась возрастанием в середине периода эксперимента – к 30 мин ($F[3]=4,29$, $p < 0,01$, ANOVA).

В контрольной группе при сравнении характеристик ВСР за периоды времени от начала приема напитка (10, 20, 30, 40 мин) было выявлено отсутствие достоверных изменений в динамике ApEn ($F[3]=1,62$, $p > 0,05$, ANOVA) (табл. 2, рис. 1А). В динамике SDNN отсутствовали достоверные изменения ($F[3]=1,76$, $p > 0,05$, ANOVA). В динамике ЧСС выявлено снижение после 10 мин от употребления напитка ($F[3]=7,54$, $p < 0,01$, ANOVA) (табл. 2).

Значения ApEn были достоверно выше в контрольной группе по сравнению с экспериментальной на 20, 30 и 40 минутах эксперимента (критерий Стьюдента) (табл. 2, рис. 1А). В эти же периоды значения ЧСС были достоверно ниже в контрольной группе в сравнении с экспериментальной. Значения SDNN не отличались в контрольной и экспериментальной группах (критерий Манна–Уитни) (табл. 2).

Подробнее результаты анализа приведены в таблице 2.

Обсуждение результатов

В данной работе продемонстрировано снижение сложности сердечного ритма при стрессе и алкоголизации, что, согласно исходному предположению, рассматривается нами как проявление временной системной дедифференциации.

Результаты проведенного нами анализа динамики ВСР при стрессе согласуются с имеющимися в литературе примерами снижения сложности сердечного ритма при экзаменационном стрессе (Melillo et al., 2011) и геморрагическом шоке (Batchinsky et al., 2007). Примечательно, что если рассматривать шок как крайнюю степень выраженности стресса

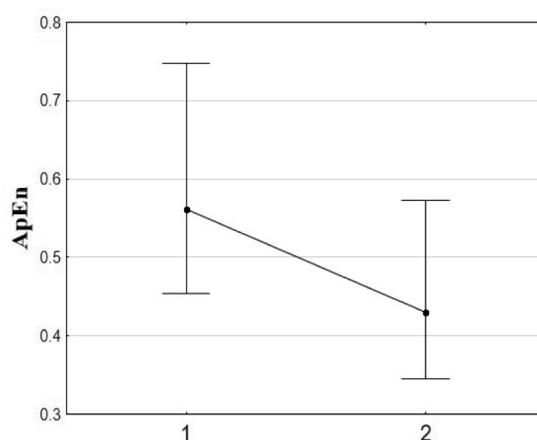
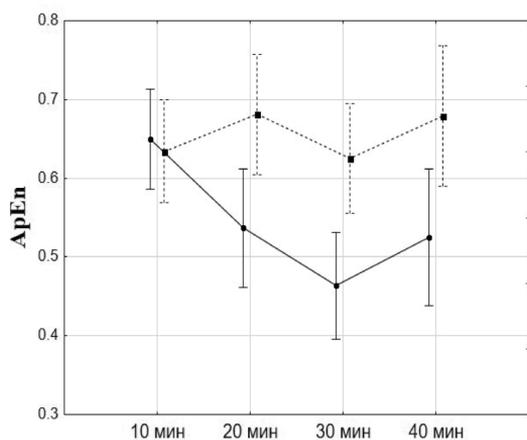


Таблица 2

Динамика характеристик variability сердечного ритма от начала приема алкогольного и безалкогольного напитков

Время от начала приема напитка	10 мин			20 мин			30 мин			40 мин		
	М Med	SD	25% 75%	М Med	SD	25% 75%	М Med	SD	25% 75%	М Med	SD	25% 75%
Алкоголь АрЕп	0,65 0,65 *&#	0,14	0,52 0,78	0,54 0,54 &	0,15	0,44 0,66	0,46 0,48 #	0,13	0,38 0,57	0,52 0,55	0,17	0,39 0,65
Контроль АрЕп	0,63 0,64	0,13	0,56 0,73	0,68 0,72 +	0,17	0,59 0,82	0,63 0,64 +	0,16	0,49 0,71	0,67 0,74 +	0,21	0,58 0,82
Алкоголь SDNN (мс)	59,96 54,96	24,30	44,40 67,69	67,50 55,42	31,56	44,58 80,43	69,99 60,27	41,79	42,39 69,12	65,09 57,39	32,16	41,97 74,17
Контроль SDNN (мс)	73,25 66,34 &	28,78	48,10 99,84	78,44 73,57	29,58	60,52 87,16	86,43 78,33	37,11	66,67 105,13	82,70 71,23	44,25	51,41 131,97
Алкоголь ЧСС (уд/ мин)	83 83 &	11,08	77 88	83 83 &	10,25	80 89	85,95 86,73	11,20	82 94	86 88	14,02	81 94
Контроль ЧСС (уд/ мин)	79 78 *&#	11,21	67 86	75 75 +	10,69	69 81	75,54 72,62 +	10,47	69 83	75 73 +	11,10	69 81

Примечание: «+» – $p < 0,05$ при сравнении контрольной и экспериментальной групп, критерий Манна–Уитни для SDNN, критерий Стьюдента для АрЕп и ЧСС; «*» – $p < 0,05$ при сравнении с этапом 20 мин, «&» – $p < 0,05$ при сравнении с этапом 30 мин, «#» – $p < 0,05$ при сравнении с этапом 40 мин, критерий Уилкоксона для SDNN в контрольной группе и критерий Стьюдента для АрЕп, ЧСС и SDNN в экспериментальной группе.



