

П. А. Кручинин, канд. физ.-мат. наук, доц., pkruch@mech.math.msu.su,
А. П. Кручинина, канд. физ.-мат. наук, ассистент, anna.kruchinina@math.msu.ru,
И. А. Кудряшов, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., Ilya.kudryashov.85@gmail.com,
А. А. Любкевич, аспирант, antonlyu@mail.ru, Я. Ю. Миняйло, аспирант, minyailo_yana@mail.ru,
М. А. Подопряхин, студент, podoprighin.maxim@gmail.com, В. А. Чертополохов, науч. сотр., psvr@vrmsu.ru,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Количественная оценка изменения функционального состояния человека за время полета летательного аппарата*

Обсуждаются предварительные результаты применения разработанного подхода к количественной оценке изменения функционального состояния человека за время полета летательного аппарата. Для такой оценки используется сравнение результатов стабилметрических и окулографических обследований пассажира летательного аппарата, проведенные до и после полета. В серии полетов на легкомоторных летательных аппаратах приняли участие 14 добровольцев обоего пола, для которых провели 21 пару предполетных и послеполетных обследований. Для имеющейся выборки добровольцев в ходе этих обследований выявлены параметры, которые имеют устойчивую тенденцию к изменению. Эти параметры характеризуют качество зрительного слежения и возможности удержания человеком вертикальной позы. Доля проб, у которых после полета отмечено снижение средней скорости медленных фаз нистагма, возникающего при оптокинетической стимуляции, превысило 70 %. У большинства добровольцев заметны изменения стабилметрических параметров для оптокинетической пробы и пробы с удержанием равновесия на неустойчивой опоре в виде пластины пенополиуретана. Более чем в 70 % этих проб после полета изменялись скорости слежения, средняя скорость центра давления и показатель качества функции равновесия. Отмечено, что показатель Херста после полета снижался при вставании на пластину пенополиуретана у подавляющего числа обследуемых по сравнению с со значением в фоновой пробе, в то время как до полета изменение этого параметра носит разнонаправленный характер. В стабилметрическом тесте со "ступенчатым отклонением", при котором доброволец по команде совершал быстрые наклоны на небольшой угол за счет изменения угла в голеностопном суставе у 75 % обследуемых после полетов отмечено снижение средней скорости. Полученные результаты предполагается использовать для оценки качества симуляции полета с использованием тренажерных стендов.

Ключевые слова: функциональное состояние человека, летная нагрузка, постурология, стабилметрия, оптокинетический тест, нистагм, зрительное слежение

Одна из заметных проблем динамической имитации полета летательного аппарата на тренажерных стендах связана со слабой проработкой методов оценки качества симуляции. Для оценки результатов воздействия на человека симуляционной нагрузки обычно используется статистическая обработка частных субъективных оценок, сделанных в результате опросов опытных экспертов [1, 2]. Объективность подобного анализа может повысить использование количественных оценок изменения функционального состояния человека за время имитации и сравнение их с аналогичными изменениями за время реального полета. Ранее применение такого подхода в литературе неизвестно.

Одна из первых задач на пути реализации такого подхода состоит в выборе вида обследо-

вания, уточнении проб, проводимых в ходе этого обследования, и параметров, которые будут использованы для последующей оценки. Можно говорить о новизне такого подхода по сравнению с описанными ранее в литературе. Обсудим особенности и предварительные результаты применения подхода к количественной оценке изменения функционального состояния человека за время полета летательного аппарата. Используем для этого сравнение результатов стабилметрических и окулографических обследований пассажира летательного аппарата, проведенные до и непосредственно после полета на легкомоторном летательном аппарате.

Характерная программа полета

Для предварительной оценки рассматривали полеты на легких самолетах авиации общего назначения Як18Т, Socata-893 (рис. 1), Вильга 35, Zlin142, на спортивном самолете Як-52, транспортном самолете Ан-2 и вертолете Bell-430. Типовая программа полета состояла из взлета, набора высоты 200 м, выполнения в пилотаж-

*Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня "Сверхзвук" на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-923). Авторы выражают особую благодарность пилотам и персоналу аэродрома Вихрево.



Рис. 1. Подготовка к полету легкого самолета Socata-893 (фото. А. Маркина)

Fig. 1. Preparing for the flight of a light aircraft Socata-893 (photo by A. Markin)

ной зоне вблизи аэродрома (подлетное время 3 мин) набора координированных устойчивых виражей на 360° с креном 15° , 25° , 35° соответственно и посадки. Длительность такого полета составляла 10 ± 2 мин. Усложненная программа полета состояла из взлета, набора высоты 1000 м, виража 45° вправо, штопорной бочки влево, разгона в пикировании, невесомости при выполнении последующей горки (до 3 с), петли, еще одной кратковременной невесомости, виража влево и штопорной бочки вправо и занимала 20 мин полетного времени. Характерные схемы отдельных фигур пилотажа приведены на рис. 2. Полеты выполнялись днем в простых

метеорологических условиях при отсутствии сильных возмущений атмосферы (сдвиговой и термической турбулентности).

Порядок проведения обследования

Выбор проб и параметров для анализа функционального состояния человека осуществлен в результате анализа информации о предрейсовом обследовании состояния оператора транспортного средства [4–7]. Показатели, используемые в разных отраслях, отличаются. Стандартными инструментами исследования считаются анализ variability сердечного ритма, анализ глазодвигательной активности, электромиография и электроэнцефалография [8, 9]. Все эти методы исследования применяются к пилотам при тренировках на тренажерах [10]. Стабилометрия применяется для анализа функционального состояния в авиакосмической отрасли [6, 11]. Для количественной оценки влияния кратковременного полета на функциональное состояние человека анализировали изменение постурологических и окулографических характеристик участника обследования.

Для регистрации показателей использовали стабилоанализатор и видеоокулограф. В исследовании использовался стабилоанализатор "Стабилан 01-2" [7] — устройство для анализа способности человека управлять малым изменением вертикальной позы, в том числе при

наличии биологической обратной связи по опорной реакции. Он позволяет определить значение силы нормального давления на платформу со стороны находящегося на ней объекта и координату точки ее приложения — центр давления.

Для обследований движений глаз был использован окулограф ICS Impulse, который определял изменение положения центра зрачка при движении глаза на основании обработки изображения портативных видеокамер.

