

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ)
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК 612.821

ЗАВИСИМОСТЬ УСПЕШНОСТИ ВООБРАЖЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ
ПРАВОЙ И ЛЕВОЙ РУКИ ОТ ЛИЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

© 2021 г. В. В. Решетникова^{1,*}, Е. В. Боброва¹, Е. А. Вершинина¹,
А. А. Гришин¹, А. А. Фролов^{2,3}, Ю. П. Герасименко¹

¹ ФГБУН Институт физиологии РАН им. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

³ Институт трансляционной медицины ГБОУ ВПО Российского национального исследовательского медицинского университета им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

*e-mail: 3069@bk.ru

Поступила в редакцию 16.02.2021 г.

После доработки 23.03.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Известно, что успешность воображения движений при управлении системами “интерфейс мозг-компьютер” (ИМК) может зависеть от личностных характеристик пользователя, а соотношение активности некоторых право- и левополушарных структур мозга зависит от личностных характеристик. В исследованиях ИМК нет сведений о том, как успешность управления ИМК при разных личностных характеристиках связана с межполушарной асимметрией. В данной работе проведен анализ связей между личностными характеристиками и точностью классификации сигналов мозга при воображении движений правой руки (ПР) и левой руки (ЛР) по сравнению с покоем при однократном управлении ИМК наивными испытуемыми. Оказалось, что при воображении движений ПР успешнее экспрессивные чувствительные экстраверты, а при воображении движений ЛР – практичные, сдержанные, скептические и не очень общительные люди. При воображении движений как ПР, так и ЛР лучше управляют ИМК открытые для перемен люди, а не традиционалисты и консерваторы. Анализ субъективной сложности воображения движений показывает, что точность классификации состояний мозга при воображении ПР по сравнению с воображением ЛР выше у тех людей, которым субъективно сложнее представлять движения ПР, но не ЛР. Предполагается, что полученные данные связаны с особенностями обработки информации и организации движений и уровня дофамина в правом и левом полушарии головного мозга.

Ключевые слова: мозг-компьютерные интерфейсы, личностные характеристики, межполушарная асимметрия

DOI: 10.31857/S0044467721060083

ВВЕДЕНИЕ

Успешность воображения движений при управлении системами “интерфейс мозг-компьютер” (ИМК), основанными на модуляциях сенсомоторного ритма при кинестетическом воображении движений, характеризуется точностью классификации состояний мозга при воображении разных движений. При работе с ИМК важно знать, насколько успешно тот или иной пользователь может ими управлять, поскольку около 10–30% людей работать с ИМК не способны (т.н. VCI il-

literacy, “ИМК-неграмотность” (Jeunet et al., 2015)). В литературе есть сведения о возможности предсказания успешности управления ИМК на основании электрической активности мозга. Предиктором успешности согласно (Blankertz et al., 2010; Sannelli et al., 2019) может быть более высокая амплитуда сенсомоторного ритма в покое. Кроме того, в качестве предикторов успешности управления ИМК рассматривают альфа-ритм во всех областях коры, тэта-ритм в лобных и заднетеменных областях, гамма-ритм в префронталь-

ной области (Ahn et al., 2013; Bamdadian et al., 2014). Согласно (Grosse-Wentrup, Schölkopf, 2012), индивидуальные вариации успешности управления ИМК по сенсомоторному ритму связаны с вариациями гамма-осцилляций в лобно-теменных отделах мозга.

Есть ли сведения о том, какие личностные характеристики влияют на способность управления ИМК? Несколько исследований последних лет демонстрируют корреляцию между успешностью управления ИМК и степенью уверенности в себе, оцененными по 16-факторному опроснику Кеттелла (Jeunet et al., 2015); степенью концентрации (Hammer et al., 2014), оцененной по тесту “Отношение к работе” (Attitudes towards work – АНА); способностями взаимодействия с технологиями (dealing with technology, Burde, Blankertz, 2006); способностями осуществлять точностные движения руками (тест Two-Hand Coordination Test (Hammer et al., 2014)), пространственными способностями, оцененными по успешности ментального вращения фигур (mental rotation (Jeunet et al., 2015; 2016; Pacheco et al., 2017)).

Поскольку способность управления ИМК, как упоминалось выше, связана с индивидуальными особенностями электрической активности мозга (Blankertz et al., 2010; Ahn et al., 2013; Bamdadian et al., 2014; Grosse-Wentrup, Schölkopf 2012), представляют интерес исследования связи между параметрами электрической активности мозга и личностными характеристиками. Больше всего работ по связи ЭЭГ-активности и личностными характеристиками было сделано по показателям экстра/интроверсии и нейротизма (эмоциональной лабильности). Согласно представлениям Айзенка (Eysenck, 1967, 1983), различия между экстра- и интровертами в значительной степени определяются активностью в петле возбуждения кора – ретикулярная формация: предполагалось, что у интровертов кора в покое более активирована, с чем связано то, что у интровертов реакция на слабые раздражители больше, чем у экстравертов (см. обзор старых исследований в статье Savage, 1964). Дальнейшие исследования показали, что интроверты проявляют большую реактивность на сенсорную стимуляцию, у них выше возбудимость мотонейронов (Stelmack, 2009) и меньше дофаминергическая активность, чем у экстравертов (Wacker, 2017). Отметим, что в 2013 г. Коллин Де Янг выдвинул “единую теорию о роли дофамина в фор-

мировании личностных характеристик” (DeYoung, 2013). В некоторых исследованиях (см., например, Schmidtke, Heller, 2004; Minnix, Kline, 2004; Gale et al., 1971) не было выявлено различий в активности мозга экстра- и интровертов, но обнаружены отличия в зависимости от уровня нейротизма. Так, согласно (Schmidtke, Heller, 2004), в состоянии покоя нейротизм связан с повышенной активностью в альфа-диапазоне в правой задней области мозга, согласно (Minnix, Kline, 2004) – с большей вариабельностью асимметрии в медиальных областях фронтальных отделов мозга. Наконец, некоторые исследования сообщают об отсутствии связи нейротизма и экстраверсии с активностью мозга (Stough et al., 2001; Korjus et al., 2015).