А

Б

Рис. 1. Динамика сложности сердечного ритма (АрЕп) при употреблении алкогольного (сплошная линия) и безалкогольного (пунктирная линия) напитков (А) (средние значения и стандартные отклонения); при стрессе (Б): 1) 5 мин до начала публичного выступления, 2) в период публичного выступления (значения медиан и квартилей)



(Парин и др., 2007), то сопоставление изменений сложности сердечного ритма при стрессе (по нашим данным и данным литературы) и при шоке указывает на большее (в 4 раза) снижение энтропии сердечного ритма при шоке, чем при стрессе. Это означает, что снижение сложности сердечного ритма при стрессе может быть количественно связано с интенсивностью стресса.

Нами не были найдены результаты исследований последствий введения алкоголя, в которых было бы продемонстрировано снижение сложности сердечного ритма (по энтропийным или иным нелинейным параметрам), однако встречаются исследования, результаты которых демонстрируют снижение стандартного отклонения ВСР и спектральной плотности мощности в диапазоне высоких частот (Asharya et al., 2006).

Полученные нами в этой работе данные относительно снижения сложности сердечного ритма от начала приема спиртного напитка к 30 минуте совпадают с описанной в литературе динамикой резорбции этанола в течение кинетической фазы, продолжительность которой колеблется (в зависимости от дозы, индивидуальных метаболических характеристик и опыта употребления алкоголя) от 20 до 60 мин (Баринская и др., 2007). Данный период, когда концентрация алкоголя в крови и других биосредах увеличивается, после чего наступает ее снижение, известен как фаза элиминации. Можно предполагать, что при более длительной регистрации сердечного ритма (до трех часов) будет наблюдаться постепенное возрастание его сложности, но более медленное, чем первоначальное снижение, так как фаза элиминации в кинетике этанола значительно более длительная, чем фаза резорбции. Интересным является тот факт, что подобное наблюдаемому в наших данных снижению сложности сердечного ритма показано и для острого введения кокаина (вероятно, еще одного «дедифференциатора»), причем АрЕп снижается в этом случае тем больше, чем выше вводимая доза (Newlin et al., 2000). Таким образом, снижение сложности сердечного ритма не только качественно отражает наличие системной дедифференциации, но и, по всей видимости, количественно связано с ее степенью.

На основании вышеописанных результатов можно сформулировать гипотезу о положительной связи степени дифференцированности систем, обеспечивающих поведение, и сложности сердечного ритма, регистрируемого в этом поведении (рис. 2). Эта связь объясняется тем, что с увеличением количества систем¹, актуализированных в поведении, и соответствующим ростом количества межсистемных связей растет количество элементов, с которыми согласуется активность сердца для достижения общеорганизменного результата. Ранее было показано, что при переходе от одного поведенческого акта к другому (т. е. при изменении цели поведения) изменяется как состав вовлекающихся в поведение центральных нейронов, так и свойства их активности, в то время как изменения периферических нейронов в процессе данного перехода касаются в большей степени не состава участвующих клеток (они вовлекаются в разное поведение), а характеристик их активности; таким образом, одни и те же периферические нейроны в разных актах могут согласовывать свою активность с разными составами центральных нейронов (Александров, 1989). Мы полагаем, что характеристики активности сердца (и других внутренних органов) сходны с харак-

¹ В ходе индивидуального развития возникают все более дифференцированные поведенческие акты (с точки зрения достигаемых во взаимодействии со средой результатов), которые присоединяются к ранее сформированным. Поэтому возрастание степени дифференцированности функциональных систем непосредственно связано с ростом их количества.



теристиками активности периферических нейронов: сердце вовлекается в самые разные формы поведения, согласуя свою активность с разными наборами центральных нейронов. С данным положением согласуются результаты многих исследований, демонстрирующих положительные корреляции между активностью коры головного мозга (фМРТ, ПЭТ) и характеристиками ВСР. Например, показаны положительные корреляции между мощностью высокочастотных колебаний сердечного ритма и активностью: в области хвостатого ядра, инсулы, медиальной префронтальной коры при просмотре эмоциональных видеоклипов (Lane et al., 2009), в области передней поясной извилины в задаче Струпа (Matthews et al., 2004), в области гипоталамуса, мозжечка, миндалина, гиппокампа, таламуса, дорсомедиальной и дорсолатеральной коры, задней островковой коры, средней височной коры и др. при выполнении моторной задачи (grip task) (Napadow et al., 2008). Это положение также объясняет многие эффекты интероцептивной включенности в эмоциональные, когнитивные, и, в целом, поведенческие процессы (Crithley, Harrison, 2013).