Заметим, что влияние вестибулярных изменений, развившихся вследствие летной нагрузки, после полета со временем снижается. В связи с этим послеполетные пробы необходимо проводить непосредственно после остановки самолета в течение достаточно короткого времени. Это ограничивает число тестов и продолжительность

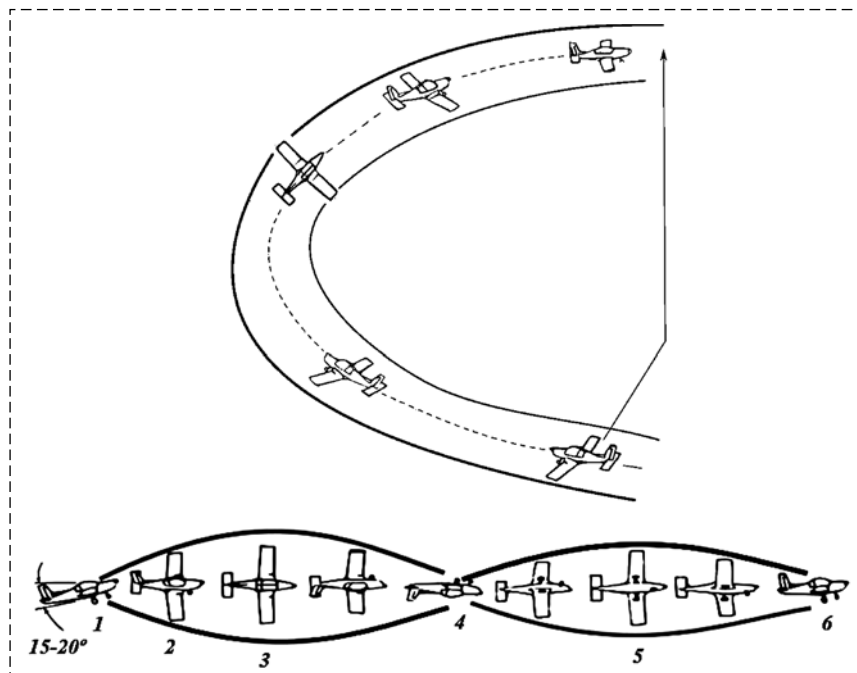


Рис. 2. Схемы отдельных фигур пилотажа: разворот и бочка (по [3])

Fig. 2. Schemes of individual aerobatic maneuvers: turn and roll (according to [3])

обследования. В связи с этим было отобрано небольшое число проб, которые располагались в последовательности, определяемой предполагаемой вероятностью проявления вестибулярных изменений при проведении соответствующих обследований. Считается, что "в отоневрологии наибольшей диагностической ценностью обладают оптокинетическая стимуляция, проба с выключением зрения, исследование в позе Ромберга и проба с поворотами головы" [11, 12].

Особенности условий небольшого аэродрома не позволяли исключить наличие отвлекающих факторов (шум моторов, вибрации и т. п.), которые неизбежно оказывали влияние на проведение обследования. Наиболее ценной представлялась информация об изменении биомеханических показателей, получаемых при обследованиях до и после полета. Изменения для человека представлялись априорно не значительными. При проведении проб требовалось максимально возможное повторение основных характеристик обследования: последовательности проб, интервалов между пробами, поз при выполнении тестов. Предварительный опыт показал, что аккуратное соблюдение позы Ромберга будет затруднено: не все обследуемые способны удерживать равновесие в этой позе — с закрытыми глазами, причем предсказать заранее, насколько тяжело исследователю будет удерживать эту позу после полета, практически невозможно. В связи с этим исследование в позе Ромберга не использовалось.

В итоге были выбраны следующие пробы, в соответствии с работами [7, 14], которые выполнялись испытуемым в данной последовательности:

1. Укороченный оптокинетический тест, состоящий из проб "полосы вправо", фоновой пробы с открытыми глазами (ГО) и пробы "полосы влево". Этот тест сопровождался окулографическим обследованием.

2. Укороченный тест с поворотом головы, состоящий из проб, в ходе которых человек стоял с закрытыми глазами (ГЗ), последовательно повернув голову направо, поднимая голову вверх и удерживал ее прямо. Последняя проба использовалась как фоновая.

3. Тест с удержанием равновесия на неустойчивом основании в виде пластины пенополиуретана толщиной 9 см. В ходе этого теста последовательно выполнялись пробы с закрытыми и открытыми глазами.

4. В восьми случаях в заключение обследуемый выполнял также тест со "ступенчатым отклонением" в варианте, описанном в статье [15].

Оптокинетический тест выполнялся первым и состоял в удержании вертикальной позы с открытыми глазами в трех вариантах: глядя на чистый экран (фоновая проба) и два варианта со зрительными помехами: глядя на экран, по которому перемещаются калиброванные полосы справа налево или слева направо. Эти пробы сопровождалось окулографическим обследованием. Предполагалось, что функциональные изменения вестибулярной системы, развившиеся вследствие летной нагрузки при выполнении фигур сложного пилотажа, повлияют на комплексирование информации от разных органов чувств и найдут отражение в управлении движением глаз. Из опыта космических исследований [16] известно, что изменение гравитоинерциальной обстановки сильно влияет на формирование глазодвигательных откликов на различные раздражители, в том числе зрительные, к которым относятся данные, регистрируемые в этом исследовании. Известно, что характер слежения изменяется в зависимости от состояния человека, что показано на примере изменения параметров нистагма, возникающего в ответ на предъявляемый раздражитель [17]. Более того, при повышении скорости движения стимула наблюдается увеличение рассогласования между скоростями отслеживающих движений глаз и движением стимула. Это означает, что уменьшается время четкого видения, на протяжении которого возможно удерживать объект в фовеальном поле зрения. Таким образом, рассматриваемый тест отражает возможность испытуемого зрительно отслеживать быстро меняющуюся обстановку.

Стабилометрические пробы с поворотом головы выполнялись по "классическому" сценарию. Повороты головы приводят человека к необходимости применять для удержания и стабилизации вертикальной позы информацию вестибулярных каналов в относительно непривычной форме. Для сокращения времени проведения проб использовались только два положения: голова повернута вправо и голова поднята вверх, при этом глаза человека были закрыты.

