

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПРИГОДНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВИДОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Е.Т. Володарский, Л.А. Кошечая, Е.В. Булыгина*

Предложен метод оценки профессиональной пригодности операторов экстремальных видов деятельности, в основу которого положен трехступенчатый статистический критерий, позволяющий на трех последовательных этапах оценивать пригодность оператора и тем самым повысить достоверность верного отбора. В качестве обобщенного параметра, при помощи которого без привлечения экспертов можно оценивать пригодность оператора, используется коэффициент энергетической устойчивости, который вычисляется как отношение площадей под кривой спектральной плотности  $\alpha$ -ритма биологического сигнала оператора в спокойном и нагруженном состоянии. Для определения возможных рассеиваний относительной величины, названной коэффициентом энергетической устойчивости, которые могут быть обусловлены «индивидуальными» особенностями операторов, влиянием экстремальных нагрузок, условиями и режимом работы был проведен физический моделирующий эксперимент. К этому эксперименту была привлечена группа операторов (зимовщиков экспедиции на антарктической станции «Академик Вернадский»), имеющих положительный (длительный и успешный) опыт работы в экстремальных условиях, однако, с некоторыми индивидуальными расхождениями в пределах требуемой квалификации. В результате установлены «эталонные» нормы рассеяния по влияющим случайным величинам, по отношению к которым осуществляется оценка при отборе операторов.

Учитывая ограниченный объем выборки при отборе операторов для повышения статистической надежности получаемых оценок, а, следовательно, и повышения достоверности принимаемых решений о профессиональной пригодности операторов используется робастная процедура, которая базируется на медианном абсолютном отклонении. Предложенный подход позволяет автоматизировать процедуру отбора операторов и тем самым исключить возможные субъективные решения экспертов.

*Ключевые слова:* статистическая модель; критерий; профессиональный отбор; достоверность; робастная оценка.

### Введение

Эффективность деятельности оператора, в первую очередь, зависит от его профессиональной пригодности выполнять функциональные обязанности для данного вида трудовой деятельности. Для операторов, деятельность которых связана с постоянным изменением физических и психологических нагрузок и необходимостью оперативного принятия адекватных решений, разрабатываются различные специальные тесты, по результатам которых и принимается решение о профессиональной пригодности. Установлено, что именно таким путем и шли при отборе операторов-зимовщиков для работы на Антарктической станции «Академик Вернадский». Выполнение функциональных обязанностей зависит, в первую очередь, от психофизиологического состояния оператора [1]. Об изменениях психофизиологического состояния оператора при этом судят по электроэнцефалограмме (ЭЭГ), которая фиксирует  $\alpha$ -ритмы головного мозга, уровень которых, как минимум, на полпорядка выше уровней других биоритмов. Достоверность и правильность принимаемых решений зависит от выбранной модели исследования, методики тестирования и квалификации экспертов [2].

Поскольку для операторов экстремальных видов деятельности важны их психическое состояние и реакция при переходе из спокойного состояния в так называемое возбужденное, исследование целесообразно проводить в обоих этих состояниях. При этом исходной информацией является ЭЭГ, по которой можно судить только о качественном изменении психофизиологического состояния оператора и невозможно охарактеризовать способность оператора мобилизовать свои внутренние ресурсы [3].

## 1. Интегральный показатель

В качестве интегральной оценки психофизиологического состояния оператора, характеризующей его профессиональную пригодность, предлагается использовать площадь под кривой спектральной плотности  $\alpha$ -ритма как оценку полной энергии оператора. Под полной энергией оператора авторы понимают возможность мобилизовать его энергетические ресурсы при возникновении экстремальной ситуации [4]. Для количественной оценки полной энергии оператора вводится относительный показатель – коэффициент энергетической устойчивости  $\theta$ , вычисляемый как отношение полных энергий  $\alpha$ -ритмов в спокойном ( $\Pi_{cn}$ ) и возбужденном ( $\Pi_{возб}$ ) состояниях оператора:

$$\theta = \frac{\Pi_{cn}}{\Pi_{возб}}.$$

При  $\theta = 1$  энергетика оператора не меняется в экстремальной ситуации, и он не сможет вовремя отреагировать на факторы стресса. Применение относительного показателя существенно уменьшает влияние систематической погрешности ЭЭГ, а также эффекты подключения электродов.

