

ОЦЕНКА НАВЫКОВ ПИЛОТИРОВАНИЯ И ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕТНОГО СОСТАВА ПО ДАННЫМ ВИДЕООКУЛОГРАФИИ

Л.С. Куравский, Г.А. Юрьев, О.Б. Беляева,

О.Ю. Прокопьева (Московский государственный психолого-педагогический университет)

Представлено описание концепции диагностики летного состава по результатам работы на авиационных тренажерах. Применяемый подход основан на представлении движения взгляда пилота с помощью марковского процесса с непрерывным временем. Рассматриваются процедуры идентификации прогнозирующей модели, оценки степени адекватности модели наблюдениям и способы построения классификатора, позволяющего количественно оценивать близость испытуемых к эталонам, относящимся к различным диагностируемым группам.

Ключевые слова: видеоокулография, марковская модель, многофакторная сеть Маркова, диагностика, авиационный тренажер, факторный анализ.

Введение

В настоящее время системы компьютеризированной диагностики успешно применяются при профессиональном отборе и мониторинге для оценки уровня сформированности знаний, умений и навыков, а также психофизиологического состояния. Их применение способствует повышению объективности, информативности и точности оценок, а также стандартизации и автоматизации измерений. Важнейшей задачей, подходам к решению которой посвящена данная работа, является создание подобных систем для авиационных приложений. Особенно актуальны разработка и исследование новых подходов, применяемых для оценки уровня подготовки летного состава по результатам работы на современных авиационных тренажерах, где отрабатываются действия в особых условиях полета.

Существующие в этой области диагностические средства, как правило, анализируют итоговые результаты деятельности, не учитывая характеристик самой деятельности, и дают достаточно грубые оценки, основанные на искусственных критериях. Помимо этого недостатка проблемная ситуация обусловлена отсутствием эффективных математических моделей и методов, позволяющих осуществлять диагностическую оценку, и недостаточной надежностью оценок, получаемых с помощью классических методов тестирования знаний и навыков.

Одним из перспективных подходов, позволяющих добиться прогресса в области создания систем компьютеризированной диагностики и преодолеть часть указанных проблем, является использование данных видеоокулографии. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о наличии факторов, существенно влияющих на изменчивость показателей глазодвигательной активности в рамках фиксированного стимульного материала и определяющих пространственно-временные особенности траекторий взгляда в гомогенных (по уровню выраженности фактора) группах испытуемых [1]. К настоящему времени выявлен достаточно представительный список показателей такого рода, в которых проявляются значимые различия для диагностируемых категорий испытуемых [2].

Анализ накопленных авторами наблюдений выявил, что характеристики традиционных составляющих процесса визуального восприятия, таких как фиксации («неподвижные» состояния глаз), саккады (быстрые согласованные движения глаз, обеспечивающие переключение визуального внимания между точками фиксации) и др., могут быть недостаточны для построения эффективных формализованных процедур диагностики, несмотря на то, что они представляют значительный интерес для фундаментальных исследований и являются основой для многих производных комплексных показателей глазодвигательной активности, включая карты распределения внимания («тепловые карты»). Для успешного решения задачи диагностики представляется целесообразным использование многомерных моделей представления объекта анализа, учитывающих динамические свойства процесса, а также показателей, основанных на параметрах этих моделей, идентифицированных для различных групп испытуемых.

Один из вариантов такого решения представлен в данной работе, где рассмотрены:

- концепция диагностики летного состава по результатам работы на авиационных тренажерах, основанная на представлении движения взгляда пилота с помощью случайного марковского процесса с непрерывным временем;
- процедура идентификации и оценки адекватности прогнозирующих моделей;
- способы построения классификатора, позволяющего оценивать степень соответствия характеристик глазодвигательной активности испытуемых эталонам, относящимся к различным диагностируемым группам;
- интегральные количественные диагностические показатели, позволяющие строить итоговый критерий для оценки летной квалификации по серии контрольных упражнений.

Подробное математическое обоснование основ разработанного подхода дано в статьях [5, 7, 9].

В рамках деятельностного и системного подходов [3], принятых в современной отечественной психологии, следует регистрировать и оценивать следующие характеристики, составляющие так называемую модель деятельности:



Рис. 1. Учебно-тренировочный комплекс вертолета Ми-8 МТВ-1

– данные видеоокулографии (форма объективной, оперативной оценки состояния субъекта деятельности),

– параметры воздействия на органы управления летательного аппарата (ЛА) (действенная составляющая модели деятельности),

– параметры движения ЛА, полученные в результате воздействий на его органы управления (результат деятельности, формирующий «оперативный образ» объекта деятельности).

Очевидно, что последние два компонента данной модели требуют проведения экспериментов с нереальным объемом финансовых и организационных затрат. Кроме того, отсутствуют приемлемые модели и критерии для оценки как корректности воздействий на органы управления ЛА, так и параметров его движения. Единственным формальным нормативом, имеющим юридическую силу, является Руководство по летной эксплуатации, которое фиксирует только допустимые диапазоны параметров для различных режимов полета и не может обеспечить релевантную оценку навыков пилотирования и тем более психофизиологического состояния. В результате сложилась практика, согласно которой такие оценки носят экспертный характер и обеспечиваются пилотом-инструктором. Поэтому оценки воздействий на органы управления ЛА и корректности параметров его движения, используемые при моделировании деятельности пилотов, целесообразно заменять соответствующими экспертными заключениями, что и сделано в данной работе. Это существенно снижает уровень затрат на проведение экспериментов, упрощает указанную модель и в целом делает решаемой поставленную задачу.

Другим аргументом в пользу указанного выше подхода является то, что создание моделей и критериев для оценки воздействий на органы управления ЛА и параметров его движения есть задача, намного более сложная, чем исходная. Поэтому использование модели деятельности без упрощений, связанных с экспертными заключениями, приводит к замене относительно простой задачи более сложной и заводит решение в тупик.

Важно отметить, что под диагностикой летного состава в этой работе понимается исключительно выяв-

ление окулографических маркеров (изменения зрительно-моторных реакций на визуальные раздражители, характерные для ситуации, группы субъектов либо психофизиологического состояния), свидетельствующих о недостатке необходимых навыков пилотирования или неблагоприятном психофизиологическом состоянии. Более широко задача не ставится.