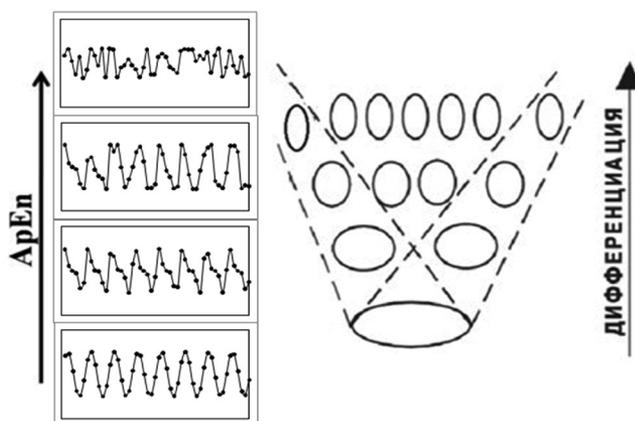


Рис. 2. Схема соотношения сложности динамики сердечного ритма и дифференцированности структуры индивидуального опыта, актуализированного в поведении

Дополнительными аргументами в пользу нашей гипотезы являются данные литературы о связи сложности динамики сердечного ритма и эмоциональности поведения. Стоит отметить, что ситуации повышенной эмоциональности также характеризуются временным снижением дифференцированности актуализированного в поведении набора функциональных систем (Александров, 2006). В своем исследовании Г. Валенца с соавторами (Valenza et al., 2012) использовали изображения из базы IAPS для сопоставления параметров эмоций и показателей ВСР; результаты данного исследования указывают на то, что АрЕп выше при просмотре нейтральных картинок, чем картинок с ненулевым уровнем эмоционального возбуждения (arousal), независимо от их валентности. Обратная динамика была продемонстрирована в исследовании И. Гроссман с соавторами: ими была получена положительная корреляция между ВСР и количеством рационально взвешенных (wiser reasoning) решений, выносимых испытуемыми в задаче выявления политико-социальных проблем (Grossman et al., 2016).

На основе сформулированной гипотезы можно ожидать, что сложность сердечного ритма будет увеличиваться с возрастом, так как в процессе индивидуального развития взаимодействие организма со средой становится все более дифференцированным за счет при-



обретения новых элементов индивидуального опыта. Однако здесь стоит принимать во внимание возрастные морфологические изменения, а именно увеличение вероятности наличия и выраженности сердечно-сосудистых нарушений, которые, как правило, сопровождаются снижением ВСР. Хотя в исследованиях возрастной динамики ВСР всегда отслеживается фактор наличия сердечно-сосудистых заболеваний, все же в демонстрируемых эффектах наблюдаются некоторые противоречия, в основном объяснимые, на наш взгляд, разными контекстами экспериментов. Так, например, в результате проведенного сравнительного анализа показателей ВСР у детей (до 15 лет) и у молодых людей (от 15 до 40 лет) выявлено, что наблюдаемое с возрастом увеличение ВСР проявляется только в стандартном отклонении сердечного ритма и спектральных показателях, в то время как различий в сложности сердечного ритма между этими возрастными группами обнаружено не было (Pikkujamsa et al., 1999). Далее, сравнительный анализ групп молодых людей (от 15 до 40 лет), людей среднего возраста (от 40 до 60 лет) и людей старшего возраста (старше 60 лет) указывает на снижение вариабельности сердечного ритма и его сложности. Однако в другом исследовании при сравнении детей (от 5 до 15 лет) и молодых людей (от 15 до 30 лет) показан обратный эффект – увеличение сложности сердечного ритма, при этом стандартное отклонение уменьшается, а далее оба показателя имеют тенденцию к снижению по мере увеличения возраста (до 70 лет) (Acharya et al., 2004). Такие отличия, по всей видимости, связаны с тем, что в первом случае запись сердечного ритма проводилась в течение 24 часов с использованием Холтеровского мониторинга, для анализа использовались длинные последовательности (от 1 до 2 часов), при этом никак не контролировалась двигательная и поведенческая активность. Во втором случае запись проводили в состоянии покоя (сидя, с закрытыми глазами) 5 минут. Отсутствие разности в сложности сердечного ритма между детьми и молодыми людьми в первом случае может объясняться тем, что дети за период 1–2 часа чаще изменяют свою поведенческую активность, а вместе с тем растет и нерегулярность, и соответственно сложность, динамики сердечного ритма. Иными словами, возрастная динамика сложности сердечного ритма имеет колокообразную форму с максимумом в период от 20 до 40 лет. Подобная колокообразная (U-shaped) форма наблюдается и в случае динамики некоторых поведенческих характеристик, как, например, флуктуации центра тяжести при выполнении моторной задачи (Vaillancourt, Newell, 2002). Снижение же сложности сердечного ритма с возрастом после 20–40 лет может, с нашей точки зрения, объясняться особыми изменениями в системной организации поведения. Так, данные психологических исследований демонстрируют, что с возрастом у взрослых снижается утилитарность моральных суждений, растет эмоциональная значимость межличностных отношений и значимость эмоциональных аспектов жизни (Arutyunova et al., 2016). Можно предположить, что нарастающая с возрастом интеграция постоянно дифференцирующегося опыта (называемая в соответствующей литературе «дедифференциацией» (Li, Lindenberger, 1999)) обуславливает уменьшение различий наборов систем, актуализируемых в поведении при переходе от акта к акту, от состояния к состоянию. Это и может проявляться в старости как стойкое уменьшение сложности (в том числе и уменьшение разнообразия динамики сердечного ритма), характерное для временной «дедифференциации».