Удержание равновесия на основании в виде пластины пенополиуретана также приводит к повышению роли вестибулярного аппарата. Во-первых, задача удержания равновесия на неустойчивом основании требует мобилизации всех сенсорных систем человека. Во-вторых, равномерное распределение давления в стопе изменяет привычную информацию от проприоцепторов стопы и тем самым искажает один из наиболее важных информационных пото-

ков, используемых человеком при удержании вертикальной позы. Это обстоятельство также увеличивает роль вестибулярного аппарата.

При выполнении теста со "ступенчатым отклонением" человек стоял на платформе стабиллоанализатора с закрытыми глазами. В ходе пробы он должен был быстро изменить положение туловища в сагиттальной плоскости за счет изменения угла в голеностопном суставе на произвольный угол, значительно меньший, чем максимально возможное отклонение. По прошествии 10 с человек по команде совершает обратное движение. Такой цикл повторялся пять раз.

Продолжительность каждой пробы составляла 20 с. Пробы выполнялись с минимальным перерывом в 3–10 с для того, чтобы человек мог адаптироваться к задаче удержания измененной позы. Послеполетное исследование проводилось через 5–10 мин после остановки движения летательного аппарата.

Показатели обследований и их вычисление

Для анализа результатов проведенных обследований вычислялись следующие показатели.

Для *стабилометрических* обследований из многообразия всевозможных параметров, вычисляемых программным обеспечением стабиллоанализатора Стабилан 1-02 [7, 14], были выбраны следующие:

1) разброс по фронтالي σ_x — среднеквадратическое отклонение центра давления от среднего положения во фронтальном направлении (вправо—влево) [18];

2) разброс по сагиттали σ_y — среднеквадратическое отклонение центра давления от среднего положения в сагиттальном направлении (вперед—назад) [18];

3) средняя скорость v центра давления;

4) площадь S эллипса, содержащего 95 % точек траектории центра давления;

5) показатель качества функции равновесия (КФР), оценивающий равномерность распределения векторов скоростей центра давления на опорной поверхности. КФР считается стабильным стабиллометрическим показателем [19];

6) коэффициент резкого изменения направления движения (КРИНД) — доля тех оценок векторов скорости, угол отклонения каждого из которых отличается от предыдущей оценки вектора более чем на 45° . При имеющейся информации о частоте обновления оценок вектора скорости центра давления этот коэффициент характеризует высокочастотные составляющие управления движением [19].

Два первых параметра во многом характеризуют управление отдельными группами мышц при удержании вертикальной позы во фронтальном и сагиттальном направлениях [20]. Остальные параметры носят интегративный характер и учитывают влияние всех модальностей.

Помимо традиционных параметров для основных проб рассчитывались показатели диффузионного анализа, таких как показатель Херста. Подобные показатели были разработаны для моделей частичного броуновского движения [21]. Применение таких показателей в стабиллометрии нашло отражение в современных исследованиях [22, 23]. Эти показатели характеризуют изменение механизма управления удержанием вертикальной позы человеком. Они могут оцениваться различными способами [24]. Для определенности в настоящем исследовании мы анализировали оценку показателя Херста отдельно для фронтали и сагиттали, вычисляемую в соответствии с работой [22]. Для этого вычислялись значения стабиллометрических диффузионных функций $D_f(\Delta)$ (Stabilogram Diffusion Function, SDF) по формуле

$$D_f(\Delta) = \sum_{i=1}^{N-m(\Delta)} \frac{[x(t_{i+m(\Delta)}) - x(t_i)]^2}{N - m(\Delta)},$$

где Δ — интервал времени; $x(t_i)$ — значение координаты центра давления в момент времени t_i ; N — общее число моментов времени измерений координат центра давления; $m(\Delta)$ — число моментов времени измерений координат центра давления на интервале продолжительностью Δ . Для стабиллометрической диффузионной функции $D_f(\Delta)$ строится график в логарифмических осях, показанный на рис. 3. Для

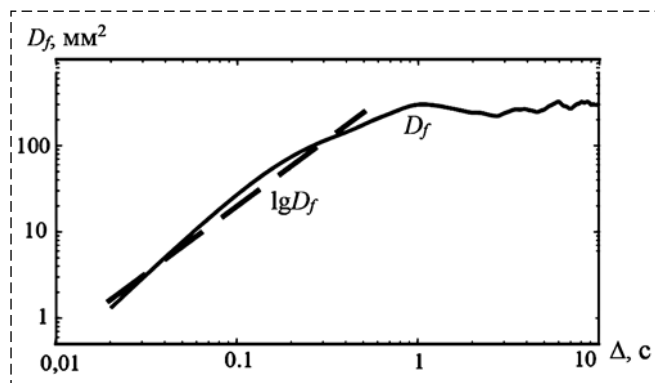


Рис. 3. Характерный вид стабиллометрической диффузионной функции $D_f(\Delta)$ и ее приближения, используемого для определения показателя Херста

Fig. 3. Typical form of the stabilometric diffusion function $D_f(\Delta)$ and its approximation used to determine the Hurst exponent

частичного броуновского движения традиционно используется модель

$$D_f(\Delta) \sim \Delta^{2H},$$

где H называется показателем Херста. Половина коэффициента наклона касательной графика $D_f(\Delta)$ в логарифмических осях и является оценкой для H . Считается, что изменение показателя Херста соответствует изменению стратегии управления при регуляции вертикальной позы у человека [22, 23]. Характерный вид функции $D_f(\Delta)$ приведен на рис. 3. Часто эта функция имеет излом в районе $\Delta = 1$ с. Поведение функции после излома менее стабильно. В связи с этим в настоящей работе для оценки H использована оценка наклона $D_f(\Delta)$ в логарифмических осях для $\Delta \leq 1$ с, полученная методом наименьших квадратов. При обработке данных обследований использовано изменение этого показателя.

Тест со ступенчатым отклонением выполнялся в режиме "стабилометрической пробы". Человек стоял на платформе стабилоанализатора с закрытыми глазами. В ходе теста он должен был по команде быстро изменить положение туловища в сагиттальной плоскости за счет изменения угла в голеностопном суставе на произвольный угол, меньший, чем максимально возможное отклонение. По прошествии 10 с человек по команде совершал обратное движение. Такой цикл также повторялся 5 раз. Из предшествующих исследований [15, 25, 26] известно, что в этом тесте наиболее информативными представляются латентный период (интервал времени между получением команды и началом движения) и средняя скорость "броска" [14] — скорость движения центра давления при выполнении этого движения. При принятом режиме выполнения проб определение латентного периода затруднено, поэтому в исследовании учитывалась только скорость "броска".