В статье представлены результаты экспериментов, которые проводились в авиационном учебном центре в г. Пушкино (Московская обл.) силами специалистов факультета информационных технологий Московского государственного психолого-педагогического университета, центра экспериментальной психологии того же университета, учебного центра ФБУ «Авиалесохрана», авиакомпании «ЛУКОЙЛ-АВИА» и ООО «Русское авиационное общество». Эксперименты проводились на базе учебно-тренировочного комплекса вертолета Ми-8 МТВ-1, обеспечивающего полный цикл подготовки летного состава и включающего комплексный тренажер, автоматизированную систему обучения, комплекс моделирования тактической обстановки и рабочее место системы объективного контроля (рис. 1). Контрольные упражнения (всего пять упражнений Е1-Е5 для каждого экипажа) выполняли экипажи вертолетов ООО «ЛУКОЙЛ-АВИА» с различными уровнями летной подготовки. Несмотря на относительно небольшое число экипажей, участвовавших в исследованиях, полученные результаты позволяют сделать полезные для практики и значимые в научном отношении выводы, приведенные в последующих разделах этой работы.

Диагностический критерий на основе вероятностных моделей и оценок правдоподобия

Постановка задачи диагностики и этапы ее решения

Полагается, что экипаж ЛА выполняет на авиационном тренажере определенное контрольное задание. При этом известна принадлежность экипажей к группам (категориям), отражающим уровень летной подготовки. Для каждой из этих групп доступна соответствующая выборка наблюдаемых траекторий движения взора командира воздушного судна (КВС) по поверхности приборной доски и окну кабины, фиксируемых через равные временные интервалы средствами видеоокулографии, ставится задача распознавания группы, к которой принадлежит вновь наблюдаемый экипаж. Полагается, что все члены экипажа в той или иной форме обеспечивают работу КВС, и его действия содержат достаточно информации для того, чтобы судить об уровне подготовки экипажа в целом. Классификация в указанной по-

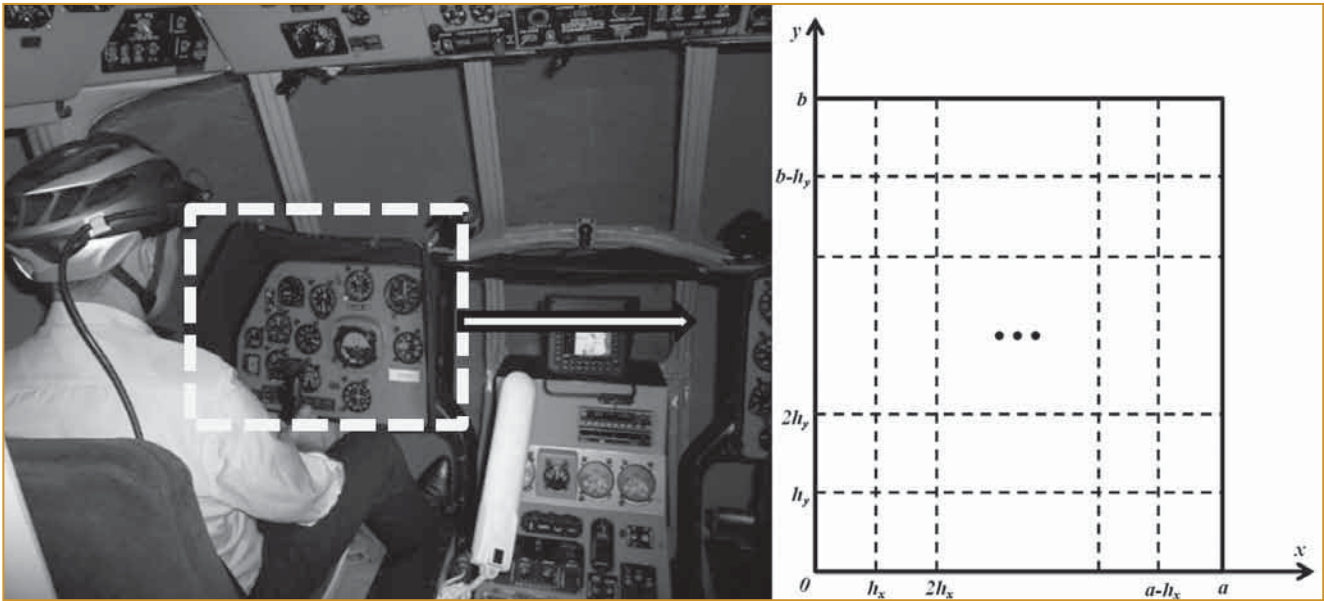


Рис. 2. Дискретизация области движений взгляда прямоугольной сеткой

становке обеспечивается решением рассмотренных далее следующих подзадач:

- разделение области движений взгляда, включающей поверхность приборной доски и окна кабины, на ячейки прямоугольной сетки (рис. 2), каждой из которых ставится в соответствие свое состояние марковской модели, в котором взор КВС может находиться с некоторой вероятностью, переходя из одного состояния в другое по определенным правилам;
- расчет выборочных частот пребывания в состояниях марковской модели по выборке траекторий дви-

жения взгляда КВС для каждой диагностируемой группы экипажей в заданные моменты времени;

- идентификация (аппроксимация) временной динамики распределений вероятностей пребывания в состояниях марковской модели по полученным выборочным частотам для всех диагностируемых групп экипажей;
- расчет и сравнение вероятностных оценок правдоподобия наблюдаемой траектории движения взгляда КВС, зарегистрированной для неидентифицированного экипажа, для каждой из заданных диагностируемых групп;

– выбор наиболее правдоподобной группы экипажей и оценки надежности принятого решения.

Для описания динамики вероятностей пребывания взгляда в заданных дискретных состояниях применяются двумерные сети Маркова [6,7]. По результатам накопленных наблюдений проводится прогнозирование указанных вероятностей с использованием параметрических математических моделей, описываемых марковскими случайными процессами с дискретными состояниями и непрерывным временем [10]. Марковская модель для описания динамики переходов между состояниями процесса представляется ориентированным графом, в котором вершины соответствуют состояниям, а дуги – возможным переходам между выделенными состояниями (рис. 3). Процесс переходов между состояниями может рассматриваться как случайное блуждание по гра-