Заключение

Временная системная дедифференциация, вызванная ситуацией стресса или употреблением алкоголя, качественно и количественно отражается в снижении сложности (аппрок-



симирированной энтропии) динамики сердечного ритма. Это является результатом уменьшения количества актуализированных систем и межсистемных связей, с которыми сердце согласует свою активность, встраиваясь в общий процесс разворачивания поведения.

Ограничения

Ограничение приведенного исследования заключается в организации самой процедуры исследования; поскольку возникают существенные различия в протоколах экспериментов по изучению динамики сложности сердечного ритма при стрессе и алкоголе, то результаты двух экспериментальных серий нельзя сравнить между собой. Можно предположить, что динамика сложности сердечного ритма характеризуется наличием особых специфических черт, которые отличают дедифференциацию в двух состояниях – при стрессе и при употреблении алкоголя.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 16-36-60044 мол_а_дк «Соотношения характеристик variability сердечного ритма и степени дифференцированности системной организации реализуемого поведения») в рамках исследовательской программы Ведущей научной школы РФ «Системная психофизиология» (НШ-9808.2016.6).

Благодарности

Авторы благодарят за помощь в проведении экспериментов М.Е. Чугрову.

Литература

1. Александров Ю.И. Психофизиологическое значение активности центральных и периферических нейронов в поведении. М.: Наука, 1989. 208 с.
2. Александров Ю.И. Развитие как дифференциация // Теория развития: Дифференциционно-интеграционная парадигма / Сост. Н.И. Чуприкова. М.: Языки славянских культур. 2009. С. 17–28.
3. Александров Ю.И. Регрессия // Седьмая международная конференция по когнитивной науке. Светлогорск (20–24 июня, 2016 г.): тезисы докладов / Отв. ред. Ю.И. Александров, К.В. Анохин. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2016. С. 100–101.
4. Александров Ю.И., Гринченко Ю.В., Светлаев И.А. Влияние острого введения этанола на реализацию поведения и его нейронное обеспечение // Журнал высшей нервной деятельности. 1990. Т. 40. № 3. С. 456–466.
5. Александров Ю.И., Шевченко Д.Г., Горкин А.Г., Гринченко Ю.В. Динамика системной организации поведения в его последовательных реализациях // Психологический журнал. 1999. Т. 20. № 2. С. 82–89.
6. Анохин П.К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М.: Медицина. 1968. 546 с.
7. Анохин П.К. Принципы системной организации функций. М.: Наука. 1973. 316 с.
8. Баевский Р.М. Анализ variability сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Клиническая информатика и телемедицина. 2004. Т. 1. № 1. С. 54–64.
9. Баринская Т.О., Смирнов А.В., Саломатин Е.М., Шаев А.И., Морозов Ю.Е. Кинетика этанола в биологических средах // Наркология. 2007. № 5. С. 50–57.
10. Безденежных Б.Н., Александров Ю.И. Влияние острого введения алкоголя на личностные свойства и системную организацию поведения в реальной и виртуальной средах // Нейродегенеративные заболевания: от генома до целостного организма. В 2 т. / Под ред. М.В. Угрюмова. М.: Научный мир. 2014. С. 680–704.
11. Булава А.И., Гринченко Ю.В. Нейрогенетическая активность в стресс-индуцированном научении // Седьмая международная конференция по когнитивной науке: тезисы докладов. М.: Изд-во ИП РАН. 2016. С. 175–177.