Для *окулографических* обследований в качестве анализируемого параметра была выбрана средняя скорость слежения v_s . В каждой точке окулограммы была найдена численная производная. Участки знакопостоянства зависимости угловой скорости глаза от времени, на которых рассматриваемая величина принимала значения, достигавшие сотен градусов в секунду, были отнесены к быстрым фазам нистагма (саккадам). Промежутки между быстрыми фазами — медленные фазы нистагма, во время которых происходит отслеживание. Скорость, с которой движется глаз при отслеживании, в идеале должна с точностью до единиц градусов в секунду соответствовать угло-

вой скорости движения изображения относительно наблюдателя. Для анализа картины в целом было проведено осреднение угловой скорости по всем моментам времени, принадлежащим медленным фазам.

Результаты обследований

В соответствии со сказанным выше для регистрации стабилметрических показателей использовался стабилоанализатор "Стабилан-01-2" и видеоокулограф ICS Impulse. Для количественной оценки влияния кратковременного полета на функциональное состояние человека анализировалось изменение постурологических и окулографических характеристик испытуемого.

В обследовании приняли участие 14 испытуемых-добровольцев обоего пола (3 женского пола и 11 мужского) в возрасте от 19 до 60 лет, у которых провели 21 пару предполетных и послеполетных обследований. Один из испытуемых имеет опыт пилотирования легкомоторных летательных аппаратов. В 13 случаях испытуемый совершал полет в условиях ограничения видимости.

Поскольку пробы проводились в "ускоренном темпе" при укороченном интервале между пробами, сравнивать значения параметров с их "опорными" значениями, известными из литературы, некорректно. В этой ситуации важную роль приобретает анализ изменения этих значений за время полета при соблюдении заданной последовательности проб и хронометража обследований. В табл. 1 приведены медианные значения разностей стабилметрических параметров, вычисленных по результатам различных проб, проведенных непосредственно после полета и в период, предшествующий полету. В табл. 2 приведены средние квадратические значения отклонений этих параметров.

Разброс приведенных значений оказывается значительным и не позволяет делать однозначные выводы. Это во многом связано со спецификой распределения значений параметров. На рис. 4 приведены различные характерные гистограммы распределения приращения стабилметрических показателей. Приведенные распределения, как и прочие, имеют многочисленные существенные отклонения от средних значений, которые могли быть вызваны условиями проведения конкретных проб. Следует отметить, что такой разброс наблюдался и в результатах обследований отдельного добровольца в случае, если тесты проводились в различные дни.

Для получения более стабильных оценок для значимости каждого параметра и пробы

введем величину, равную доле пар проведенных проб, для которых значение соответствующего показателя после полета больше, чем значение в предполетной пробе. Эту величину можно считать оценкой вероятности увеличения соответствующего параметра в результате летной нагрузки. В случае значений этой доли, существенно меньших 0,5, можно говорить о снижении соответствующего параметра. Значения таких оценок приведены в табл. 3. Значения оценок, свидетельствующие об одно-

направленном изменении параметра с вероятностью большей, чем 0,7, выделены в табл. 3 жирным шрифтом (без подчеркивания отмечены случаи увеличения, подчеркнуты значения, соответствующие случаям уменьшения).

Однозначного вывода о влиянии ограничения визуального восприятия и сложности полета полученные данные делать не позволяют.

Аналогичная ситуация отмечается и для параметров диффузионного анализа. Разброс изменения их значений также велик и не обла-

дает желаемой регулярностью, что хорошо видно из табл. 4. Тем не менее заметно, что разброс значений показателя Херста для колебаний в сагиттальном направлении значительно возрастает, а среднее значение самого показателя у человека, вставшего на пластину пенополиуретана заметно снижается. Следует также отметить, что если до полетной нагрузки при вставании на пластину пенополиуретана показатель Херста снижался у 63 % испытуемых, по сравнению с со значением в фоновой пробе, то после полета этот эффект отмечен у 100 % испытуемых.

Отметим также результаты стабилметрического теста со "ступенчатым отклонением", при котором человек по команде совершал быстрые наклоны на небольшой угол за счет изменения угла в голеностопном суставе. Этот тест совершали восемь добровольцев. Особенности проведения теста не позволяли определять с достаточной точностью латентный период, и в исследовании сравнивались значения сагиттальной составляющей средней скорости центра давления при выполнении быстрой фазы движения. Среднее значение скорости до полетной нагрузки составило 10,4 мм/с, а после летной нагрузки — 10,2 мм/с при среднем квадратическом отклонении (СКО) 0,3 и 0,15 мм/с соответственно. Среднее снижение скорости составило 0,2 мм/с при СКО 0,3 мм/с. Эти

Таблица 1

Медианные значения разностей стабилметрических параметров, вычисленных по результатам различных проб, проведенных непосредственно после полета и в период, предшествующий полету
Differences median values in stabilometric parameters calculated based on the the results in tests. Tests carried out immediately after the flight and in the period preceding the flight

Проба	$\Delta\sigma_x$, мм	$\Delta\sigma_y$, мм	Δv , мм/с	ΔS , мм ²	$\Delta KФР$	$\Delta KРИНД$
Линии вправо	0,3	0,67	0,47	27,4	-1,4	0,88
Фон (ГО)	-0,09	-0,04	0,97	-0,9	-1,96	-0,23
Линии влево	0,47	-0,41	0,56	-1,6	-1,11	-0,2
Голова вверх	-0,1	-0,18	-0,52	-2,3	2,05	0,62
Голова вправо	0,08	0,69	0,33	56,6	-2,08	0,61
Фон (ГЗ)	-0,23	-0,2	-0,54	-16,7	0,96	0,47
Поролон ГЗ 1...20 с	1,2	2,58	6,49	657,5	-0,95	0,02
Поролон ГЗ 20...40 с	1,66	1,2	1,13	328,7	-0,4	-1,29
Поролон ГЗ 40...60 с	1,26	0,42	2,65	265	-2,19	0,23
Фон (ГО)	-0,29	0,61	-0,02	-4,4	0,23	0,77