Процедуру профессионального отбора можно рассматривать как разновидность испытаний, при проведении которых оцениваются такие свойства операторов, которые можно различать качественно и определять (измерять) количественно. Для измерения этих свойств не обязательно использовать технические средства, хранящие единицу измеряемой величины, а можно «привязывать» результат измерения к опорному значению.

При такой трактовке понятия измерений проявляется тенденция нового подхода к его определению, предложенному VIM-3, как к процессу экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны данной величине [5]. При этом мы отходим от тезиса, что измерению подлежат только физические величины. Измерять можно любую величину при соответствующем выборе шкалы и принятой норме для сравнения.

Исходя из этих позиций, для формирования опорной величины была привлечена группа операторов (зимовщиков экспедиции на антарктической станции «Академик Вернадский»), имеющих положительный (длительный и успешный) опыт работы в экстремальных условиях, однако, с некоторым расхождением в квалификации. При этом каждый из операторов имеет индивидуальные биоритмы, которые варьируются как на протяжении суток, так и с изменениями атмосферных и климатических параметров. Следовательно, совокупность таких операторов представляет собой физическую модель профессиональной пригодности операторов данного вида деятельности.

Изменения индивидуальных свойств операторов отображаются в виде вариации (дисперсии) коэффициента энергетической устойчивости по отношению к его опорному значению, определенному при исследовании группы операторов:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} \bar{\theta}_i,$$

где  $\bar{\theta}_i = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \bar{\theta}_{ij}$  – среднее значение коэффициента энергетической устойчивости  $i$ -го из

$N_3$  группы операторов, учитывающего влияние варибельности собственных биоритмов и чувствительность к колебаниям атмосферно-климатических условий.

Следовательно, вариации индивидуальных коэффициентов энергетической устойчивости  $\theta_i$  по отношению к опорному значению, соответствующему энергетической устойчивости гипотетического идеального оператора данного вида деятельности, характеризуют возможное рассеяние, в пределах которого могут находиться индивидуальные коэффициенты устойчивости операторов, подтвердивших свою пригодность к данному виду деятельности. Эту дисперсию в дальнейшем будем называть дисперсией воспроизводимости  $\sigma_R^2$  профессионального уровня операторов определенного вида экстремальной деятельности.

Таким образом, предлагается статистическая модель, основанная на установлении оценки воспроизводимости профессионального уровня операторов, работающих в экстремальных условиях, что позволяет определить некоторые границы, в пределах которых допускается изменение коэффициента энергетической устойчивости.

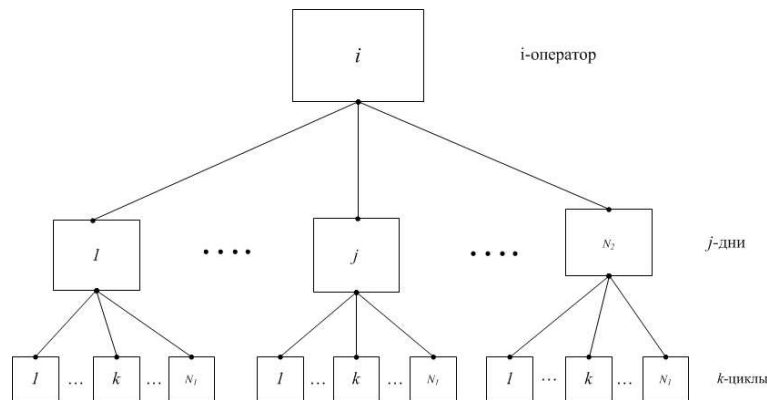
## 2. Постановка эксперимента

В общем случае дисперсия воспроизводимости в виду отсутствия корреляции между составляющими представляется в виде:

$$\sigma_R^2 = \sigma_{on}^2 + \sigma_{\partial n}^2 + \sigma_{\psi k}^2,$$

где  $\sigma_{on}^2$  – возможное рассеяние интегральных свойств операторов, успешно выполняющих свои функции в экстремальных условиях, и отражающее их индивидуальность;  $\sigma_{\partial n}^2$  – возможное рассеяние свойств операторов из-за их чувствительности к изменениям условий работы в заданных пределах;  $\sigma_{\psi k}^2$  – влияние варибельности биоритмов в течение дня. То есть, необходимо организовать такой эксперимент, который позволил бы определить составляющие дисперсии воспроизводимости. Первая составляющая  $\sigma_{on}^2$  вытекает из самой стратегии проведения исследований как возможное рассеяние коэффициентов  $\theta_i$  из-за индивидуальных особенностей операторов. Для оценивания влияния изменения условий работы (стрессы, физические нагрузки, влияние окружающей среды) проводились исследования в различные дни. И, наконец, для оценивания изменения биоритмов оператора в течение дня проводилось несколько циклов исследования, каждый из которых характеризовал два состояния оператора: спокойное и возбужденное.

Исходя из этого был реализован эксперимент, позволяющий на каждом его уровне выделить соответствующую составляющую. На рисунке приведена структурная схема организации экспериментального исследования для одного оператора.



Структурная схема организации экспериментального исследования

Для оценивания влияния изменений условий работы эксперимент проводился с каждым оператором в  $N_2$  дней. Для исключения корреляции результатов дни проведения исследований операторов не должны совпадать. Для оценивания влияния variability биоритмов в течение дня проводились по  $N_1$  циклов, каждый из которых состоит из двух этапов – регистрация  $\alpha$ -ритмов в спокойном и возбужденном состоянии. Вариация коэффициентов энергетической устойчивости  $\theta_i$  операторов по отношению к опорному значению  $\bar{\theta}$

$$\tilde{\sigma}_R^2 = Var(\bar{\theta}_i) = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} (\bar{\theta}_i - \bar{\theta})^2}{(N_3 - 1)},$$

отражает воспроизводимость пригодности операторов к работе в экстремальных условиях, которую можно представить в виде:

$$\tilde{\sigma}_R^2(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{ijk} - \bar{\theta})^2}{(N_1 N_2 N_3 - 1)}, \quad (1)$$

где  $\theta_{ijk}$  – значение коэффициента энергетической устойчивости для  $i$ -го оператора,  $i = \overline{1, N_3}$ ,  $j$ -го дня,  $j = \overline{1, N_2}$  при  $k$ -м,  $k = \overline{1, N_1}$  цикле испытаний.

Представим числитель выражения (1) в виде:

$$Q_o^2 = Q_{on}^2 + Q_{dn}^2 + Q_{uk}^2, \quad (2)$$

где  $Q_{on}^2 = \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\bar{\theta}_i - \bar{\theta})^2$  – рассеяние результатов, обусловленное возможным разбросом значений коэффициентов энергетической устойчивости операторов;

$$Q_{dn}^2 = \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\bar{\theta}_{ij} - \bar{\theta}_i)^2 = N_1 \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} (\bar{\theta}_{ij} - \bar{\theta}_i)^2$$

– рассеяние результатов, полученных при проведении исследований, обусловленное влиянием случайных величин и возможным влиянием изменений условий;

$$\bar{\theta}_{ij} = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} \theta_{ijk}$$

– среднее значение коэффициентов энергетической устойчивости, полученных в течение  $j$ -го дня для  $i$ -го оператора за  $N_1$  циклов;

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \bar{\theta}_{ij}$$

– среднее значение коэффициентов энергетической устойчивости, полученных в каждый день для  $i$ -го оператора в течение  $N_2$  дней эксперимента;

$$Q_{uk}^2 = \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{ijk} - \bar{\theta}_{ij})^2$$

– рассеяние результатов, обусловленное колебанием биоритмов в течение дня.