12. Гудков Г.В. Нелинейные свойства сердечного ритма плода в прогнозировании пренатальных исходов // Вестник новых медицинских технологий. 2009. Т. 16. № 4. С. 36–39.
13. Дарховский Б.С., Каплан А.Я., Шишкин С.Л. О подходе к оценке сложности кривых (на примере электроэнцефалограммы человека) // Управление в биологических системах и медицине. 2002. № 3. С. 130–140.
14. Звонкин А.К., Левин Л.А. Сложность конечных объектов и обоснование понятий информации и случайности с помощью теории алгоритмов // Успехи медицинских наук. 1970. Т. 156. № 6. С. 85–127.
15. Знаменская И.И., Марков А.В., Бахчина А.В., Александров Ю.И. Отношение к «чужим» при стрессе: системная дедифференциация // Психологический журнал. 2016. Т. 37. № 4. С. 44–58.
16. Колмогоров А.Н. К логическим основам теории информации и теории вероятностей // Проблемы передачи информации. 1969. Т. 5. № 3. С. 3–7.
17. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации. 1965. Т. 1. № 1. С. 3–11.
18. Крылов А.К. Метод символической динамики для анализа нейронной активности // Труды XVI Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2014»: в 3 ч. Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ. 2014. С. 166–174.
19. Курьянова Е.В. Влияние агониста $\alpha 1$ -адренорецепторов на вариабельность сердечного ритма самцов и самок белых крыс // Экспериментальная физиология, морфология и медицина. Естественные науки. 2010. № 3. С. 98–106.
20. Манило Л.А., Зозуля Е.П. Исследование возможности применения аппроксимированной энтропии для анализа биосигналов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», серия «Биотехнические системы в медицине и экологии». 2007. № 1. С. 3–9.
21. Машин В.А. К вопросу классификации функциональных состояний человека // Экспериментальная психология. 2011. Т. 4. № 1. С. 40–56.
22. Парин С.Б., Яхню В.Г., Цверов А.В., Полевая С.А. Психофизиологические и нейрохимические механизмы стресса и шока: эксперимент и модель // Вестник Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского. 2007. № 4. С. 190–196.
23. Полевая С.А., Рунова Е.В., Некрасова М.М., Федотова И.В., Ковальчук А.В., Бахчина А.В., Шишалов И.С., Парин С.Б. Телеметрические и информационные технологии в диагностике функционального состояния спортсменов // Современные технологии в медицине. 2012. № 4. С. 94–98.
24. Рунова Е.В., Григорьева В.Н., Бахчина А.В., Парин С.Б., Шишалов И.С., Кожевников В.В., Некрасова М.М., Каратушина Д.И., Григорьева К.А., Полевая С.А. Вегетативные корреляты произвольных отображений эмоционального стресса // Современные технологии в медицине. 2013. Т. 5. № 4. С. 69–77.
25. Черниговский В.Н. Деятельность висцеральных систем как особая форма поведения // Механизмы деятельности головного мозга. Тбилиси: Наука, 1975. С. 478–493.
26. Чуприкова Н.И. Психология умственного развития: Принцип дифференциации. М.: АО «СТОЛЕТИЕ». 1997. 480 с.
27. Швырков В.Б. Введение в объективную психологию. Нейрональные основы психики. М.: ИП РАН, 1995. 162 с.
28. Acharya R.U., Kannathal N., Sing O.W., Ping L.Y., Chua T. Heart rate analysis in normal subjects of various age groups // BioMedical Engineering OnLine 2004. Vol. 3. № 1. Article 24. doi:10.1186/1475-925X-3-24
29. Acharya U.R., Joseph K.P., Kannathal N., Lim C.M., Suri J.S. Heart rate variability: a review // Med. Bio Eng. Comput. 2006. № 44. P. 1031–1051.
30. Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Laukka S., Jrvilehto T., Maz V.N., Korpusova A.V. Effect of ethanol on hippocampal neurons depends on their behavioural specialization // Acta. physiol. Scand. 1993. Vol. 149. № 1. P. 105–115.
31. Alexandrov Yu.I., Sams M., Lavikainen J., Reinkainen K., Naatanen R. Differential effects of alcohol on the cortical processing of foreign and native language // International Journ. of Psychophysiology. 1998. Vol. 28. № 1. P. 1–10.
32. Arutyunova K., Alexandrov Y., Hauser M. Sociocultural influences on moral judgments: east-west, male-female, and young-old // Front. Psychol. 2016. Vol. 7. Article 1334. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01334
33. Batchinsky A.I., William H.C., Kuusela T., Cancio L.C. Loss of complexity characterizes the heart response to experimental hemorrhagic shock in swine // Crit Care Med. 2007. Vol. 35. № 2. P. 519–525.



34. Billman G.E. The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance // *Frontiers in physiology*. 2013. Vol. 4. Article 26. doi: 10.3389/fphys.2013.00026
35. Borell E., Langbein J., Despres G., Hensen S., Leterrier C., Marchant-Forde J., Marchant-Forde R., Minero M., Mohr E., Prunier A., Valance D., Veissier I. Heart rate variability as a measure of autonomic regulation of cardiac activity for assessing stress and welfare in farm animals – a review // *Physiology and behavior*. 2007. № 92. P. 293–316.
36. Childs E., Vicini L.M., De Wit H. Responses to the Trier Social Stress Test (TSST) in single versus grouped participants // *Psychophysiology*. 2006. № 43. P. 366–371.
37. Critchley H.D., Harrison N.A. Visceral influences on brain and behavior // *Neuron*. 2013. № 77. P. 624–638.
38. Grossman I., Balljinder K.S., Ciarrochi J. A heart and a mind: self-distancing facilitates the association between heart rate variability, and wise reasoning // *Frontiers in behavioral neuroscience*. 2016. Vol. 10. Article 68. doi: 10.3389/fnbeh.2016.00068
39. Lane R.D., McRae K., Reiman E.M., Chen K., Ahem G.L., Thayer J.F. Neural correlates of heart rate variability during emotion // *NeuroImage*. 2009. Vol. 44. № 1. P. 213–222. doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.07.056
40. Li S.-C., Lindenberger U. Cross-level unification: A computational exploration of the link between deterioration of neurotransmitter systems dedifferentiation of cognitive abilities in old age // *Cognitive Neuroscience of Memory*. Eds. L.-G. Nilsson, H. J. Markowitsch. Seattle: Hogrefe & Huber, 1999. P. 103–146.
41. Lombardi F., Montano N., Fnocchiaro, M.L. Spectral analysis of sympathetic discharge in decerebrate cats // *J. Auton. Nerv. Syst.* 1990. Vol. 30. P. 97–100.
42. Malik M., Bigger J.T., Camm A.J., Kleiger R.E., Malliani A., Moss A.J., Schwartz P.J. Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology (Membership of the Task Force listed in the Appendix) // *European Heart Journal*. 1996. № 17. P. 354–381.
43. Matthews S.C., Paulus M.P., Simmons A.N., Nelesen R.A., Dimsdale J.E. Functional subdivisions within anterior cingulate cortex and their relationship to autonomic nervous system function // *NeuroImage*. 2004. № 22. P. 1151–1156.
44. Melillo P., Bracale M., Pecchia L. Nonlinear heart rate variability features for real-life stress detection. Case study: students under stress due to university examination // *BioMedical Engineering OnLine*. 2011. Vol. 10, Article 96. doi: 10.1186/1475-925X-10-96
45. Napadow V., Dhod R., Conti G., Markis N., Brown E.N., Barbieri R. Brain correlates of autonomic modulation: Combining heart rate variability with fMRI // *NeuroImage*. 2008. № 42. P. 169–177.
46. Newlin D.B., Wong C.J., Stapleton J.M., London E.D. Intravenous cocaine decreases cardiac vagal tone, vagal index (derived in Lorenz Space), and heart period complexity (approximate entropy) in cocaine abusers // *Neuropsychopharmacology*. 2000. Vol. 23. P. 560–568.
47. Pikkujamsa S.M., Makikallio T.H., Sourander L.B., Raiha I.J., Puukka P., Skytta J., Peng C.K., Goldberger A.L., Huikuri H.V. Cardiac Interbeat Interval Dynamics From Childhood to Senescence. Comparison of Conventional and New Measures Based on Fractals and Chaos Theory // *Circulation*. 1999. № 100. P. 393–399.
48. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity // *Proc. Nati. Acad. Sci. USA [Mathematics]*. 1991. Vol. 88. P. 2297–2301.
49. Porges S.W. The polyvagal theory: phylogenetic contributions to social behavior // *Physiology and Behavior*. 2003. № 79. P. 503–513.
50. Reyes del Paso G.A., Langewitz W., Mulder L., Roon A., Duschek S. The utility of low frequency heart rate variability as an index of sympathetic cardiac tone: A review with emphasis on a reanalysis of previous studies // *Psychophysiology*. 2013. Vol. 5. № 50. P. 477–487.
51. Richman J.S., Moorman J.R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2000. Vol. 278. № 6. P. 2039–2049.
52. Schwabe L., Joels M., Roozendaal B., Wolf O.T., Oitzl M.S. Stress effects on memory: An update and integration // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 2011. Vol. 36. № 7. doi:10.1016/j.neubiorev.2011.07.002
53. Schwabe L., Wolf O.T. Stress prompts habit behavior in humans // *The Journal of Neuroscience*. 2009. Vol. 22. № 29. P. 7191–7198.