При анализе корреляции ЭЭГ-активности и результатов теста “большой пятерки” (пятифакторная модель (McCrae, John, 1992; McCrae, Costa, 2008), оценивающая экстра/интроверсию, нейротизм, согласие/доброжелательность, сознательность и открытость опыту) было показано, что доброжелательность отрицательно коррелирует с уровнем бета-ритма (Nazre et al., 2012), а открытость опыту, доброжелательность и сознательность коррелируют с активностью мозга в альфа-, бета-1, бета-2, дельта- и тета-диапазонах (Stough et al., 2001).

Есть сведения о межполушарных различиях в характеристике ЭЭГ при тревожности (Stenberg, 1992; Pavlenko et al., 2009) и нейротизме (Minnix, Kline, 2004). Так, например, при анализе связи спектральных характеристик ЭЭГ и тревожности (оцененной с помощью тестов Спилбергера-Ханина и Кеттелла 16PF) были выявлены межполушарные различия (Pavlenko et al., 2009). В правом, но не в левом полушарии имели место значимые положительные корреляции тревожности и мощности бета-2-ритма (в покое с открытыми глазами). В левом же полушарии тревожность отрицательно коррелировала с мощностью альфа-ритма (Pavlenko et al., 2009).

Таким образом, в литературе имеются многочисленные сведения о том, что личностные характеристики связаны с ЭЭГ-активностью разных отделов мозга в различных частотных диапазонах, в ряде работ указывается асимметричное положение областей мозга, активность которых коррелирует с личностными характеристиками. Вместе с тем в исследованиях ИМК нет сведений о том, как успешность управления ИМК при

разных личностных характеристиках связана с межполушарной асимметрией. В данной работе осуществляется анализ связей между личностными характеристиками и точностью классификации сигналов мозга при воображении движений ПР по сравнению с покоем (ПР-покой) и ЛР по сравнению с покоем (ЛР-покой) при однократном управлении ИМК наивными испытуемыми.

МЕТОДИКА

В экспериментах принимали участие 44 здоровых испытуемых (19 мужчин и 25 женщин) в возрасте 19–25 лет с ведущей правой рукой (Oldfield, 1971). Протокол исследования соответствовал требованиям Хельсинкской декларации и был одобрен Этической комиссией Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Исследования проводили с соблюдением основных биоэтических правил, все испытуемые дали письменное согласие на участие в экспериментах.

Все испытуемые проходили тестирование по тесту Айзенка на темперамент (57 вопросов) и 16-факторному личностному опроснику Кеттелла (187 вопросов), а также оценивали субъективную сложность воображения движений ПР и ЛР по 5-балльной шкале.

Процедура проведения эксперимента включала один сеанс работы с ИМК, основанным на кинестетическом воображении движений рук. Во время сеанса испытуемые получали инструкцию воображать кинестетические ощущения при подъеме и опускании выпрямленной ПР или ЛР с колена до уровня своего плеча (в положении сидя с прямой спиной).

На экране монитора в случайном порядке возникали символы, согласно которым испытуемые должны были воображать движения ПР или ЛР, а также пребывать в состоянии покоя. При этом регистрировали ЭЭГ с помощью беспроводного электроэнцефалографа SmartVCI (производства компании «Алиот», Санкт-Петербург), обеспечивающего возможность записи ЭЭГ с 24 отведений. Электроэнцефалограф (вес 50 г) закреплялся в непосредственной близости от места контакта электродов с поверхностью головы, отсутствие длинного шлейфа позволяло минимизировать влияние сетевых помех и артефактов движения на регистрируемую ЭЭГ.

Анализ ЭЭГ-сигналов обеспечивал классификацию состояний в попарном асинхронном ИМК (три состояния: воображение

движений ЛР (1), воображение движений ПР (2), покой (3)), основанном на десинхронизации сенсомоторного ритма при воображении движений (длительность обучения классификатора около 3 мин) (подробнее см. Волкова и др., 2017). Каждое состояние (1, 2 и 3) в ходе сеанса работы с ИМК воспроизводилось многократно, и по всем попыткам рассчитывалось число правильных и неправильных ответов (соответствие или несоответствие инструкции, что воображать или находиться в состоянии покоя), и соотношение правильных/неправильных ответов определяло величину точности классификации. Точность классификации оценивалась методом кросс-валидации, т.е. осуществлялось итеративное разделение каждой из пар сравниваемых состояний (сравнивали следующие состояния: 1 относительно 2, 1 относительно 3, 2 относительно 3) на обучающую и тестовую выборки, обучение классификатора проводилось на обучающей выборке, качество классификации оценивалось по тестовой выборке (off-line). Точность классификации оценивалась по вероятности распознавания именно того ментального состояния, которое задавалось инструкцией. При случайном распознавании двух состояний эта вероятность равна 0.5.