По выражению (2) можно оценить влияние каждого из рассмотренных факторов на возможное рассеяние коэффициента энергетической устойчивости, и, следовательно, в допустимых пределах изменение уровня квалификации оператора.

Разделив слагаемые правой части выражения (2) на соответствующие числа степеней свободы:

$$\nu_{\partial n} = N_3 (N_2 - 1); \nu_{\psi \kappa} = N_3 N_2 (N_1 - 1), \nu_{on} = (N_3 - 1), \quad (3)$$

получим средневзвешенные составляющие возможной вариации коэффициента энергетической устойчивости, которая характеризуется:

$$Var(\theta_{ijk}) = \frac{\sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{ijk} - \bar{\theta}_{ij})^2}{N_3 N_2 (N_1 - 1)} = \sigma_{\psi \kappa}^2$$

– составляющей вариации, обусловленной изменением эмоционально-психологического состояния под влиянием действующих случайных внешних и внутренних величин;

$$Var(\bar{\theta}_{ij}) = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} (\bar{\theta}_{ij} - \bar{\theta}_i)^2}{N_3 (N_2 - 1)} = \sigma_{\partial n}^2$$

– составляющей вариации, обусловленной влиянием атмосферно-климатических условий;

$$Var(\bar{\theta}_i) = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} (\bar{\theta}_i - \bar{\theta})^2}{(N_3 - 1)} = \sigma_{on}^2$$

– составляющей вариации, обусловленной индивидуальной психофизиологической устойчивостью операторов.

Найденные таким образом вариации можно использовать в качестве допустимой нормы при профессиональном отборе операторов экстремальных видов деятельности.

### 3. Принятие решения о профессиональной пригодности

Принятие решения о профессиональной пригодности базируется на статистическом анализе ряда результатов исследования психофизиологических свойств оператора-претендента и сравнении их с установленными нормами. Рекомендации о профессиональной пригодности при отборе выдаются на основании соотношения оценки составляющих дисперсии воспроизводимости коэффициента энергетической устойчивости оператора  $s 2(\theta)$ , который проходит тестирование, полученных на основе выборки ограниченного объема, с нормами возможных вариаций  $var(\theta)$ , установленными при моделирующем эксперименте.

Процедура оценивания пригодности оператора проводится в два этапа, начиная с оценивания влияния индивидуальных дневных биоритмов. Предварительно необходимо оценить однородность полученных результатов, например, по критерию Кохрена [6]. Так как имеющиеся экспериментальные данные получены из выборки малого объема, то выброс (*outline*), возможно, обусловлен асимметрией распределения полученных данных. Так, например, коэффициент асимметрии для выборки из 4-х результатов составляет 0,8, а из 5-ти результатов – 0,7.

Для повышения точности результатов дальнейших вычислений и их статистической надежности необходимо воспользоваться робастной процедурой оценивания результатов [7], которая устойчива к выбросам и учитывает все, даже «плохие» данные.

Под робастностью понимается нечувствительность к различным отклонениям и неоднородностям в выборке, которые связаны с теми или иными, в общем случае неизвестными,

причинами. Модель «засорения» классического нормального распределения представляется «хвостами» плотности распределений. Однако, в модели с «засорением» есть неизменная (стойкая) средняя часть распределения, соответствующая малым отклонениям от математического ожидания (что и происходит на практике), и растянутые «хвосты», которые характеризуются относительно редкими выбросами (квазивыбросами). Использование такой модели позволяет, с одной стороны, сохранить удобное вероятностное допущение про однородность гипотетической генеральной совокупности, и с другой – не отбрасываются данные, которые при традиционном подходе признавались бы выбросами.