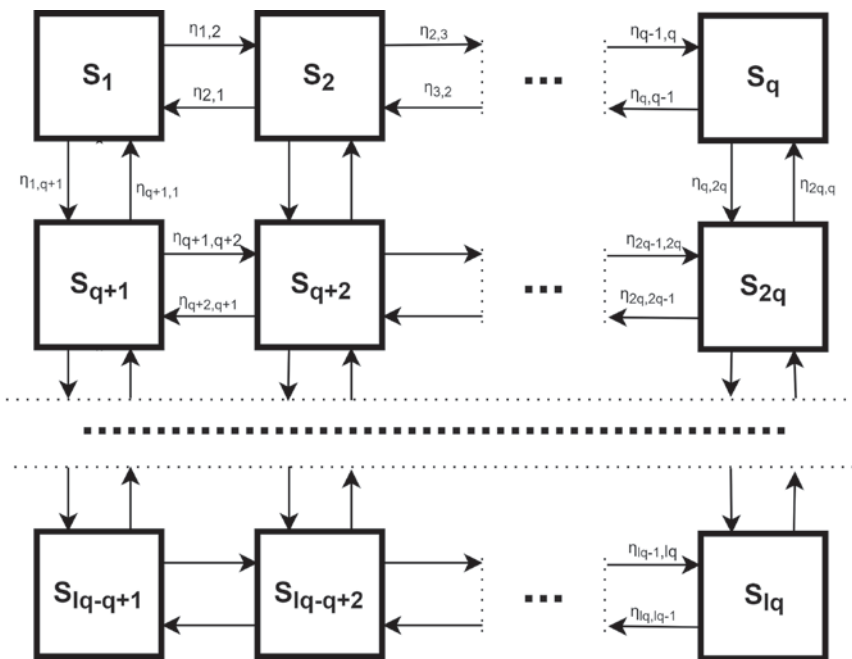


Рис. 3. Граф дискретных состояний, аппроксимирующий случайный процесс перемещения взгляда в области его движений, соответствующий проведенной дискретизации

фу из одного состояния в другое согласно направлениям дуг. Переходы между состояниями мгновенны и происходят в случайные моменты времени.

Разделение области движений взора и построение модели

Пусть движение взора по поверхности приборной доски и окну кабины описывается векторной непрерывной случайной функцией времени $U(t)=(U_1(t), U_2(t))$, где $t \in T$. Плотность вероятности $p(u, t)$, характеризующая распределение значений функции $U(t)$, определяется при этом как $p(u, t)du = P\{u \leq U(t) < u + du\}$, где $u=(u_1, u_2)=(x, y)$, а du — элемент площади в R^2 .

Будем полагать, что рассматриваемая случайная функция принадлежит к достаточно общему классу *марковских процессов или процессов без последствия*, для которых в любые моменты времени $t_0 < t_1 < \dots < t_m$ выполняется условие $p(u_m, t_m | u_{m-1}, t_{m-1}; \dots; u_0, t_0) = p(u_m, t_m | u_{m-1}, t_{m-1})$. Такие процессы полностью определяются начальным распределением $p(u_0, t_0)$ и распределением *переходных вероятностей* $p(u, t | u_0, t_0)$. Это распределение в случае непрерывных процессов удовлетворяет уравнению *Фоккера-Планка-Колмогорова*:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \sum_{j=1}^2 \frac{\partial}{\partial u_j} (a_j p) + \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \frac{\partial^2}{\partial u_j \partial u_k} (b_{jk} p),$$

с начальным условием $p(u, t | u_0, t_0) |_{t=t_0} = \delta(u - u_0)$. Функции $a_j(u, t)$ и $b_{jk}(u, t)$ представляют интенсивности рассматриваемых марковских процессов.

Показано [5], что поиск приближенного решения уравнения *Фоккера-Планка-Колмогорова* сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно плотности вероятности пребывания взора по дискретизованной области движений взора, усредненной по площади ячеек. Если, умножив каждую усредненную плотность вероятности на площадь ячейки, рассматривать каждую ячейку прямоугольной сетки размерностью $l \times q$ как отдельное *дискретное состояние случайного процесса с непрерывным временем*, то данная система уравнений превратится в *систему уравнений Колмогорова*, описывающую динамику изменения вероятностей пребывания взора испытуемого в указанных состояниях. Каждому состоянию с номером n при этом ставится в соответствие уравнение

$$\frac{d \tilde{p}^n(t)}{dt} = - \sum_j \eta_{nj}(t) \tilde{p}^n(t) + \sum_i \eta_{in}(t) \tilde{p}^i(t),$$

где $\tilde{p}^n(t) = \tilde{p}^n(t)G$ и $\tilde{p}^i(t) = \tilde{p}^i(t)G$ — вероятности пребывания в n -м и i -м состояниях; G — площадь ячейки прямоугольной сетки; η_{ni} — интенсивность переходов из состояния n в состояние i ; η_{in} — интенсивность переходов из состояния i в состояние n .

Следуя представленному методу решения диагностической задачи, необходимо, используя данные наблюдений, решить подзадачу идентификации распределений вероятности пребывания взора в ячейках дискретизованной области движения взора для всех диагностируемых групп экипажей.

Неграмотными людьми 21 века будут не те, кто не умеет читать и писать, а те, кто не умеет учиться и переучиваться.

Алвин Тоффлер

Идентификация модели: критерий минимума χ^2

Аппроксимация этих распределений с учетом введенной дискретизации сводится к оценке свободных параметров модели — интенсивностей переходов между состояниями рассматриваемого случайного процесса $\{\eta_{ij}\}_{i,j=1,\dots,M}$. Для решения задачи идентификации выполняется численная процедура многомерной нелинейной оптимизации, обеспечивающая решение обратной задачи для системы дифференциальных уравнений Колмогорова. В результате ее решения находится набор свободных параметров, который определяет систему уравнений, решение которой обладает заданными характеристиками (вероятностные функции времени, аппроксимирующие наблюдаемую динамику вероятностей пребывания взора в ячейках дискретизованной области).

Оценки свободных параметров (интенсивностей переходов) могут быть определены, опираясь на *критерий соответствия наблюдаемых и прогнозируемых гистограмм*, описывающих распределения частот пребывания в состояниях процесса. В качестве такого критерия далее используется *статистика Пирсона*:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^M \frac{(F_i - \tilde{p}^i(t)N)^2}{\tilde{p}^i(t)N},$$

где $\tilde{p}^i(t)N$ — прогнозируемая частота попадания в i -е состояние в момент времени t , N — число элементов (испытуемых) в выборке, а вероятностные функции получаются $\tilde{p}^i(t)$ путем численного интегрирования систем уравнений Колмогорова. Соответствующие наблюдаемые частоты F_i определяются как число испытуемых, взор которых в заданные контрольные моменты времени пребывал в соответствующих ячейках дискретизованной области.

Величина χ^2 является мерой соответствия в том смысле, что ее большие значения означают плохое согласование прогнозируемых и наблюдаемых результатов, а малые значения — хорошее согласование. Таким образом, решение задачи идентификации сводится к нахождению таких интенсивностей переходов η_{ij} , которые обеспечивают минимальное значение суммы статистик Пирсона в те контрольные моменты времени, для которых имеются результаты наблюдений.