Оценку зависимости точности классификации от личностных характеристик проводили методами корреляционного и факторного анализа, непараметрическим критерием Манна–Уитни оценивали значимость различий между подгруппами испытуемых с высоким и низким значением каждой из личностных характеристик. Вследствие того, что выборки были невелики, а не все распределения подчинялись нормальному закону, при проведении корреляционного анализа рассчитывали ранговый коэффициент корреляции Спирмена (непараметрический) и, кроме того, анализировали данные параметрическим критерием Пирсона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ связей точности классификации сигналов мозга при воображении движений как ПР, так и ЛР по сравнению с состоянием покоя выявил значимые корреляции с личностными характеристиками, оцененными по тесту Кеттелла (рис. 1).

При воображении движений ПР точность классификации состояний мозга (по сравнению с состоянием покоя) статистически зна-

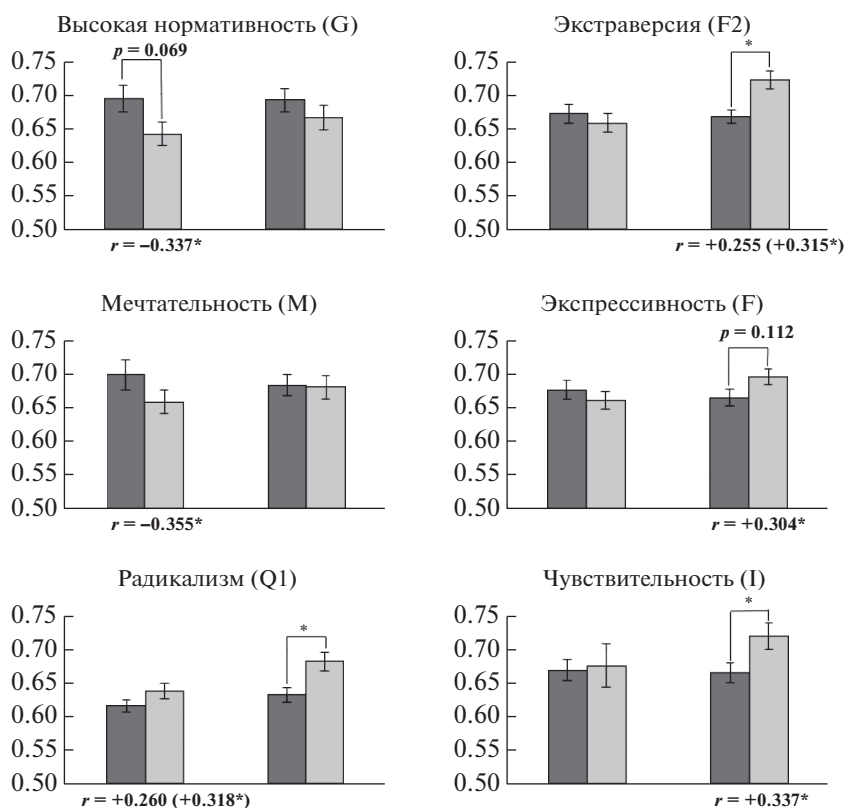


Рис. 1. Точность классификации состояний мозга при представлении движений правой и левой руки в зависимости от выраженности признаков личностных характеристик по тесту Кеттелла. Вверху над каждым графиком – признак, в зависимости от которого изменяется точность классификации. Низкое значение признака – темно-серые столбцы, высокое – светло-серые столбцы. Значимое различие ($p < 0.05$) между точностью классификации при низких и высоких значениях признаков отмечено звездочкой (*), при наличии тенденции указано значение p . Два левых столбца на каждом графике – точность классификации при представлении движений левой руки относительно покоя, правых – правой руки относительно покоя. В случае наличия значимой ($p < 0.05$) корреляции по Спирмену между точностью классификации и значением признака личностной характеристики внизу под соответствующей парой столбцов указано значение коэффициента корреляции (r); при наличии тенденции для коэффициента корреляции по Спирмену, в скобках приводится коэффициент корреляции по Пирсону.

Fig. 1. The classification accuracy of brain states during imagination of the movements of the right or the left hand comparative with the rest state, depending on the value of personality traits according to 16PF questionnaire. Above each graph is specified the trait, which influence on the classification accuracy changes. Low values of traits – dark gray columns, high one – light gray columns. A significant difference ($p < 0.05$) between the classification accuracy at low and high values of traits is marked with an asterisk (*), p value is indicated in a case of trend. The two left columns on each graph are the classification accuracy during imagination of the movements of the left hand compared with the rest, the right – of the right hand compared with the rest. In a case of significant ($p < 0.05$) Spearman correlation between the classification accuracy and the value of the personality trait, the value of the correlation coefficient (r) is indicated below the corresponding pair of columns; Pearson correlation coefficient is given in parentheses in a case of trend for Spearman correlation coefficient.

чимо положительно связана с личностными характеристиками, характеризующимися факторами F2 (экстраверсия, Extraversion), F (экспрессивность, Liveliness) и I (чувствительность, Sensitivity). Для групп с высокими и низкими значениями каждого из этих факторов имеют место значимые различия между средними величинами точности классификации по критерию Манна–Уитни – для групп с высокими значениями экстраверсии, экспрессив-

ности и чувственности точность классификации выше. Это означает, что воображение движений ПР более успешно у экстравертов, чем у интровертов; у более беспечных, спонтанных и экспрессивных, чем у сдержанных, серьезных и погруженных в себя людей; у более чувствительных и интуитивных, чем у жестких, уверенных в себе, серьезных утилитаристов.