Таблица 2

Средние квадратические значения отклонений разностей стабилметрических параметров, вычисленных по результатам различных проб, проведенных непосредственно после полета и в период, предшествующий полету
Standard deviations in stabilometric parameters calculated based on the the results in tests. Tests carried out immediately after the flight and in the period preceding the flight

Проба	$\Delta\sigma_x$, мм	$\Delta\sigma_y$, мм	Δv , мм/с	ΔS , мм ²	$\Delta KФР$	$\Delta KРИНД$
Линии вправо	0,51	1,15	1,36	51,2	3,81	3,99
Фон (ГО)	0,73	1,81	2,16	71,4	8,48	3,59
Линии влево	0,86	1,47	1,87	51,6	6,50	2,63
Голова вверх	1,17	0,96	2,74	109	7,35	1,22
Голова вправо	0,99	1,23	2,11	105	5,73	1,59
Фон (ГЗ)	0,67	2,01	1,34	124	4,38	2,29
Поролон ГЗ 1...20 с	2,99	4,42	13,0	983	3,77	1,53
Поролон ГЗ 20...40 с	2,41	2,15	8,57	411	5,01	1,63
Поролон ГЗ 40...60 с	2,28	1,57	4,82	581	4,24	1,93
Фон (ГО)	1,15	1,10	1,58	103	5,60	2,03

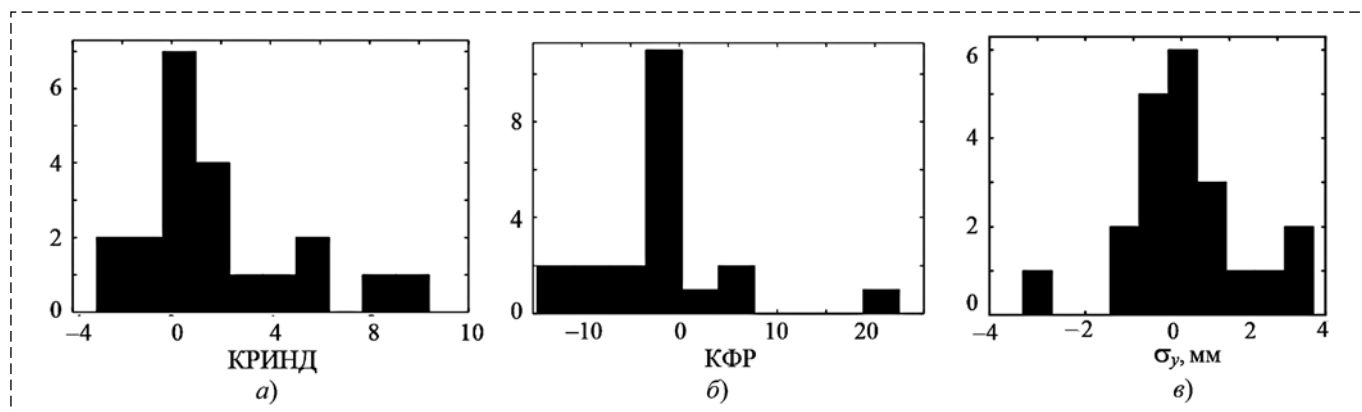


Рис. 4. Характерные гистограммы распределения приращения стабилометрических показателей:

a — изменение КРИНД для фоновой пробы с открытыми глазами; *b* — изменение КФР в пробе "полосы вправо"; *c* — изменение σ_y в пробе с поднятой головой

Fig. 4. Characteristic histograms of the distribution of the increment of stabilometric indicators:

a — change in coefficient of sudden change of direction for the background test with open eyes; *b* — change in quality indicator of the equilibrium function in the "band to the right" sample; *c* — change in σ_y in the head up test

Таблица 3

Оценка вероятности положительности разностей стабилометрических параметров, вычисленных по результатам различных проб, проведенных непосредственно после полета и в период, предшествующий полету

The estimated probability that deviations in stabilometric parameters calculated based on the results in tests are positive. Tests carried out immediately after the flight and in the period preceding the flight

Проба	σ_x	σ_y	ν	S	КФР	КРИНД
Линии вправо	0,71	0,71	0,76	0,67	0,19	0,57
Фон (ГО)	0,43	0,48	0,71	0,48	0,29	0,48
Линии влево	0,62	0,38	0,57	0,48	0,43	0,48
Голова вверх	0,48	0,43	0,38	0,48	0,62	0,67
Голова вправо	0,67	0,62	0,52	0,67	0,38	0,52
Фон (ГЗ)	0,43	0,43	0,38	0,43	0,57	0,57
Поролон ГЗ 1...20 с	0,62	0,76	0,76	0,67	0,38	0,52
Поролон ГЗ 20...40 с	0,57	0,62	0,62	0,67	0,43	0,29
Поролон ГЗ 40...60 с	0,67	0,57	0,76	0,76	0,24	0,52
Фон (ГО)	0,48	0,62	0,48	0,38	0,52	0,81

Таблица 4

Средние значения и средние квадратические отклонения показателя Херста H_s для обследуемых, стоящих с закрытыми глазами в ортоградной позе (фоновая проба в тесте с наклоном головы) и на пластине пенополиуретана

Hurst exponent H_s mean values and standard deviations in tests: person standing with closed eyes in an orthograde posture (baseline sample in the head tilt test) and on a foam plate

Направление	Условия выполнения пробы	Среднее до	СКО до	Среднее после	СКО после
Фронталь	Фон	0,72	0,05	0,73	0,06
	Пенополиуретан	0,71	0,06	0,72	0,05
Сагитталь	Фон	0,74	0,05	0,75	0,15
	Пенополиуретан	0,66	0,06	0,67	0,04

цифры не выглядят очень убедительными, однако при этом снижение средней скорости наблюдалось у 75 % обследуемых. Этот фактор также свидетельствует в пользу изменения психофизиологического состояния обследуемых

С помощью видеоокулографа ICS Impulse также у 14 добровольцев провели 21 пару предполетных и послеполетных обследований. Регистрировался оптокинетический нистагм. В результате теста оценивали скорость поворота зора на участках прослеживания — медленных фазах нистагма. После полетов в 80 % случаев в пробе "полосы вправо" и 70 % — в пробе "полосы влево" наблюдается снижение скорости слежения в ответ на идентичную зрительную стимуляцию. На рис. 5 приведены оценки ρ плотности распределения скоростей медленных фаз нистагма, возникающего при оптокинетической стимуляции (движений, соответствующих слежению). Статистические характеристики скорости движения глаза приведены в табл. 5, из которой видно, что, как и для стабилометрии, разброс статистических характеристик велик.