Такой способ идентификации свободных параметров называется *методом минимума χ^2* . Согласно теореме Крамера, при выполнении ряда общих условий, в случае адекватности модели случайного процесса наблюдениям, рассмотренная задача идентификации имеет единственное решение, которое сходится по вероятности к искомому решению, а значения

статистики χ^2 , асимптотически описываются распределением χ^2 с $M-\gamma-1$ степенями свободы, где γ — число определяемых значений свободных параметров. Знание распределения позволяет использовать приведенную выше статистику для проверки гипотезы о том, что полученные прогнозируемые частоты попадания в состояния согласуются с результатами наблюдений.

Очевидно, что использование этой статистики корректно только при выполнении условий указанной выше теоремы. Если условия теоремы не выполнены, то вычисление приближений к оценкам максимального правдоподобия с использованием критерия χ^2 остается возможным, однако полученное решение может быть не единственным, а значения соответствующей статистики не обязаны быть распределены как χ^2 . Следует отметить, что одним из признаков нарушения условий теоремы является невыполнение неравенства $M > \gamma - 1$.

Идентификация свободных параметров случайных процессов со структурой связей между состояниями, представленной на рис. 3, рассмотрена в работах [4].

Результаты экспериментов

Запись движений глаз проводилась с помощью мобильной системы регистрации движений глаз *SMI iView X HED* в монокулярном режиме с частотой 50 Гц. Регистрирующие компоненты этой системы фиксировались на голове КВС и не стесняли движений. Регистрация данных проводилась без фиксации головы пилота. Калибровка выполнялась стандартным способом с использованием пяти опорных точек на приборной доске. Наблюдаемая сцена фиксировалась с помощью фронтальной видеокamеры.

Распределения вероятностей пребывания взора представлены для одних и тех же трех контрольных моментов времени. Поскольку траектории движения взора привязаны к одному и тому же фиксированному фону, а в процессе регистрации этих траекторий пилот поворачивал голову, то появились определенные незначительные (краткосрочные) смещения положений взора от областей приборной доски и стекла кабины, на которые действительно смотрел пилот. Эти смещения не влияют на результаты обработки данных, так как анализ движений взора проводится единообразно для всех экипажей в одной и той же системе координат, определяемой наблюдаемой испытуемым областью, без привязки данных к конкретным элементам приборной доски. При необходимости анализировать получаемые данные в какой-либо внешней системе координат (например, конкретной плоскости на приборной доске) предполагается наличие существенных искажений, связанных с постоянными вынужденными движениями головы испытуемого, рекомендуется:

- использовать аппаратно-программный комплекс для видеорегистрации движений глаз, отслеживающий положение головы испытуемого и вносящий поправки в регистрируемые данные, соответствующие

степени отклонения головы от позиции, в которой производилась калибровка оборудования;

- выполнять дополнительную обработку данных, предусматривающую распознавание в видеоряде фронтальной камеры положения специальных маркеров или неизменных элементов сцены и последующую коррекцию фиксируемых позиций взора.

Классификация траекторий на основе оценок правдоподобия

Получив, как показано выше, аппроксимации распределений вероятностей пребывания взора в ячейках дискретизированной области для различных групп испытуемых $\omega \in \Omega$, можно определять вероятностные оценки принадлежности к заданным категориям ранее неидентифицированных лиц. При решении этой задачи для каждого такого лица следует зарегистрировать траекторию движения взора по поверхности приборной доски и окну кабины $U(t)$ и, используя заранее известные аппроксимации $\widehat{p}_w(u, t | u_0, t_0)$ указанных распределений, определить оценки правдоподобия P_ω прохождения наблюдаемых траекторий. В общем случае для каждой категории ω при этом вычисляется криволинейный интеграл 1-го рода:

$$P_\omega = \int_{U(t)} \widehat{p}_w(u, t | u_0, t_0) du,$$

где du — бесконечно малый элемент длины траектории $U(t)$. Испытуемый относится к категории ω_{max} с наибольшей вероятностной оценкой:

$$P_{\omega_{max}} = \max_{\omega \in \Omega} P_\omega.$$

На практике приведенные выше интегралы для вычисления P_ω заменяются своими численными оценками.

Диагностический критерий на основе вероятностных моделей и интегральных оценок их параметров

Как указано во введении, анализ простейших показателей окулomotorной активности, связанных с саккадами и фиксациями, а также карт распределения внимания («тепловых карт») в их традиционной форме, как и многих других характеристик, распространенных в айтрекинг-исследованиях, может не дать надежной дифференциации, необходимой для построения диагностических оценок. Подход, использующий зависящие от времени вероятностные распределения позиции взора и оценки правдоподобия, рассмотренный выше, такую дифференциацию обеспечивает, однако требует накопления значительного объема экспериментальных данных, необходимых для надежной идентификации параметров распределений, что затрудняет его практическое применение.

Представим новый подход, опирающийся на интегральные оценки параметров рассмотренных ранее вероятностных моделей. Его преимуществами являются:

- отсутствие жесткой привязки к пространственному расположению приборов, находящихся в поле

зрения пилота, и соответственно, к типу летательного аппарата;

- меньший объем экспериментальных данных, необходимых для корректной диагностики;
- невысокие требования к точности регистрации траектории движения взора, что существенно при проведении экспериментов и диагностических процедур в «полевых» условиях.

Основными диагностическими характеристиками являются идентифицированные оценки наибольших интенсивностей переходов между состояниями двумерных марковских моделей, рассмотренных в предыдущем разделе, в вертикальном и горизонтальном направлениях. Этот выбор обусловлен:

- выявленными в результате экспериментов зависимостями продолжительностей и частот фиксаций взора от опыта испытуемых в решении поставленной задачи и наличия у них затруднений при переработке информации;
- зависимостями продолжительности, скорости и частоты саккад от присутствия психиатрических

и нейрофизиологических расстройств у испытуемых и приема ими медикаментов и алкоголя.

Поскольку область движения взора, охватывающая приборную доску и стекло кабины, ограничена, то интенсивности переходов «вправо-влево» и «вверх-вниз» должны иметь, как правило, сопоставимые наибольшие интенсивности переходов между состояниями в противоположных направлениях, что подтверждается результатами обработки полученных данных. В противном случае взор сместится на границу данной области, что в экспериментах не наблюдалось. Таким образом, направление, соответствующее наибольшей интенсивности переходов, существенного значения не имеет.