При воображении движений ЛР точность классификации состояний мозга (по сравнению с состоянием покоя) не имела статистически значимых зависимостей от вышеупомянутых личностных характеристик, но оказалась значимо отрицательно связана с факторами М (мечтательность, Abstractedness) и G (высокая нормативность, Rule-Consciousness) (для фактора G также имеет место тенденция ($p = 0.069$) значимости различий по критерию Манна–Уитни). Это означает, что воображение движений ЛР более успешно у практичных реалистов, чем у людей, склонных к абстрактным размышлениям; у игнорирующих правила нонконформистов и скептиков, чем у добросовестных послушных моралистов и консерваторов.

Анализ связи точности классификации с фактором Q1 (радикализм, открытость к изменениям, Openness to change) выявил значимую положительную корреляционную связь с точностью классификации при воображении движений ЛР (по сравнению с покоем), а также более высокую точность классификации движений ПР (по сравнению с покоем) в группе с высокими значениями данного признака по критерию Манна–Уитни. Это означает, что при воображении движений как ПР, так и ЛР лучше управляли ИМК открытые для перемен люди, склонные к эксперименту, анализу, критике, либерализму, свободомыслию и гибкости, а не традиционалисты и консерваторы.

Для уточнения “портретов” пользователей, способных более успешно управлять ИМК при воображении движений ПР и ЛР, был проведен факторный анализ личностных характеристик испытуемых, в результате которого были получены 7 факторов, которые объясняют 71% дисперсии. Были получены новые переменные, соответствующие значениям этих факторов. Эти новые переменные были скоррелированы с параметрами точности классификации. Корреляционный анализ выявил значимую ($p < 0.01$) отрицательную связь одного из факторов – фактора 6 – с точностью классификации сигналов мозга при воображении движений ЛР по сравнению с покоем. Фактор 6 включает следующие факторы из теста Кеттелла (в скобках указана факторная нагрузка и ее знак): мечтательность (Abstractedness, M) (-0.752), дипломатичность (Privateness, N) ($+0.670$) и общительность (Warmth, A) (-0.403). Это означает, что точность классификации сигналов мозга

при воображении движений ЛР (но не ПР) выше у людей, которым свойственна практичность (низкая мечтательность) одновременно с высокой дипломатичностью (сдержанностью) и при этом низкая общительность (последняя с меньшей факторной нагрузкой). Поскольку выборка была не очень велика, данные, полученные с помощью факторного анализа, менее надежны, чем парные корреляции, однако они не противоречат результатам корреляционного анализа и позволяют уточнить “портрет” успешного пользователя ИМК, выполняющего задание в первый раз.

Таким образом, при воображении движений ЛР успешнее практичные, сдержанные, скептические и не очень общительные люди. При воображении движений ПР успешнее экспрессивные чувствительные экстраверты.

Субъективная сложность воображения движений

Кроме связей точности классификации с личностными характеристиками, оцененными по тесту Кеттелла, анализ данных выявил значимость того, насколько субъективно сложно испытуемым было воображать движения. Оказалось, что с точностью классификации значимо связана только субъективная сложность воображения движений ПР ($r = 0.697$), но не ЛР (рис. 2). Точность классификации состояний мозга при воображении движений ПР по сравнению с ЛР (ПР-ЛР) статистически значимо положительно связана с субъективной оценкой сложности представления ПР. Точность классификации ПР-ЛР в группе с высокой субъективной сложностью представления движений ПР выше, чем в группе испытуемых, которым воображать движения ПР было легко. Это означает, что состояния мозга при воображении движений ПР и при воображении движений ЛР больше различаются (по точности классификации) у тех испытуемых, которым субъективно более сложно воображать движения ПР, чем у тех, кому это делать легко. Субъективная же сложность воображения ЛР не влияет на точность классификации ПР-ЛР. Не выявлено значимых связей точности классификации как ПР-покой, так и ЛР-покой с субъективной сложностью воображения движений как ПР, так и ЛР.

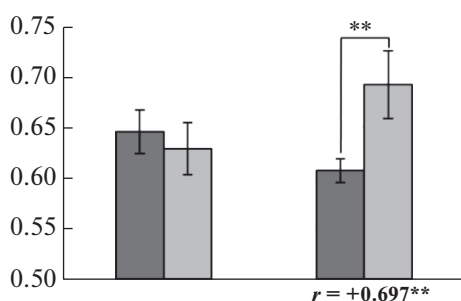


Рис. 2. Точность классификации состояний мозга при представлении движений правой и левой руки в зависимости от субъективной сложности представления движений. Низкая субъективная сложность представления движений – темно-серые столбцы, высокая – светло-серые. Два левых столбца – представление движения левой руки, правых – правой. Значимое различие ($p < 0.001$) между точностью классификации при низкой и высокой субъективной сложности представления движений отмечено **. В случае наличия значимой корреляции между точностью классификации и субъективной сложностью коэффициент корреляции по Спирмену указан под соответствующей парой столбцов ($p < 0.001$).