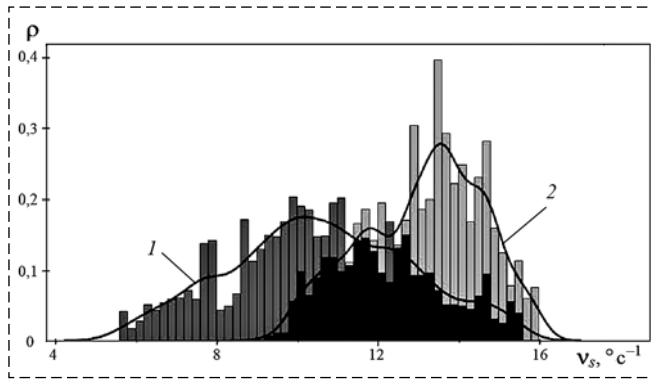


Рис. 5. Характерные распределения скоростей v_s медленных фаз нистагма, возникающего при оптокинетической стимуляции. Огибающие распределения скоростей медленных фаз нистагма после полета (1) и до полета (2)

Fig. 5. Characteristic velocity distributions of the slow phases of nystagmus that occurs during optokinetic stimulation. Nystagmus slow phases velocity distributions histogram envelope after flight (1) and before flight (2)

Таблица 5

Статистические характеристики скорости движения зрачка при окулографическом обследовании в ходе оптокинетического теста

Statistical characteristics of eye movement velocity in the optokinetic test

Параметр	Тест "полосы влево"		Тест "полосы вправо"	
	До	После	До	После
Скорость движения зрачка, град/с (соотв. пику распределения)	11,6	9,44	12,6	9,91
СКО, %с	2,35	1,94	2,20	2,39
Доля проб для которых отмечено снижение средней скорости	0,8		0,7	

Тем не менее, доля проб, в которых средняя скорость снижалась, значительна.

Уменьшение средней скорости после полета при предъявлении одинакового стимула означает уменьшение времени четкого видения, следовательно, и объема высоко детализированной зрительной информации. Этот вывод можно сделать из того, что для получения информации с фовеальной зоны сетчатки глаза необходимо стабилизировать изображение объекта. Следовательно, рассогласование скоростей должно быть минимально. При неизменной скорости оптокинетической стимуляции снижение средней скорости прослеживающих движений равносильно увеличению относительной скорости изображения объекта на сетчатке глаза.

Отмеченная закономерность может означать, что непривычная для человека композиция вестибулярных раздражителей, возникающая при движении летательного аппарата, значимо влияет на управление глазодвигательной системой.

Подведем итоги проведенных исследований. Изменение постурологических и окулографических параметров, порожденное летной нагрузкой, отличаются большой вариабельностью и очень индивидуальны. Выявить пробу и параметр, претерпевающий значимое изменение для любого человека, не удастся. На эффект от более аккуратного проведения проб и создания существенно более комфортных условий их проведения рассчитывать затруднительно. В этих условиях возможен путь проведения исследований большой группы добровольцев, испытывавших воздействие летной нагрузки.

Достаточно удачным представляется выбор проб оптокинетического теста. Значительная вероятность однонаправленного изменения ряда стабилметрических параметров в проведенных пробах, возможно, связана с тем, что эти пробы проводились после полета первыми. Тем не менее, эти изменения подкреплены также результатами окулографических исследований. Эффективными представляются также начальная фаза пробы с удержанием человеком равновесия на неустойчивом основании при закрытых глазах. Следует отметить, что наблюдаемое изменение параметров в этой пробе противоположно по направлению изменениям, вызванным адаптацией человека к непривычным условиям.

К параметрам, наиболее перспективным для оценки изменения функционального состояния человека за время полета, следует отнести среднюю скорость центра давления, показатель качества функции равновесия (КФР), изменение показателя Херста при переходе с твердого основания на пластину пенополиуретана. Значительный интерес представляет также средняя скорость слежения взора за подвижным изображением. Проведенные дополнительные наблюдения при проведении окулографических исследований показали, что информативность этого параметра может быть повышена в результате подбора скорости движения полос в оптокинетическом тесте.

Предполагается, что полученные результаты могут быть использованы для оценки качества симуляции полета с использованием тренажерных стендов.

Список литературы

1. Волошин Н. В., Михеев Ю. В. и др. Проведение исследований на КТС Ан-26Б, Ил-86 и др. для обоснования допусков воспроизведения эргономических характе-

ристик системы "летчик—самолет" в системе "летчик—тренажер". Отчет по НИР 1.01.02.151* НЭЦ АУВД, гос. рег. No 01860095154. М., 1988.

2. **Judy A. D.** A Study of Flight Simulation Training Time, Aircraft Training Time, and Pilot Competence as Measured by The Naval Standard Score: PhD. diss. Lakeland(USA). Southeastern University. 2018. 82 p. URL: <https://firescholars.seu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1021&context=coe> (дата обращения 15.03.2022)

3. **Руководство** по летной эксплуатации самолета Z-142. Воронеж, 2015. 81 с.

4. **Boril J., Jirgl M., Jalovecky R.** Use of Flight Simulators in Analyzing Pilot Behavior // IFIP Advances in Information and Communication Technology book series (IFIPAICT). 2016. Vol. 475. P. 255—263. DOI: 10.1007/978-3-319-44944-9_22.

5. **Сериков В. В., Юшкова О. И., Богданова В. Е.** и др. Оценка функционального состояния организма летчиков во время смоделированного полета на тренажере // Вестник ТвГУ. Серия: Биология и экология. 2020. № 1. С. 17—30.

6. **Жильцова И. И., Альжев Н. В.** Опыт применения компьютерной стабилотграфии для предполетного и послеполетного контроля функционального состояния организма летчиков // Военно медицинский журнал. 2020. № 12. С. 47—54.