Связь указанной характеристики со степенью сформированности навыков пилотирования и психофизиологическим состоянием пилотов очевидна, поскольку неудовлетворительные показатели, обусловленные указанными факторами, приводят к увеличению продолжительности фиксаций взора на приборах, затруднениям в переработке считыва-

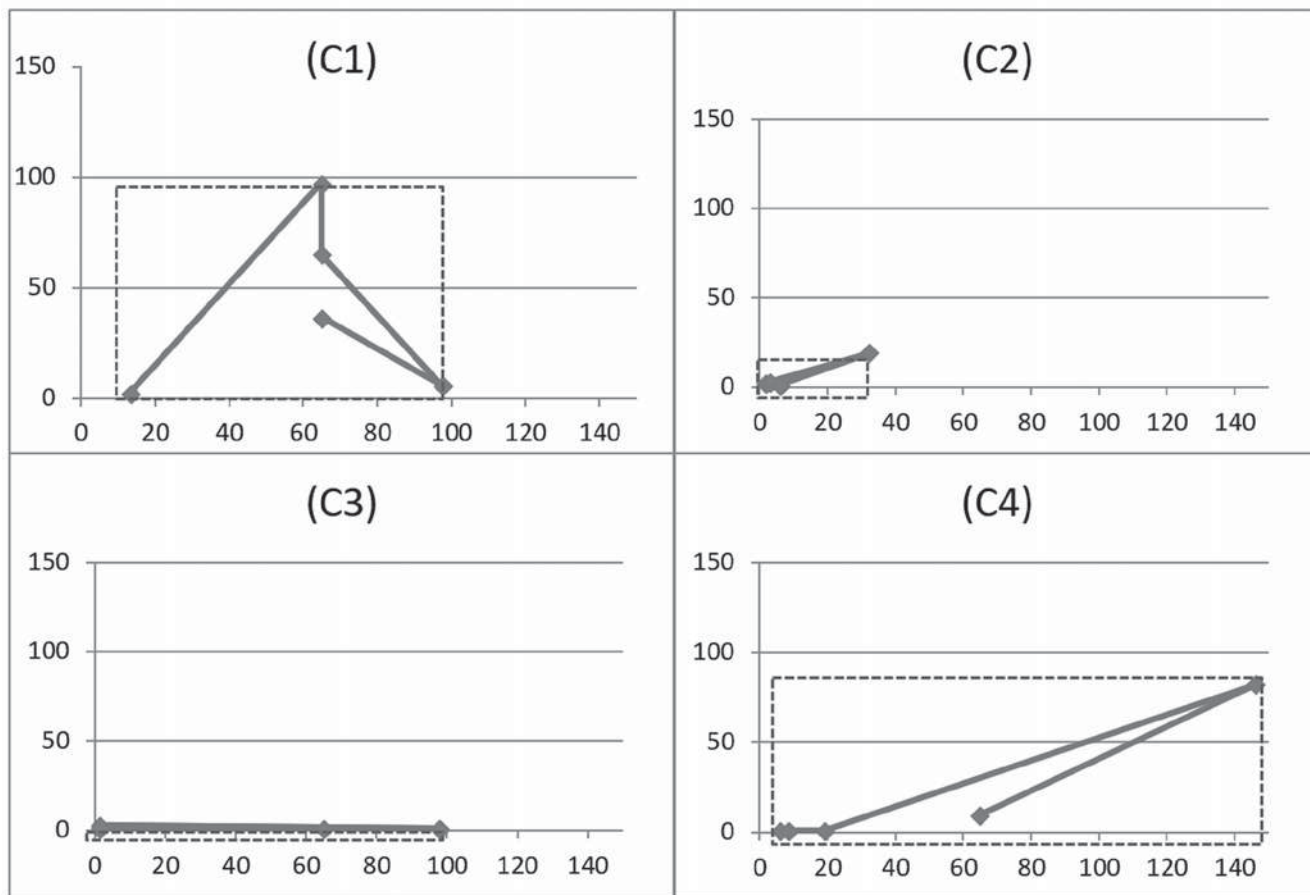


Рис. 4. Наибольшие интенсивности переходов между состояниями двумерных марковских моделей в вертикальном и горизонтальном направлениях, соответствующие пяти контрольным временным периодам наблюдений при выполнении летного упражнения Е5 для четырех экипажей разной квалификации. Каждый период наблюдений представлен точкой, координаты которой вдоль осей абсцисс и ординат представляют интенсивности переходов в вертикальном и горизонтальном направлениях, соответственно. Экипажи (С2) и (С3) имеют высокую летную квалификацию, а экипажи (С1) и (С4) – среднюю летную квалификацию. Площади обозначенных пунктиром прямоугольников, в которые вписаны ломаные, представляют значения интегрального показателя, применяющегося для оценки степени подготовленности экипажей

емой с них информации и увеличению продолжительности саккад [2]. Учитывая быстро изменяющуюся окружающую обстановку, неподготовленный пилот вынужден, не получив и не осмыслив должным образом необходимые данные с одного прибора или объекта за стеклом кабины, переводить взгляд на другой прибор или внешний объект, а затем возвращаться обратно, чтобы продолжить считывание и обработку недополученной информации. Такой «возвратный» характер движения взгляда очевидным образом способствует увеличению интенсивностей переходов между состояниями представленных выше марковских моделей.

Как показали расчеты, использование усредненных интенсивностей переходов между состояниями рассматриваемых моделей в качестве основных диагностических характеристик также является допустимым, однако этот подход приводит к существенно худшей дифференциации между экипажами разной квалификации и поэтому далее не применяется.

На рис. 4 представлены диаграммы, показывающие соотношения наибольших интенсивностей переходов между состояниями двумерных марковских моделей в вертикальном и горизонтальном направлениях, соответствующих пяти контрольным временным периодам наблюдений. Данные, на основе которых построены оценки этих характеристик, получены при выполнении летного упражнения E5 (заход ночью по приборам на посадку) для четырех экипажей разной квалификации, принимавших участие в экспериментах. Диаграммы демонстрируют очевидную тенденцию к уменьшению приведенных интенсивностей с повышением уровня квалификации экипажа.

Поскольку вертикальное и горизонтальное направления практически равноценны при принятии диагностических решений, соответствующие им наибольшие интенсивности переходов целесообразно преобразовать в единый интегральный показатель, удобный для формулировки правила, разделяющего подготовленные и неподготовленные экипажи. Проведенные вычислительные эксперименты с различными видами комбинаций указанных величин выявили, что наибольшую дифференциацию обеспечивает произведение наибольших интенсивностей переходов в вертикальном и горизонтальном направлениях. Графически эта характеристика представляется площадями прямоугольников, в которые вписаны ломаные, приведенные на рис. 4. Значения этой величины для различных экипажей и контрольных летных упражнений в сопоставлении показаны на рис. 5. Как видно из рис. 5, упражнение E5 обеспечивает наиболее надежную дифференциацию экипажей по уровню их летной квалификации.