Fig. 2. The classification accuracy of brain states during imagination of the movements of the right or the left hand comparative with the rest state, depending on the subjective complexity of movements imagination. Low subjective complexity of movements imagination – dark gray columns, high – light gray. The two left columns – imagination of the movements of the left hand, the right – of the right hand. A significant difference ($p < 0.001$) between the classification accuracy at low and high values of subjective complexity of imagination of the movements is marked with **. In a case of significant correlation between the classification accuracy and subjective complexity, the Spearman correlation coefficient is indicated under the corresponding pair of columns ($p < 0.001$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявленная асимметрия в точности классификации состояний мозга в зависимости от того, движение какой руки воображает пользователь ИМК с теми или иными личностными характеристиками может быть сопоставлена с данными об асимметрии в активности мозга в зависимости от личностного профиля.

В нашем исследовании оказалось, что точность классификации сигналов мозга при воображении движений ПР (но не ЛР) по сравнению с покоем выше у экстравертов, чем у интровертов. Известно, что у людей с ведущей ПР доминирует левая нигростриарная дофаминергическая система, и наоборот – у

левой (Mohr et al., 2003). Вместе с тем есть сведения о преимущественном содержании дофамина в базальных ганглиях (в бледном шаре, хвостом ядре и скорлупе) левого полушария по сравнению с правым независимо от право- или леворукости (Glick et al., 1982; Van Dyck et al., 2002). Как упоминалось во введении, экстравертам свойственна большая дофаминергическая активность, чем интровертам (Wacker, 2017). В нигростриарной дофаминергической системе дофамин играет роль стимулирующего нейромедиатора, способствующего повышению двигательной активности, уменьшению двигательной заторможенности и скованности, снижению гипертонуса мышц. Такая роль дофамина будет, по всей вероятности, приводить и к растормаживанию нейронных пулов, связанных с регуляцией движений и их воображением. Бледный шар регулирует сложные двигательные акты, при его раздражении наблюдается сокращение мышц конечностей. Хвостатое ядро играет важную роль в сознательном контроле двигательной активности, а скорлупа отвечает за регуляцию движений и влияет на различные виды обучения. Согласно Н.А. Бернштейну (Бернштейн, 1990) уровень базальных ганглиев – это уровень синергий и штампов, а движения, которые наши испытуемые воображали в ходе эксперимента (поднимание и опускание руки) – это хорошо выученные, стереотипные движения, которые вполне можно отнести к категории “штампов” (хотя сам процесс воображения движений не является стереотипным и при нем задействуются не только уровень базальных ганглиев, но и другие структуры, включая участки коры головного мозга (Mokienko et al., 2013)). Следовательно, можно предположить, что точность классификации сигналов мозга при воображении нашими испытуемыми движений именно ПР, но не ЛР была больше у экстравертов в связи с большей активностью их дофаминергической системы (по сравнению с интровертами).

Что касается других характеристик, выявивших корреляцию с точностью классификации при воображении движений ПР, – экспрессивности и чувствительности – прямых данных в литературе нет. Экспрессивность характеризуется живостью, оживленностью, спонтанностью, жизнерадостностью, импульсивностью (низкая экспрессивность – серьезный, сдержанный, рассудительный, молчаливый, замкнутый) и дополняет образ пользова-

теля-экстраверта, который более успешно воображает движения ПР. Чувствительность характеризуется проявлением таких качеств, как эстетичность, сентиментальность, нежность, интуитивность, утонченность в противовес утилитарности, объективности, жесткости, грубости. Можно предполагать, что люди с большими показателями по этому фактору проявляют и большую чувствительность к кинестетическим ощущениям, которые наши испытуемые должны были воображать согласно инструкции. Почему этот фактор оказывается значимым для воображения ПР, а не ЛР – прямых данных в литературе нет. Вместе с тем представляется весьма вероятным, что это опять же связано с большим количеством дофамина в базальных ганглиях левого полушария (Glick et al., 1982), при функционировании которых важную роль играют проприоцептивные обратные связи вследствие роли базальных ганглиев в обучении движениям.

С успешностью классификации сигналов мозга при воображении движений ЛР оказались негативно связаны такие факторы, как мечтательность и высокая нормативность, а факторный анализ выявил более высокую точность классификации у людей, которым свойственна практичность (низкие показатели по фактору “мечтательность”) одновременно с высокой дипломатичностью (сдержанностью) и при этом низкая общительность (последняя с меньшей факторной нагрузкой). Следовательно, точность классификации при воображении движений ЛР по сравнению с покоем выше у практичных, сдержанных, скептических и не очень общительных людей.

Таким образом, если при воображении движений ПР успешнее экстраверты, то при воображении движений ЛР – практичные, сдержанные, скептические и не очень общительные люди. Согласно имеющимся в литературе данным экстраверсия положительно коррелирует с положительными эмоциями и ощущением счастья, и отрицательно – с негативными эмоциями и депрессией (Pavot et al., 1990; Fleeson et al., 2002; Ng, Diener, 2009; Oerlemans, Bakker, 2014), имеются данные о связи экстраверсии, позитивных эмоций, уровня дофамина и асимметрии альфа-активности в префронтальных областях (Wacker, 2017). Коллин Де Янг считает, что уровень дофамина может определять форми-