54. Seely A.J.E., Macklem P.T. Complex systems and the technology of variability analysis // *Critical Care*. 2004. № 8. P. 367–384.
55. Thayer J.F., Lane R.D. A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation // *J. Affect. Disord.* 2000. № 61. P. 201–216.
56. Vaillancourt D.E., Newell K.M. Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease // *Neurobiology of aging*. 2002. Vol. 23. P. 1–11.
57. Valenza G., Allegrini P., Lanata A., Scilingo E.P. Dominant Lyapunov exponent and approximate entropy in heart rate variability during emotional visual elicitation // *Frontiers in neuroengineering*. 2012. Vol. 5. Article 3. doi: 10.3389/fneng.2012.00003
58. von Borell E., Langbein J., Després G., Hansen S., Leterrier C., Marchant-Forde J., Marchant-Forde R., Minero M., Mohr E., Prunier A., Valance D., Veissier I. Heart rate variability as a measure of autonomic regulation of cardiac activity for assessing stress and welfare in farm animals – A review // *Physiology & Behavior*. 2007. № 92. P. 293–316.
59. Yu R. Stress potentiates decision biases: A stress induced deliberation-to-intuition (SIDI) model // *Neurobiology of stress*. 2016. № 3. P. 83–95.

HEART RATE COMPLEXITY DURING THE TEMPORARY SYSTEMS DEDIFFERENTIATION

BAKHCHINA A.V.*, *Institute of Psychology, Russian Academy of Sciences, Moscow; Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: nastya18-90@mail.ru*

ALEXANDROV Y.I.**, *Institute of Psychology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: yuraalexandrov@yandex.ru*

The article describes the results of a study of correlation between parameters of heart rate variability and characteristics of system organization of behavior, which is considered as the dynamic actualization of functional systems of different “age”. The proportion of “old” (low-differentiated) and “new” (high-differentiated) systems defines the general degree of differentiation of the set of functional systems actualized in particular behavior. Heart rate variability reflects the coordination of activity of heart cells and other body cells. This coordination is the important for achieving adaptive behavioral results. We hypothesized that temporary system dedifferentiation (reversible decreasing the number of highly differentiated systems subserving behavior) is accompanied by reduction of heart rate complexity. Beat-to-beat intervals were recorded during stress (Experiment 1) and alcohol administration (Experiment 2). We used approximate entropy (ApEn) as a measure of heart rate complexity. The decrease of approximate entropy was observed in both stress and alcohol conditions. It is concluded that reversible system dedifferentiation is reflected in heart rate dynamics as a reduction of complexity.

Keywords: heart rate variability, system organization of behavior, system dedifferentiation, approximate entropy, stress, alcohol.

For citation:

Bakhchina A.V., Alexandrov Y.I. Heart rate complexity during the temporary systems dedifferentiation. *Экспериментальная психология = Experimental psychology (Russia)*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 114–130. doi:10.17759/exppsy.2017100210

* *Bakhchina A.V.* Ph.D. in Psychology, Research Associate, Laboratory of Neural Bases of Mind, Institute of Psychology, Russian Academy of Sciences; Research Associate, Department of Psychophysiology, Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky. E-mail: nastya18-90@mail.ru

** *Alexandrov Y.I.* Dr.Sci. in Psychology, Professor, Head of the Laboratory of Neural Bases of Mind, Institute of Psychology, Russian Academy of Sciences. E-mail: yuraalexandrov@yandex.ru



Funding

This work was supported by RFBR, research project No.16-36-60044mol_a_dk, within the research program of a Leading Scientific School of Russian Federation: "System Psychophysiology" (NSh-9808.2016.6).