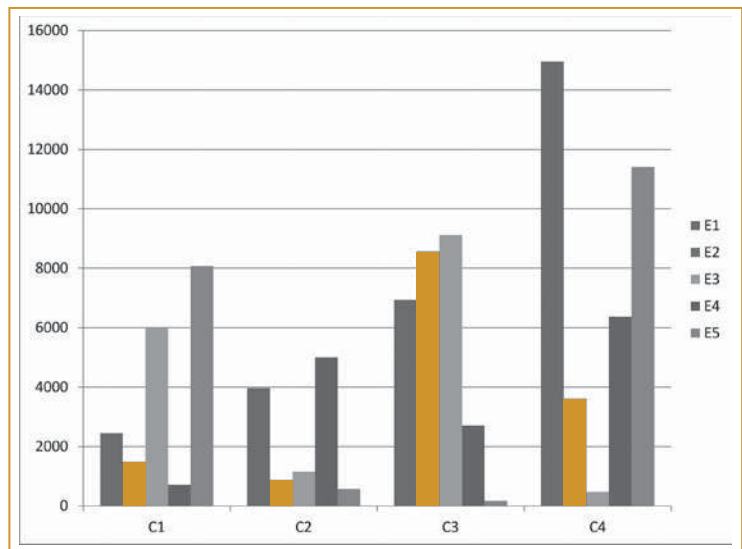


Рис. 5. Значения интегрального показателя для оценки степени подготовленности экипажей C1-C4 при выполнении контрольных упражнений E1-E5

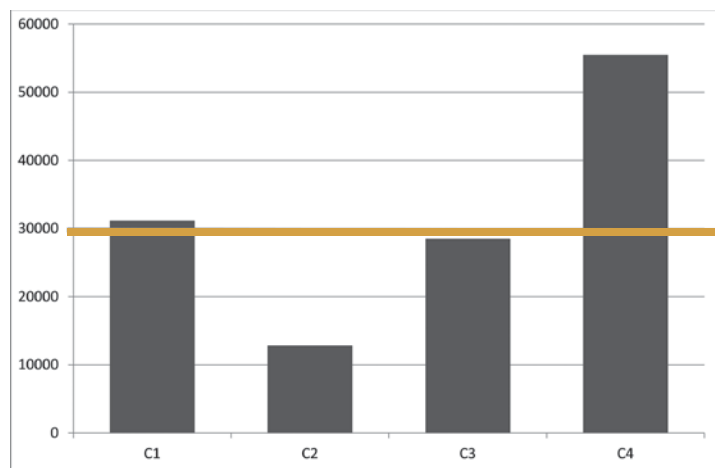


Рис. 6. Значения итогового показателя K_{Σ} по серии упражнений E1-E5 ($\omega_1 = 1,1$; $\omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 1$; $\omega_5 = 2,5$)

Учитывая разную значимость выполненных контрольных упражнений для оценки летной квалификации, целесообразно построить сумму соответствующих этим упражнениям интегральных показателей K_i , умноженных на выявленные путем экспертных оценок эмпирические весовые коэффициенты ω_i , и использовать для оценки летной квалификации пороговые значения полученного итогового критерия K_{Σ} по серии упражнений:

$$K_{\Sigma} = \sum_i \omega_i K_i.$$

В качестве примера, значения итогового критерия K_{Σ} по серии упражнений E1-E5 приведены на рис. 6. Альтернативой оценке летной квалификации на основе итогового показателя K_{Σ} является классификация экипажей с помощью вероятностных нейронных сетей.

На вход распознающей сети подаются упорядоченные наборы наибольших интенсивностей пере-

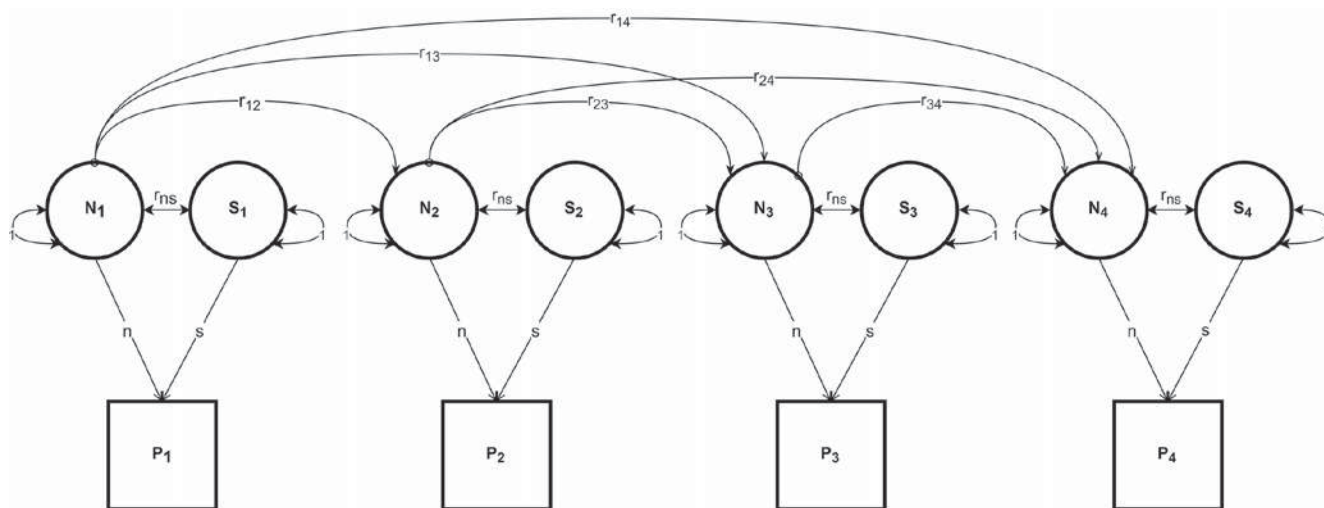


Рис. 7. Факторная модель, учитывающая: влияния навыков пилотирования (представлены факторами N_1, N_2, N_3 и N_4) и влияния психофизиологического состояния пилотов и ошибок измерений (представлены совместно факторами S_1, S_2, S_3 и S_4) на оценки наибольших интенсивностей переходов между состояниями марковских моделей, идентифицированные для каждого из исследуемых экипажей в одни и те же временные периоды (представлены наблюдаемыми переменными P_1, P_2, P_3 и P_4). Свободными (идентифицируемыми) параметрами факторных моделей являются нагрузки факторов на наблюдаемые переменные (n, s) и коэффициенты корреляции между факторами ($r_{ns}, r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{23}, r_{24}, r_{34}$)

ходов между состояниями марковских моделей в вертикальном и горизонтальном направлениях для заданных контрольных временных периодов наблюдений. Каждому обучающему наблюдению во внутреннем слое сети соответствует один элемент на радиальных базисных функциях (радиальный элемент), функция активации которого представляет собой функцию Гаусса с центром в данном наблюдении.