рование личностных характеристик – вышеупомянутая “единая теория о роли дофамина в формировании личностных характеристик” (DeYoung, 2013). Выявленное отличие качеств, оптимальных для успешного воображения движений ПР и ЛР, напоминает о межполушарных различиях, касающихся двух аспектов. Первый аспект касается эмоциональной сферы: согласно ряду данных левое полушарие связано с позитивными эмоциями, а правое – с негативными (Diamond et al., 1976; Sackeim et al., 1982). Второй аспект касается разных способов кодирования информации при организации движений (Harrington, Naaland, 1991; Naaland et al., 2004; Ляховецкий, Боброва, 2009; Боброва и др., 2011; 2012) – левое полушарие специализируется на быстрых автоматизированных баллистических движениях и мелкой моторике, требующей высоких скоростей движений, правое – на регуляции позы и более медленных движений, осуществляемых с обратными связями, для которых необходима проприоцептивная афферентация. В рамках такого подхода воображение движений ПР, в реализации которого большую роль играет левое полушарие, более успешно у более экстраверсивных “быстрых” положительно настроенных людей, у которых больше концентрация дофамина в нигростриарной системе левого полушария, воображение движений ЛР – у менее эмоционально-позитивных более “медленных” интровертов, более внимательных к кинестетической информации. Данные дают основания предполагать, что “портрет” более успешного наивного пользователя ИМК, который впервые занимается кинестетическим воображением движений ПР и ЛР, характеризуется большей межполушарной асимметрией дофамина. Это предположение требует, конечно, дальнейших исследований. Тем не менее в литературе есть сведения о том, что асимметрия концентрации дофамина в стриатуме индивидуально специфична, и коэффициент этой асимметрии с возрастом изменяется минимально (van Dycck et al., 2002).

Анализ успешности воображения движений в связи с фактором Q1 (радикализм, открытость к изменениям) дает основания считать, что при воображении движений как ПР, так и ЛР лучше управляют ИМК открытые для перемен люди, склонные к эксперименту, анализу, критике, либерализму, свободомыслию и гибкости, а не традиционалисты и консерваторы. Можно предположить, что

этот результат связан с нетривиальностью задачи воображения движений.

Наконец, тот факт, что точность классификации состояний мозга при воображении движений ПР и при воображении движений ЛР выше у тех людей, которым субъективно сложнее представлять движения ПР, но не ЛР, может быть связан с вышеупомянутыми различиями способов кодирования информации о движениях в правом и левом полушарии (Harrington, Naaland, 1991; Naaland et al., 2004; Ляховецкий, Боброва, 2009; Боброва и др., 2011; 2012). Поскольку правое полушарие использует в большей степени позиционное кодирование и информацию от проприорецепторов (Naaland et al., 2004; Боброва, 2007), а левое полушарие осуществляет кодирование баллистических движений, для регуляции которых в меньшей степени используются обратные связи от проприорецепторов (Harrington, Naaland, 1991; Naaland et al., 2004), можно предполагать, что те испытуемые, которым субъективно сложнее представлять движения ПР, в большей степени внимательны к проприоцептивным ощущениям при воображении движений ПР (в соответствии с инструкцией), восполняя свойственную левому полушарию склонность к “игнорированию” проприоцептивной информации, что и улучшает результат при работе с ИМК. Испытуемые с низкой субъективной сложностью воображения движений ПР в меньшей степени внимательны к проприоцептивной информации, и это приводит к меньшей точности классификации.

Данные о выявленных связях между успешностью воображения движений и личностными характеристиками могут быть применимы на практике — при отборе постинсультных больных для реабилитации с применением ИМК. Однако следует учесть, что в нашем исследовании возраст испытуемых составлял 19–25 лет, а 95% инсультов происходит в возрасте 45 лет и более, 2/3 — в возрасте более 65 лет (Feigin et al., 2014). Используемое для воображения движение — поднятие и опускание выпрямленной руки с колена до уровня плеча и обратно — является стереотипным и простым в исполнении. Кроме этого движения в подобных исследованиях часто используют сжатие-разжатие кулака, пронацию-супинацию руки и сгибание-разгибание в лучезапястном суставе (Suwannarat et al., 2018). Вероятно, что при исследовании постинсультных пациентов по-

жилого возраста, а также при использовании для воображения других движений, могут быть выявлены другие закономерности и взаимосвязи.

ВЫВОДЫ

1. При воображении движений ПР успешнее управляют ИМК экспрессивные чувствительные экстраверты. Это может объясняться большей дофаминергической активностью у экстравертов, чем у интровертов, а также более высоким содержанием дофамина в базальных ганглиях левого полушария.

2. При воображении движений ЛР большая точность классификации состояний мозга достигается у практичных, сдержанных, скептических и не очень общительных людей.

3. При воображении движений как ПР, так и ЛР лучше управляют ИМК открытые для перемен люди, склонные к эксперименту, анализу, критике, либерализму, свободомыслию и гибкости, а не традиционалисты и консерваторы. Вероятно, это связано с нетривиальностью задачи воображения движений.

4. Точность классификации выше у тех людей, которым субъективно сложнее представлять движения ПР, но не ЛР. Предполагается, что в основе этого феномена лежат различия способов кодирования информации о движениях в правом и левом полушарии.