Установлено [7], что наилучшими свойствами с точки зрения устойчивости к выбросам имеет середина распределения в интервале между квантилями, которые устанавливаются на основании данных выборки. При допущении бесконечной выборки берется интерквартильный интервал (размах) (interquartile range), который является характеристикой нормального распределения. Площадь под кривой распределения плотностей вероятностей на этом интервале составляет 50%. Длина этого интервала однозначно отвечает дисперсии генерального закона (без учета «засорения»). При применении робастного оценивания простейшим является использование медианного абсолютного отклонения  $MAD$  (*Median Absolute Deviation*), которое определяется из выражения:

$$MAD = med \{|x_i - M_n|\},$$

где  $M_n = med \{x_i\}$  – медиана из выборки  $i$  элементов,  $n$  – число элементов в выборке для плотности вероятностей предполагаемого распределения  $f(x) = \frac{C}{\sigma\sqrt{2n}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$ , где  $C = 1$  для генеральной совокупности.

Для определения коэффициента  $C$  при представлении распределения при помощи  $MAD$  воспользуемся связью площади под кривой распределения генеральной совокупности на интерквартильном интервале.

Воспользовавшись табличными значениями для третьего  $p=3/4$  и первого  $p=1/4$  квантилей находим  $C=1,483$ . Таким образом, оценка среднеквадратического отклонения (СКО), которая находится на основе интерквартильного размаха для выборки объемом  $n$  будет  $s^* = 1,483MAD$  и, в отличие от СКО, которое определяется по известному выражению, будет устойчивой, даже если выборка содержит 50% аномальных результатов.

Значение  $C = 1,483$  было вычислено, исходя из параметров генеральной совокупности, что не соответствует реальной ситуации. Поэтому значение  $s^*$  носит больше теоретический характер.

Для уточнения оценки СКО в зависимости от объема выборки  $n$  используется поправочный коэффициент  $k(n)$ , значение которого приведено в [8], тогда:

$$s = k(n) MAD.$$

Полученная таким образом оценка СКО учитывает все элементы выборки малого объема, которая имеет место при проведении текущего отбора претендентов-операторов.

Убедившись в однородности полученных экспериментальных данных, переходят к статистическому оцениванию существенности расхождений оценки дисперсии  $s^2(\theta_{ук})$ , полученной на основании тестирования оператора-претендента, и нормой рассеяния, полученной при совместном физическом моделирующем эксперименте. Для этого используется процедура статистической проверки гипотез по критерию хи-квадрат [6]. При этом рассчитывается значение:

$$\frac{s^2(\theta_{ук}) \cdot \nu_{ук}}{\sigma_{ук}^2} = \chi_{ук}^2,$$

которое сравнивается с табличным значением  $\chi_{кр}^2(\alpha, \nu_{ук})$  для вероятности  $(1 - \alpha)$  и числа степеней свободы, приведенных в выражении (3). Если  $\chi_{ук}^2 < \chi_{кр}^2(\alpha, \nu_{ук})$ , то переходят ко второму этапу. В противном случае с оператором проводят дополнительные исследования с тем, чтобы принять окончательное решение о его пригодности.

Второй этап аналогичен первому, только проверяется соотношение значений  $s^2(\theta_{дн})$  и  $\sigma^2(\theta_{дн})$  для каждого оператора с последующим сравнением расчетного значения хи-квадрат с его критическим значением  $\chi_{кр}^2(\alpha, \nu_{дн})$ .

## Заключение

Данный подход позволяет при выбранном соответствующем интегральном показателе оценить операторов и других видов деятельности. Если необходимо оценивать не только профессиональную пригодность оператора, а его способность работать в коллективе (командные действия), как например, для членов полярной экспедиции (экипажа космического корабля), то необходимо оценивать их расхождение между средними значениями операторов на третьем (верхнем) уровне.

Таким образом, двухэтапная процедура статистического оценивания позволяет объективно по интегральному показателю с заданной статистической надежностью вырабатывать решение о профессиональной пригодности оператора не только экстремального, но и различных видов деятельности.