Каждой распознаваемой группе экипажей соответствует свой элемент в выходном слое, соединенный со всеми радиальными элементами, относящимися к этой группе и не имеющий соединения с остальными радиальными элементами. Указанный выходной элемент складывает выходные сигналы всех элементов, принадлежащих его группе. Значения выходных сигналов элементов последнего слоя считаются пропорциональными вероятностям принадлежности соответствующим группам. После их нормировки получаются окончательные оценки вероятностей принадлежности заданным группам.

Число элементов во внутреннем слое определяется числом наблюдений, а число элементов в выходном слое — числом распознаваемых групп. Вероятностная нейронная сеть не требует обучения и может динамически пополняться новыми радиальными элементами по мере накопления наблюдений. Этот тип нейронных сетей позволяет обеспечить решение задачи классификации при предельно малых объемах наблюдений. Если накопленные данные репрезентативны, то надежность распознавания возрастает с ростом их числа.

Как правило, целесообразно иметь свою распознающую вероятностную нейронную сеть для каждого контрольного упражнения.

В целом, представленные в этом разделе экспериментальные и расчетные результаты позволяют

говорить об эффективности рассмотренного подхода и возможности построения на его основе автоматизированных диагностических средств оценки уровня подготовки летного состава по результатам работы на авиационных тренажерах.

Оценка баланса влияния навыков пилотирования и психофизиологического состояния экипажа на исследуемые характеристики

Для оценки баланса влияния навыков пилотирования и психофизиологического состояния экипажа на исследуемые характеристики применен факторный анализ [8]. В факторной модели, представленной в виде путевой диаграммы на рис. 8, учитываются факторы влияния навыков пилотирования, психофизиологического состояния пилотов, а также ошибки измерений. В качестве наблюдаемых переменных используются рассмотренные выше оценки наибольших интенсивностей переходов между состояниями двумерных марковских моделей, идентифицированные для каждого из исследуемых экипажей в одни и те же временные периоды. Данная модель не предполагает статистических зависимостей между совместными факторами, представляющими влияния психофизиологического состояния пилотов и ошибок измерений для разных экипажей.

При идентификации свободных параметров факторной модели методом максимального правдоподобия в качестве минимизируемого критерия используется статистика:

$$F = [\ln|\Sigma| - \ln|S| + \text{tr}(S\Sigma^{-1}) - q](N-1),$$

где S — выборочная ковариационная матрица наблюдаемых переменных, Σ — прогнозируемая кова-

риационная матрица наблюдаемых переменных, $|\Sigma|$ и $|\mathbf{S}|$ — определители матриц Σ и \mathbf{S} , $tr(\mathbf{S}\Sigma^{-1})$ — след матрицы $(\mathbf{S}\Sigma^{-1})$, N — объем выборки, использованной для вычисления матрицы \mathbf{S} , q — число наблюдаемых переменных. Элементы прогнозируемой ковариационной матрицы представляют собой аналитические выражения относительно свободных параметров и имеют следующий вид ($i, j = 1, 2, 3, 4$):

$$Var(P_i) = n^2 + s^2 + 2r_{ns}ns,$$

$$Cov(P_i, P_j) = r_{ij}n^2.$$

В предположении о многомерном нормальном распределении рассматриваемых наблюдаемых переменных, значения критерия F описываются распределением χ^2 .

Для идентификации свободных параметров необходимо численно решить достаточно трудоемкую задачу локальной многомерной оптимизации. Альтернативные процедуры идентификации рассмотрены в работе [8].

Для устранения статистически незначимых компонентов полной модели, представленной на рис. 7, и выявления ее структуры, оптимальной с точки зрения соответствия наблюдениям, сопоставлялись:

- полная модель;
- упрощенная модель, не имеющая корреляций между парами факторов N_i и S_i ($i = 1, 2, 3, 4$);
- упрощенная модель, не имеющая факторов N_i ($i = 1, 2, 3, 4$).

Упрощенная модель, не имеющая факторов S_i ($i = 1, 2, 3, 4$), не рассматривалась, поскольку постановка задачи предполагает обязательное присутствие фактора, представляющего влияние ошибок измерений.

Результаты сопоставления показаны в таблице. Статистика F , распределенная как χ^2 , использовалась для проверки нулевой гипотезы о том, что различия между матрицами \mathbf{S} и Σ не выходят за границы, обусловленные ошибками, возникающими при выборочных оценках дисперсий и ковариаций (или, другими словами, гипотеза заключается в том, что факторная модель согласуется с результатами наблюдений).

Выборочные оценки значимости корреляций между наблюдаемыми переменными показали, что корреляции r_{12} , r_{13} , r_{14} и r_{23} значимо не отличаются от нуля, что позволило удалить их из списка свободных параметров. Это существенно упростило полную модель, в которой остались только следующие идентифицируемые параметры: n , s , r_{ns} , r_{24} и r_{34} .

Как видно из таблицы, гипотеза о согласовании с результатами наблюдений полной факторной модели отвергается при уровне значимости 0,05 ($p < 0,05$).

Та же гипотеза при том же уровне значимости для упрощенной модели без кор-

реляций между парами факторов N_i и S_i ($i = 1, 2, 3, 4$) отвергнута быть не может ($p > 0,05$). Разность статистик F для полной и упрощенной моделей асимптотически распределена как χ^2 с числом степеней свободы, равным разности в числах степеней свободы полной и упрощенной моделей. Этой разности соответствует p -значение, близкое к 1, что позволяет говорить о том, что сделанное в модели упрощение не приводит к значимому изменению статистики F .

Гипотеза о согласовании с результатами наблюдений упрощенной факторной модели без факторов N_i ($i = 1, 2, 3, 4$) отвергается при уровне значимости 0,05 ($p < 0,05$). Проведя те же рассуждения, что и для предыдущей модели, можно прийти к аналогичному выводу относительно значимости изменений статистики F .

Таким образом, оптимальной с точки зрения соответствия наблюдениям следует признать упрощенную модель без корреляций между парами факторов N_i и S_i ($i = 1, 2, 3, 4$). Поскольку $r_{ns} = 0$, то дисперсия наблюдаемых переменных состоит из двух компонентов (n^2 и s^2), представляющих соответственно вклады фактора навыков пилотирования и фактора, объединяющего влияние психофизиологического состояния пилотов и ошибок измерений. Значения n и s , идентифицированные для указанной оптимальной модели, позволяют говорить о том, что представленная дисперсией изменчивость наблюдаемых параметров на 46% обусловлена влиянием навыков пилотирования и на 54% — совместным влиянием психофизиологического состояния пилотов и ошибок измерений. Это позволяет говорить о сопоставимом влиянии исследуемых факторов на анализируемые характеристики.