Полученные данные могут быть использованы при разработке индивидуальных методик обучения управлению ИМК.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-315-90035.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бернштейн Н.А.* Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990. 495 с.
- Боброва Е.В.* Современные представления о корковых механизмах и межполушарной асимметрии контроля позы (Обзор литературы по проблеме). Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2007. 57 (6): 663–678.
- Боброва Е.В., Ляховецкий В.А., Борщевская Е.Р.* Роль “предыстории” в воспроизведении последовательности движений правой или левой руки: кодирование положений, движений, структуры элементов последовательности. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2011. 61 (5): 565–572.
- Боброва Е.В., Ляховецкий В.А., Скопин Г.Н.* Обучение воспроизведению последовательностей движений правой и левой руки: кодирование

- положений и движений. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2012. 62 (4): 422–430.
- Волкова К.В., Дагаев Н., Киселев А., Касумов В.Р., Александров М.В., Осадчий А.Е. Интерфейс мозг-компьютер: опыт построения, использования и возможные пути повышения рабочих характеристик. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2017. 67 (4): 504–521.
- Ляховецкий В.А., Боброва Е.В. Воспроизведение запомненной последовательности движений правой и левой руки: позиционное и векторное кодирование. Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2009. 59 (1): 33–42.
- Ahn M., Ahn S., Hong J.H., Cho H., Kim K., Kim B.S., Chang J.W., Jun S.C. Gamma band activity associated with BCI performance: simultaneous MEG/EEG study. *Front. Hum. Neurosci.* 2013. 7: 848.
- Bamdadian A., Guan C., Ang K.K., Xu J. The predictive role of pre-cue EEG rhythms on MI-based BCI classification performance. *J. Neurosci. Methods.* 2014. 235: 138–144.
- Blankertz B., Sannelli C., Halder S., Hammer E. M., Kübler A., Müller K.-R., Curio G., Dickhaus T. Neurophysiological predictor of SMR-based BCI performance. *Neuroimage.* 2010. 51: 1303–1309.
- Burde W., Blankertz B. Is the locus of reinforcement a predictor of brain-computer interface performance? *Proceedings of the 3rd International Brain-Computer Interface Workshop and Training Course.* 2006.
- DeYoung C. G. The neuromodulator of exploration: A unifying theory of the role of dopamine in personality. *Front. Hum. Neurosci.* 2013. 7: 762.
- Diamond S., Farrington L., Johnson P. Differing emotional response from right and left hemispheres. *Nature.* 1976. 261: 690–692.
- Eysenck H.J. Personality as a fundamental concept in scientific psychology. *Aust. J. Psychol.* 1983. 55: 289–304.
- Eysenck H.J. The biological basis of personality. Thomas, Springfield, IL. 1967.
- Feigin V.L., Forouzanfar M.H., Krishnamurthi R., Mensah G.A., Connor M., Bennett D.A., Moran A.E., Sacco R.L., Anderson L., Truelsen T., O'Donnell M., Venketasubramanian N., Barker-Collo S., Lawes C.M., Wang W., Shinohara Y., Witt E., Ezzati M., Naghavi M., Murray C. Global and regional burden of stroke during 1990–2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet.* 2014. 383 (9913): 245–254.
- Fleeson W., Malanos A.B., Achille N.M. An intraindividual process approach to the relationship between extraversion and positive affect: Is acting extraverted as “good” as being extraverted? *J. Pers. Soc. Psychol.* 2002. 83 (6): 1409–1422.
- Gale A., Coles M., Kline P., Penfold V. Extraversion-introversion, neuroticism and EEG: Basal and response measures during habituation of the orienting response. *Br. J. Psychol.* 1971. 62: 533–543.
- Glick S.D., Ross D.A., Hough L.B. Lateral asymmetry of neurotransmitters in human brain. *Brain Res.* 1982. 234 (1): 53–63.
- Grosse-Wentrup M., Schölkopf B. High gamma-power predicts performance in sensorimotor-rhythm brain-computer interfaces. *J. Neural Eng.* 2012. 9 (4): 046001.
- Haaland K.Y., Elsinger C.L., Mayer A.R., Durgerian S., Rao S.M. Motor sequence complexity and performing hand produce differential patterns of hemispheric lateralization. *J. Cogn. Neurosci.* 2004. 16 (4): 621–636.
- Haaland K.Y., Prestopnik J., Knight R.T., Lee R.R. Hemispheric asymmetries for kinematic and positional aspects of reaching. *Brain.* 2004. 127: 1145–1158.
- Hammer E., Kaufmann T., Kleih S.C., Blankertz B., Kübler A. Visuo-motor coordination ability predicts performance with brain-computer interfaces controlled by modulation of sensorimotor rhythms (SMR). *Front. Hum. Neurosci.* 8: 574.
- Harrington D.L., Haaland K.Y. Hemispheric specialization for motor sequencing: abnormalities in levels of programming. *Neuropsychology.* 1991. 29 (2): 147–163.
- Jeunet C., Kaoua B., Lotte F. Chapter 1 - Advances in user-training for mental-imagery-based BCI control: Psychological and cognitive factors and their neural correlates. *Prog. Brain Res.* 2016. 228: 3–35.
- Jeunet C., N'Kaoua B., Subramanian S., Hachet M., Lotte F. Predicting mental imagery-based BCI performance from personality, cognitive profile and neurophysiological patterns. *PloS one.* 2015. 10 (12): e0143962.
- Korjus K., Uusberg A., Uusberg H., Kuldkepp N., Kreegipuu K., Allik J., Vicente R., Aru J. Personality cannot be predicted from the power of resting state EEG. *Front. Hum. Neurosci.* 2015. 9: 63.
- McCrae R.R., Costa P.T. The five-factor theory of personality. *Handbook of personality: Theory and research.* 2008. 159–181.
- McCrae R.R., John O.P. An introduction to the five-factor model and its applications. *J. Pers.* 1992. 60 (2): 175–215.
- Minnix J.A., Kline J.P. Neuroticism predicts resting frontal EEG asymmetry variability. *Pers. Individ. Differ.* 2004. 36 (4): 823–832.
- Mohr C., Landis T., Bracha H.S., Brugger P. Opposite turning behavior in right-handers and non-right-handers suggests a link between handedness and cerebral dopamine asymmetries. *Behav. Neurosci.* 2003. 117 (6): 1448–1452.
- Mokienko O.A., Chernikova L.A., Frolov A.A., Bobrov P.D. Motor imagery and its practical application. *Neurosci. Behav. Physi.* 2014. 44 (5): 483–489.
- Nazre A.R., Mohd N.T., Sahrim L., Norizam S., Zunanairah Hj.M., Ros S.S. Learners' learning style correlated to agreeableness based on EEG. *Inter-*