Acknowledgements

The authors thank Chugrova M.E. for assistance in data collection.

References

1. Aleksandrov Y.I. *Psihofiziologicheskoe znachenie aktivnosti central'nyh i perifericheskikh neyronov v povedenii* [Psychophysiological effects of central and peripheral neural activity in behavior]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 208 p. (In Russ.).
2. Aleksandrov Y.I. Razvitie kak differenciacija [Development as differentiation]. In N.I. Chuprikova (ed.), *Teorija razvitija: Differencionno-integracionnaja paradigma* [Theory of development: differentiation-integration paradigm]. Moscow, Jazyki slavjanskih kul'tur Publ., 2009. P. 17–28. (In Russ.).
3. Aleksandrov Y.I. Regressija [Regression]. *Sed'maja mezhdunarodnaja konferencija po kognitivnoj nauke: tezisy dokladov* [The seventh international conference on cognitive science: abstracts of reports]. Svetlogorsk 20-24 ijunja, 2016. P. 100–101. (In Russ.).
4. Aleksandrov Y.I., Grinchenko Y.V., Svetlaev I.A. Vlijanie ostrogo vvedenija jetanola na realizaciju povedenija i ego neyronnoe obespechenie [The influence of acute injection of alcohol on behavior and neural support]. *Zhurnal vysshej nervnoj dejatel'nosti* [The journal of higher nervous activity]. 1990, vol. 40, no. 3, pp. 456–466. (In Russ.).
5. Aleksandrov Y.I., Shevchenko D.G., Gorkin A.G., Grinchenko Y.V. Dinamika sistemnoj organizacii povedenija v ego posledovatel'nyh realizacijah [Dynamics of system organization of behavior and behavior realization sequentially]. *Psihologicheskij zhurnal* [Psychology journal]. 1999, vol. 20, no. 2, pp. 82–89. (In Russ.).
6. Anokhin P.K. *Biologija i neyrofiziologija uslovnogo refleksa* [Biology and neurophysiology of conditioned response]. Moscow, Medicina Publ., 1968. 546 p. (In Russ.).
7. Anokhin P.K. *Principy sistemnoj organizacii funkcij* [Principles of systemic organization of the functions]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 316 p. (In Russ.).
8. Baevskij R.M. Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma: istorija i filosofija, teorija i praktika [Analyses of heart rate variability: history and philosophy, theory and practice]. *Klinicheskaja informatika i telemeditsina* [Clinical Informatics and telemedicine]. 2004, vol. 1, no. 1, pp. 54–64. (In Russ.).
9. Barinskaja T.O., Smirnov A.V., Salomatin E.M., Shaev A.I., Morozov Ju.E. Kinetika etanola v biologicheskikh sredah [Kinetics of ethanol in biological fluids]. *Narkologija* [Narcology]. 2007, no. 5, pp. 50–57. (In Russ.).
10. Bezdenezhnyh B.N., Aleksandrov Ju.I. Vlijanie ostrogo vvedenija alkogolja na lichnostnye svojstva i sistemnuju organizaciju povedenija v real'noj i virtual'noj sredah [Influence of acute injection of alcohol on personal characteristics and systemic organization of behavior in real and virtual environments]. In: Ugrjumova M.V. (ed.), *Nejrodegenerativnye zabolovanija: ot genoma do celostnogo organizma. V 2-h tomah* [Neurodegenerative diseases: from genome to whole organism. In two volumes]. Moscow, Nauchnyj mir Publ., 2014, pp. 680–704. (In Russ.).
11. Bulava A.I., Grinchenko Ju.V. Nejrogeneticheskaja aktivnost' v stress-inducirovannom nauchenii [Neurogenetic activity in stress induced learning]. *Sed'maja mezhdunarodnaja konferencija po kognitivnoj nauke: tezisy dokladov* [The seventh international conference on cognitive science: abstracts of reports]. Moscow, IP RAN Publ. 2016, pp. 175–177. (In Russ.).
12. Gudkov G.V. Nelinejnye svojstva serdechnogo ritma ploda v prognozirovanii prenatal'nyh ishodov [Nonlinear properties of heart rate of the fetus in the prenatal prediction of outcomes]. *Vestnik novyh medicinskih tehnologij* [Bulletin of new medical technology]. 2009, vol. 16, no. 4, pp. 36–39. (In Russ.).
13. Darhovskij B.S., Kaplan A.Ja., Shishkin S.L. O podhode k ocenke slozhnosti krivyh (na primere jelektroencefalogrammy cheloveka) [About approach for assessment of complexity of curve lines (human EEG)]. *Upravlenie v biologicheskikh sistemah i medicine* [Controlling in biological systems and medicine]. 2002, no. 3, pp. 130–140. (In Russ.).