7. **Переяслов Г. А., Слива С. С.** Методическое обеспечение стабилотанализатора "СТАБИЛАН—01" // Известия ТРТУ. 2002. Тематический выпуск: МИС-2002. С. 82—88.

8. **Chen X., Wang Q., Luo C.** et al. Increased functional dynamics in civil aviation pilots: Evidence from a neuroimaging study // PLOS ONE. 2020. V. 15, N. 6. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0234790> (дата обращения 15.03.2022).

9. **Kiroi V., Aslanyan E., Bakhtin O.** EEG Correlates of the Functional State of Pilots during Simulated Flights // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2016. Vol. 46, N. 4. P. 374—381.

10. **Feng Ch., Wanyan X., Yang K.** et al. A comprehensive prediction and evaluation method of pilot workload // Technology and health care: official journal of the European Society for Engineering and Medicine. 2018. Vol. 26, N.1. P. 1—14.

11. **Благинин А. А., Котов О. В., Жильцова И. И.** и др. Возможности компьютерной стабилотграфии в оценке функционального состояния организма оператора авиакосмического профиля // Военно медицинский журнал. 2016. № 8. С. 51—57

12. **Пальчун В. Т., Кунельская Н. Л., Горбушева И. А.** и др. Современные методы диагностики вестибулярных расстройств // Лечебное дело. 2006. № 1. С. 53—60.

13. **Лихачев С. А., Марьенко И. П.** СтатокINETическая характеристика вестибулярной дисфункции у пациентов

с васкулярной компрессией преддверно-улиткового нерва // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2015. № 7. С. 35—39.

14. **Руководство** пользователя "Стабилан-01-2": программно-методическое обеспечение компонент стабилотграфического комплекса Stabmed2. ЗАО "ОКБ "РИТМ", Таганрог, 2011. 279 с.

15. **Кручинин П. А.** Анализ результатов стабилотметрических тестов со ступенчатым воздействием с точки зрения механики управляемых систем // Биофизика. 2019. Т. 64, № 5. С. 1010—1020.

16. **Белополюский В. И.** Взор человека: механизмы, модели, функции. М.: Институт психологии РАН, 2007. 415 с.

17. **Якушев А. Г., Каспранская Г. Р., Сучалкина А. Ф., Штефанова О. Ю.** Математическое моделирование нистагма как механизма стабилизации взора при движении // Известия Института инженерной физики. 2009. № 14. С. 27—31.

18. **Скворцов Д. В.** Клинический анализ движений. Стабилотметрия. М.: АОЗТ "Антидор", 2000. 192 с.

19. **Доценко В. И., Усачев В. И.** Стабилотметрия в диагностике постуральных нарушений в клинической практике: векторный анализ статокINETизграммы // Реабилитация. 2018. № 2(17). С. 13—15.

20. **Кручинин П. А.** Механические модели в стабилотметрии // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18, № 2. С. 184—193.

21. **Mandelbrot B. B., Van Ness J. W.** Fractional Brownian motions, fractional noises and applications // SIAM Rev. 1968. Vol. 10. P. 422—437.

22. **Collins J. J., De Luca C. J.** Open-loop and closed-loop control of posture: A random walk analysis of center-of-pressure trajectories // Experimental Brain Research. 1993. Vol. 95(2). P. 308—318.

23. **Лях Ю. Е., Горшков О. Г., Гурьянов В. Г., Выхованец Ю. Г.** Моделирование механизмов саморегуляции вертикальной позы человека // Клин. информатика и телемедицина. 2011. № 8. С. 16—20.

24. **Schmittbuhl J., Vilotte J.-P., Roux S.** Reliability of self-affine measurements // Physical Review E. 1995. Vol. 51(1). P. 131—147.

25. **Муртазина Е. П.** Функциональные особенности выполнения стабилотграфических тестов у испытуемых с различными антропометрическими данными // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2009. № 9(98). С. 123—127.

26. **Шлыков В. Ю., Киреева Т. Б., Левик Ю. С.** Изменения стабилотграфических показателей у больных паркинсонизмом // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2008. № 6(83). С. 112—114.

Quantification of Changes in the Functional Status of a Person During the Aircraft Flight

P. A. Kruchinin, pkruich@mech.math.msu.su, **A. P. Kruchinina**, anna.kruchinina@math.msu.ru,
I. A. Kudryashov, Ilya.kudryashov.85@gmail.com, **A. A. Liubkevich**, antonlyu@mail.ru,
Ya. Yu. Minyaylo, minyailo_yana@mail.ru, **M. A. Podoprikhin**, podoprikhin.maxim@gmail.com,
V. A. Chertopolokhov, Psvr@vrmsu.ru,
Lomonosov Moscow State University, 119992, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: **Kruchinin P. A.**, PhD., Associate Professor, Faculty of Mechanics and Mathematics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119992, Russian Federation, e-mail: pkruich@mech.math.msu.su

Accepted on August 5, 2022

Abstract

The article is devoted to the approach to the quantitative estimation of changes in the functional state of a person during an airplane flight based on the results of stabilometric and oculographic examinations of airplane passengers carried out before and after the flight. Fourteen volunteers of both sexes participated in the study. They performed 21 pairs of pre-flight and post-flight examinations. For the existing sample of volunteers, parameters were identified that had

a consistent trend of change. These parameters include visual tracking quality and stabilometric characteristics. In 70 % probes a decrease in the slow phases of optokinetic nystagmus average speed was noted. In most volunteers, changes in the stabilometric parameters for the optokinetic test and the balance test on an unstable support in the form of foam plate are noticeable. The tracking speeds, the average velocity of the pressure center, and the quality index of the equilibrium function decreased after the flight in more than 70 % of all samples. It was noted that the Hurst index after the flight decreased compared to background sample, during get up on the polyurethane foam plate in the vast majority of volunteers. In test before the flight the change in this parameter was multidirectional. In a stabilometric test with a "stepped deviation", in which a volunteer on command made quick bends at a small angle due to a change in the angle in the ankle joint, 75 % of the subjects after the flights showed a decrease in the average speed.

Keywords: functional state of a person, flight load, posturology, stabilometry, optokinetic response, nystagmus, visual following, flight load.