- national Conference on Management and Education Innovation. ACSIT Press, Singapore. 2012.
- Ng W., Diener E. Personality differences in emotions. Does Emotion Regulation Play a Role? *J. Individ. Differ.* 2009. 30: 100–106.
- Oerlemans W.G.M., Bakker A.B. Why extraverts are happier: A day reconstruction study. *J. Res. Pers.* 2014. 50: 11–22.
- Oldfield R.C. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia.* 1971. 9: 97–113.
- Pacheco K., Acuña K., Carranza E., Ahanccaray D., Andreu-Perez J. Performance predictors of motor imagery brain-computer interface based on spatial abilities for upper limb rehabilitation. In: Proc. IEEE EMBC. IEEE. 2017: 1014–1017.
- Pavlenko V.B., Chernyi S.V., Goubkina D.G. EEG correlates of anxiety and emotional stability in adult healthy subjects. *Neurophysiology.* 2009. 41 (5): 337–345.
- Pavot W., Diener E., Fujita F. Extraversion and happiness. *Pers. Individ. Differ.* 1990. 11 (12): 1299–1306.
- Sackeim H.A., Greenberg M.S., Weiman A.L., Gur R.C., Hungerbuhler J.P., Geschwind N. Hemispheric asymmetry in the expression of positive and negative emotions. Neurologic evidence. *Arch. Neurol.* 1982. 39 (4): 210–218.
- Sannelli C., Vidaurre C., Müller K.R., Blankertz B. A large scale screening study with a SMR-based BCI: Categorization of BCI users and differences in their SMR activity. *PLOS ONE.* 2019. 14 (1): e0207351.
- Savage R.D. Electro-cerebral activity, extraversion and neuroticism. *Br. J. Psychiatry.* 1964. 110 (464): 98–100.
- Schmidtke J.I., Heller W. Personality, affect and EEG: predicting patterns of regional brain activity related to extraversion and neuroticism. *Pers. Individ. Differ.* 2004. 36 (3): 717–732.
- Stelmack R.M. Biological bases of extraversion psychophysiological evidence. *J. Pers.* 2009. 58 (1): 293–311.
- Stenberg G. Personality and the EEG: Arousal and emotional arousability. *Pers. Individ. Differ.* 1992. 13 (10): 1097–1113.
- Stough C., Donaldson C., Scarlata B., Ciorciari J. Psychophysiological correlates of the NEO PI-R Openness, Agreeableness and Conscientiousness: preliminary results. *International Journal of Psychophysiology.* 2001. 41: 87–91.
- Suwannarat A., Pan-ngum S., Israsena P. Comparison of EEG measurement of upper limb movement in motor imagery training system. *BioMed. Eng. On-Line.* 2018. 17: 103.
- Van Dyck C.H., Seibyl J.P., Malison R.T., Laruelle M., Zoghbi S.S., Baldwin R.M., Innis R.B. Age-related decline in dopamine transporters: analysis of striatal subregions, nonlinear effects, and hemispheric asymmetries. *Am. J. Geriatr. Psychiatry.* 2002. 10 (1): 36–43.
- Wacker J. Effects of positive emotion, extraversion, and dopamine on cognitive stability-flexibility and frontal EEG asymmetry. *Psychophysiology.* 2017. 55 (1): e12727.

RELATIONSHIP BETWEEN PERSONALITY TRAITS OF USERS AND SUCCESS OF MOTOR IMAGERY OF RIGHT AND LEFT HANDS WHEN CONTROLLING BRAIN-COMPUTER INTERFACES

V. V. Reshetnikova^{a,#}, E. V. Bobrova^a, E. A. Vershinina^a, A. A. Grishin^a,
A. A. Frolov^{b,c}, and Yu. P. Gerasimenko^a

^a Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

^b Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^c Institute of Translational Medicine of Pirogov of Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

#e-mail: 3069@bk.ru

It is known that the success of motor imagery in brain-computer interface (BCI) control may depend on user's personality traits, and the activity of some right- and left-hemispheric brain structures depends on personality traits. It is unknown how the success of BCI control by people with different personality traits is associated with interhemispheric asymmetry. Here we analyzed the relationships between personality traits and the accuracy of classification of brain signals in imagination of movements of the right hand (RH) and the left hand (LH) in comparison with the rest state with a single control of BCI by naive subjects. It is found that lively sensitive extraverts are more successful in imagining of RH movements, and practical, reserved, skeptical and not very sociable persons are more efficient in imagining of LH movements. BCI users open to change are more successful than traditionalists and conservatives in imagination of movements of both RH and LH. The analysis of subjective complexity of movement imagination shows that the classification accuracy during imagination of RH comparative to LH is higher in users for whom is more difficult to imagine the movements of RH, but not LH. The data obtained supposed to be connected with differences in motor control and dopamine level in the right and the left hemisphere.

Keywords: brain-computer interfaces, personality traits, inter-hemispheric asymmetry