14. Zvonkin A.K., Levin L.A. Slozhnost' konechnykh ob#ektov i obosnovanie ponjatij informacii i sluchajnosti s pomoshh'ju teorii algoritmov [Complexity of finite objects and justification of definitions of information and randomness by theory of algorithms]. *Uspehi medicinskih nauk [Successes of medical Sciences]*. 1970, vol. 156, no. 6, pp. 85–127. (In Russ.).
15. Znamenskaja I.I., Markov A.V., Bahchina A.V., Aleksandrov Ju.I. Otnoshenie k "chuzhim" pri stresse: sistemnaja dedifferenciacija [Attitude to outgroup members in stress: system dedifferentiation]. *Psihologicheskij zhurnal [Psychology journal]*. 2016, vol. 37, no. 4, pp. 44–58. (In Russ.).
16. Kolmogorov A.N. K logicheskim osnovam teorii informacii i teorii verojatnostej [The logical foundations of theory of information and theory of probability]. *Problemy peredachi informacii [Problems of information transfer]*. 1969, vol. 5, no. 3, pp. 3–7. (In Russ.).
17. Kolmogorov A.N. Tri podhoda k opredeleniju ponjatija «kolichestvo informacii» [Three approaches to the definition of "quantity of information"]. *Problemy peredachi informacii [Problems of information transfer]*. 1965, vol. 1, no. 1, pp. 3–11. (In Russ.).
18. Krylov A.K. Metod simvolicheskoy dinamiki dlja analiza nejronnoj aktivnosti [Method of symbolic dynamics for analyze of neuron activity]. In *Trudy XVI Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Nejroinformatika-2014". V 3-h chastjah [Works 16 all-Russian scientific technical conference «Neuroinformatics-2014». In three volumes]*. Part 2. Moscow, NIJaU MIFI Publ., 2014, pp. 166–174. (In Russ.).
19. Kur'janova E.V. Vlijanie agonista a1-adrenoreceptorov na variabel'nost' serdechnogo ritma samcov i samok belyh krysv [Agonist of a1- adrenergic receptors affect on heart rate variability of male and female of white rats]. *Ekspiremental'naja fiziologija, morfologija i medicina. Estestvoennye nauki [Experimental physiology, morphology and medicine. Natural science]*. 2010, no. 3, pp. 98–106. (In Russ.).
20. Manilo L.A., Zozulja E.P. Issledovanie vozmozhnosti primenenija approksimirovannoj jentropii dlja analiza biosignalov [A study of the possibilities of using the approximated entropy to analyze biological signals]. *Izvestija SPbGJeTU «LJeTI», serija «Biotehnicheskie sistemy v medicine i ekologii» [Bulletin of Saint-Petersburg Polytechnic University, "Biotechnical systems in medicine and ecology"]*. 2007, no. 1, pp. 3–9. (In Russ.).
21. Mashin V.A. K voprosu klassifikacii funkcional'nyh sostojanij cheloveka [Some problems of operator functional states classification]. *Ekspiremental'naja psihologija [Experimental psychology (Russia)]*. 2011, vol. 4, no. 1, pp. 40–56. (In Russ.; abstr. in Engl.).
22. Parin S.B., Yakhno V.G., Tsverov A.V., Polevaja S.A. Psihofiziologicheskie i nejrohimicheskie mehanizmy stressa i shoka: jeksperiment i model' [Psychophysiology and neurochemistry of stress and shock: experiment and model]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Bulletin of Nizhny Novgorod State University named of N.I. Lobachevsky]*. 2007, no. 4, pp. 190–196. (In Russ.).
23. Polevaja S.A., Runova E.V., Nekrasova M.M., Fedotova I.V., Koval'chuk A.V., Bahchina A.V., Shishalov I.S., Parin S.B. Telemetricheskie i informacionnye tehnologii v diagnostike funkcional'nogo sostojanija sportsmenov [Telemetry and information technologies in the diagnosis of functional states of athletes]. *Sovremennye tehnologii v medicine [Modern technology in medicine]*. 2012, no. 4, pp. 94–98. (In Russ.).
24. Runova E.V., Grigor'eva V.N., Bahchina A.V., Parin S.B., Shishalov I.S., Kozhevnikov V.V., Nekrasova, M.M., Karatushina D.I., Grigor'eva K.A., Polevaja S.A. Vegetativnye korreljaty proizvol'nyh otobrazhenij jemocional'nogo stressa [Autonomic correlates of arbitrary mappings of emotional stress]. *Sovremennye tehnologii v medicine [Modern technology in medicine]*. 2013, vol. 5, no. 4, pp. 69–77. (In Russ.).
25. Chernigovskij V.N. Dejatel'nost' visceral'nyh sistem kak osobaja forma povedenija [Activity of visceral systems as a special form of behavior]. In *Mehanizmy dejatel'nosti golovnogo mozga [Mechanisms of brain activity]*. 1975, pp. 478–493. (In Russ.).
26. Chuprikova N.I. *Psihologija umstvennogo razvitiya: Princip differenciacii [Psychology of mind development: principle of differentiation]*. Moscow. AO "STOLETIE" Publ., 1997. 480 p. (In Russ.).
27. Shvyrvkov V.B. *Vvedenie v ob#ektivnuju psihologiju. Nejronal'nye osnovy psihiki [Introduction into objective psychology: neuronal bases of mind]*. Moscow, IP RAN Publ., 1995. 162 p. (In Russ.).