Acknowledgements: The paper was prepared within the Program of creation and development of the world-class research center "Sverhzhvuk" in 2020—2025 under financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement № 075-15-2020-923).

The authors express special gratitude to the pilots and personnel of the Vkhrevo airfield.

For citation:

Kruchinin P. A., Kruchinina A. P., Kudryashov I. A., Liubkevich A. A., Minyaylo Ya. Yu., Podoprikhin M. A., Chertopolokhov V. A. Quantification of Changes in the Functional Status of a Person During the Aircraft Flight, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 12, pp. 651—660.

DOI: 10.17587/mau.23.651-660

References

1. Voloshin N. V., Mikheev Yu. V. et al. Conducting research on the An-26B, Il-86, etc. CTS to substantiate the tolerances for reproducing the ergonomic characteristics of the "pilot-aircraft" system in the "pilot-simulator" system, *Otchet po NIR 1.01.02.151* NEC AUVD*, reg. No 01860095154, Moscow, 1988 (in Russian).
2. Judy A. D. A Study of Flight Simulation Training Time, Aircraft Training Time, and Pilot Competence as Measured by The Naval Standard Score, PhD. diss. Lakeland(USA). Southeastern University, 2018, 82 p., available at: <https://firescholars.seu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1021&context=coe> (date of access 15.03.2022)
3. Aircraft flight manual Z-142, Voronezh, 2015, 81 p. (in Russian).
4. Boril J., Jirgl M., Jalovecky R. Use of Flight Simulators in Analyzing Pilot Behavior, *IFIP Advances in Information and Communication Technology book series (IFIPACT)*, 2016, vol. 475, pp. 255—263, DOI: 10.1007/978-3-319-44944-9_22.
5. Serikov V. V., Yushkova O. I., Bogdanova V. E. et al. Assessment of the functional state of the pilot organism during the simulated flight on the simulator, *Vestnik TvGU. Seriya: Biologiya i Ekologiya*, 2020, no.1, pp. 17—30 (in Russian).
6. Zhiltsova I. I., Alzhev N. V. Experience of using computer posturography for pre-flight and post-flight control of the functional state of the body of pilots, *Voenno medicinskiy zhurnal*, 2020, no. 12, pp. 47—54 (in Russian).
7. Pereyaslov G. A., Sliva S. S. Methodological support of the stabiloanalyzer "STABILAN — 01", *Izvestiya TRTU*, 2002, Thematic issue: MIS-2002, pp. 82—88 (in Russian).
8. Chen X., Wang Q., Luo C. et al. Increased functional dynamics in civil aviation pilots: Evidence from a neuroimaging study, *PLOS ONE*, 2020, vol. 15, no. 6, available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0234790> (date of the application 15.03.2022).
9. Kiroi V., Aslanyan E., Bakhtin O. EEG Correlates of the Functional State of Pilots during Simulated Flights, *Neuroscience and Behavioral Physiology*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 374—381.
10. Feng Ch., Wanyan X., Yang K. et al. A comprehensive prediction and evaluation method of pilot workload, *Technology and health care: official journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 1—14.
11. Blaginin A. A., Kotov O. V., Zhiltsova I. I. et al. Possibilities of computerstabilography as a part of evaluation of functional state of aerospace operator's organism, *Voenno medicinskiy zhurnal*, 2016, no. 8, pp. 51—57 (in Russian).
12. Pal'chun V. T., Kunel'skaya N. L., Gorbushova I. A. et al. Modern methods for diagnosing vestibular disorders, *Lechebnoe delo*, 2006, no. 1, pp. 53—60 (in Russian).
13. Likhachev S. A., Mar'enko I. P. Statokinetic characteristics of vestibular dysfunction in patients with vascular compression of the cochleo-vestibular nerve, *Zhurnal Nevrologii i psikiatrii imeni S. S. Korsakova*, 2015, no. 115(7), pp. 35—39 (in Russian).
14. User manual "Stabilan-01-2": software and methodological support for the components of the stabilographic complex, ZAO "OKB "RITM", Taganrog, 2011, 279 p. (in Russian).
15. Kruchinin P. A. Analysis of the results of stabilometric tests with a stepwise input action in the context of the mechanics of controlled systems, *Biophysics*, 2019, vol. 64, no. 5, pp. 818—827.
16. Belopolskii V. I. Human gaze: mechanisms, models, functions, Moscow, Institut psikhologii RAN, 2007, 415 p. (in Russian).
17. Yakushev A. G., Kaspranskaya G. R., Suchalkina A. F., Shtefanova O. Yu. Mathematical modeling of nystagmus as a mechanism of gaze stabilization during movement, *Izvesiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2009, no. 14, pp. 27—31 (in Russian).
18. Skvorcov D. V. Clinical analysis of movements, Stabilometry, Moscow, AOZT "Antidor", 2000, 192 p. (in Russian).
19. Docenko V. I., Usachev V. I. Stabilometry in the diagnosis of postural disorders in clinical practice: vector analysis of the statokinesigram, *Reabilitatsiya*, 2018, no. 2(17), pp. 13—15.
20. Kruchinin P. A. Mechanical models of stabilometry, *Russian Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 18, no. 2, pp. 184—193.
21. Mandelbrot B. B., Van Ness J. W. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications, *SIAM Rev.*, 1968, vol. 10, pp. 422—437.
22. Collins J. J., De Luca C. J. Open-loop and closed-loop control of posture: A random walk analysis of center-of-pressure trajectories, *Experimental Brain Research*, 1993, vol. 95(2), pp. 308—318.
23. Liakh Yu. E., Gorshkov O. G., Gurianov V. G., Vikhovnets Yu. G. Modeling the mechanisms of self-regulation of the vertical posture of a person, *Klinicheskaya informatika i telemedicine*, 2011, no. 8, pp. 16—20 (in Russian).
24. Schmittbuhl J., Vilotte J.-P., Roux S. Reliability of self-affine measurements, *Physical Review E*, 1995, vol. 51(1), pp. 131—147.
25. Murtasina E. P. Functional features of performing stabilographic tests in subjects with different anthropometric data, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 9(98), pp. 123—127 (in Russian).
26. Shlikov V. Yu., Kireeva T. B., Levik Yu. S. Changes in stabilographic parameters in patients with parkinsonism, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2008, no. 6(83), pp. 112—114 (in Russian).