Основные результаты и выводы

1. Разработана новая концепция диагностики квалификации летного состава по данным видеоокулографии, зарегистрированным во время работы на авиационных тренажерах, которая предполагает использование в качестве основной анализируемой характеристики иден-

Таблица. Характеристики согласования полной и упрощенных моделей с результатами наблюдений

Модель	Статистика F	Число степеней свободы распределения χ^2	p -значение	Статистическая значимость упрощения модели
Полная модель	11,97	5	0,035	—
Упрощенная модель без корреляций между парами факторов N_i и S_i ($i = 1, 2, 3, 4$)	11,97	6	0,06	Различия в значениях статистики F при одной степени свободы статистически значимыми не являются
Упрощенная модель без факторов N_i ($i = 1, 2, 3, 4$)	14,64	7	0,04	Различия в значениях статистики F при двух степенях свободы статистически значимыми не являются

тифицированных оценок наибольших интенсивностей переходов между состояниями марковских моделей, представляющих движение взгляда пилота по поверхности приборной доски и окну кабины. Рассмотренная диагностика сводится к выявлению окулографических маркеров, свидетельствующих о недостатке необходимых навыков пилотирования или неблагоприятном психофизиологическом состоянии.

2. Преимуществами представленной концепции являются:

- отсутствие жесткой привязки к пространственному распределению приборов, находящихся в поле зрения пилота, и соответственно к типу летательного аппарата;

- меньший объем экспериментальных данных, необходимых для корректной диагностики;

- невысокие требования к точности регистрации траектории движения взгляда, что существенно при проведении экспериментов и диагностических процедур в «полевых» условиях.

3. Проведенные вычислительные эксперименты выявили, что наибольшую дифференциацию между экипажами с разным уровнем подготовки обеспечивает произведение наибольших интенсивностей переходов в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это позволяет строить интегральные диагностические показатели как сумму данных произведений, умноженных на выявленные путем экспертных оценок эмпирические весовые коэффициенты, и использовать для оценки летной квалификации пороговые значения полученного итогового критерия по серии контрольных упражнений.

4. Анализ факторных влияний на наибольшие интенсивности переходов между состояниями двумерных марковских моделей, идентифицированные для каждого из исследуемых экипажей в одни и те же временные периоды, выявил, что представленная дисперсией изменчивость указанных параметров на 46% обусловлена влиянием навыков пилотирования и на 54% – совместным влиянием психофизиологического состояния пилотов и ошибок измерений, что

позволяет говорить о сопоставимом влиянии исследуемых факторов на анализируемые характеристики.

Список литературы

1. *Барабанщиков В.А.* Восприятие индивидуально-психологических особенностей человека по изображению целого и частично открытого лица // *Экспериментальная психология*. 2008. №1. с. 62-83.
2. *Барабанщиков В.А., Жегалло А.В.* Регистрация и анализ направленности взгляда человека. М.: ИП РАН, 2013. 316 с.
3. *Береговой Г.Т., Завалова Н.Д., Ломов Б.Ф., Пономаренко В.А.* Экспериментально-психологические исследования в авиации и космонавтике. М.: Наука, 1978. 303 с.
4. *Куравский Л.С., Марголис А.А., Юрьев Г.А., Мармалюк П.А.* Концепция системы поддержки принятия решений для психологического тестирования // *Психологическая наука и образование*. №1. 2012. с. 56-65.
5. *Куравский Л.С., Мармалюк П.А., Алхимов В.И., Юрьев Г.А.* Математические основы нового подхода к построению процедур тестирования // *Экспериментальная психология*. 2012. Т 5. №4. С. 75-98.
6. *Куравский Л.С., Мармалюк П.А., Барабанщиков В.А., Безруких М.М., Демидов А.А., Иванов В.В., Юрьев Г.А.* Обучаемые структуры как основа программного обеспечения для диагностики навыков и компетенций // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2013. №5. с. 46-60.
7. *Куравский Л.С., Мармалюк П.А., Юрьев Г.А., Беляева О.Б., Прокопьева О.Ю.* Диагностика летного состава по результатам работы на авиационных тренажерах // *Экспериментальная психология*. 2016. Т. 9. № 3. с. 118-137. doi:10.17759/exppsy.2016090310.
8. *Куравский Л.С., Ушаков Д.В., Мармалюк П.А., Панфилова А.С.* Исследование факторных влияний на развитие психологических характеристик с применением нового подхода к оценке адекватности моделей наблюдения // *Информационные технологии*. 2011. №11. с. 67-77.
9. *Марковские модели в задачах диагностики и прогнозирования: Уч. пособие / Под ред. Л.С. Куравского. 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГППУ, 2017. 197 с.*
10. *Kuravsky L.S., Marmalyuk P.A., Baranov S.N., Alkhimov V.I., Yuryev G.A. and Artyukhina S.V.* A New Technique for Testing Professional Skills and Competencies and Examples of its Practical Applications // *Applied Mathematical Sciences*. Vol. 9. 2015. no. 21. 1003-1026. <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2015.411899>.

Куравский Лев Семёнович – д-р техн. наук, проф., декан,

Юрьев Григорий Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент,

Беляева Ольга Борисовна – магистрант, Прокопьева Ольга Юрьевна – магистрант факультета «Информационные технологии», Московского государственного психолого-педагогического университета.

Контактный телефон (916) 400-57-81.

E-mail: l.s.kuravsky@gmail.com g.a.yuryev@gmail.com

О практическом применении технологий дополненной и виртуальной реальности (AR/VR)

Технологии AR/VR среди прочего применимы для модернизации текущих бизнес-процессов. Например, для ПАО «ФСК ЕЭС» специалисты Неолант внедрили AR-технологии в процесс проведения оперативных переключений на электроустановках. До внедрения на объект, который находится на расстоянии нескольких сотен метров, выдвигались два сотрудника предприятия – один зачитывал инструкцию, а второй выполнял ее по пунктам. Внедрение в данный процесс AR-очков позволило воспроизводить инструкцию в дополненной реальности, а это значит, что второму сотрудни-

ку теперь необязательно присутствовать на месте проведения переключений. Дополнительным бонусом применения AR-очков также является возможность видеофиксации, которая значительно упрощает процесс выявления проблемы в случае аварии.

Основным же препятствием для использования этих технологий в промышленных масштабах является достаточно высокая стоимость оборудования для AR/VR. Пока эта тенденция сохраняется, будет сложно продвигаться дальше опытных образцов и пилотных проектов.

[Http://www.neolant.ru](http://www.neolant.ru)