## Литература

1. Lacey, I. Somatic responsee / I. Lacey // Psychological stress. – N.-Y., 1967. – P. 14–37.
2. Plonsey, R. Bioelectricity / R. Plonsey, R.C. Barr. – N.-Y.: Plenum, 1998. – P. 112–163.
3. Хьелл, Л. Теории личности: основные положения, исследования и принципы: [пер. с англ.] / Л. Хьелл, Д. Зиглер. – 3-е изд. – М.: Питер, 2008. – 606 с.
4. Володарський, Е.Т. Статистичне оцінювання професійної придатності операторів екстремальних видів діяльності / Е.Т. Володарський, О.В. Булигіна // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. ВНТУ-2012. – № 3 (25). – С. 71–78.
5. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). – JCGM, 2008.
6. Freund, J.E. Mathematical Statistics 4th Ed. / J.E. Freund, R.E. Walpole. – N.-Y.: Prentice-Hall, Inc., 1987.
7. Хьюбер, Дж.П. Робастность в статистике: [пер. с англ.] / Дж.П. Хьюбер. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
8. Randa, J. Update to Proposal for KCRV & Degree of Equivalence for GTRF Key Comparisons. NIST, February 2005 GT-RF / 2005-04.

Евгений Тимофеевич Володарский, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации экспериментальных исследований, Национальный технический университет Украины «Киевский Политехнический Институт» (г. Киев, Украина), vet-1@ukr.net.

Лариса Александровна Кошечая, доктор технических наук, профессор кафедры биокibernетики и аэрокосмической медицины, Национальный авиационный университет (г. Киев, Украина), arnis@ukrpost.net.

Елена Вячеславовна Булыгина, кандидат технических наук, доцент кафедры биокibernетики и аэрокосмической медицины, Национальный авиационный университет (г. Киев, Украина), badrakali@ukr.net.

MSC 62N05

DOI: 10.14529/mmp140102

## Statistical Evaluation of Professional Suitability of Operators of Extreme Activities with Using the Physical Modelling

*Y.T. Volodarskiy*, National Technical University, Kiev, Ukraine, vet-1@ukr.net,  
*L.A. Koshevaya*, National Aviation University, Kiev, Ukraine, arnis@ukrpost.net,  
*E.V. Bulygina*, National Aviation University, Kiev, Ukraine, badrakali@ukr.net

Authors offer a method for assessment of professional suitability of operators of extreme activities based on a statistical three-level criterion. It allows to assess the suitability of the operator on three consecutive stages and thereby improve the accuracy of the correct selection. As a generalized parameter by which the suitability of the operator can be assessed without involving experts, a coefficient of energetic sustainability is used. It's calculated as the ratio of the areas under the curve of the spectral density of  $\alpha$ -rhythm of the biological signal of operator in a calm and loaded conditions. To determine possible scattering of relative value, called coefficient of energetic sustainability, which can be caused by "individual" features of operators, or by the influence of extreme loads, or by conditions and mode of operation, a physical modelling experiment has been carried out. The group of operators (winter expedition to the Antarctic station "Akademik Vernadsky") who's having a positive (long and successful) experience in extreme conditions, have been engaged in this experiment. However, the group had some individual variances within the required qualifications. As a result the "standard" norms of scattering, sorted by affective random variables, have been set with respect to which the assessment is carried out in the process of selection of operators. Taking into account limited volume of samples in selection of operators in order to improve the statistical reliability of the assessments and, consequently, to improve the reliability of decisions about the suitability of operators it's used a robust procedure, which is based on the absolute median deviation. The approach proposed by authors allows to automate the selection procedure of operators and thereby exclude possible subjective decisions of experts.

*Keywords:* statistical model; criterion; professional selection; reliability; robust estimate.

## References

1. Lacey I. Somatic Responsee. *Psychological Stress*, N.-Y., 1967, pp. 14–37.
2. Plonsey R., Barr R.C. *Bioelectricity*. N.-Y., Plenum, 1998, pp. 112–163.
3. Kh'yell L., Zigler D. *Personality Theories: Basic Assumptions, Research, and Applications*, 3th ed. McGraw-Hill, 1992.
4. Volodarsky Y.T., Buligina O.V. Statistichne otsinyuvannya profesiynoi prيداتnosti operatoriv ekstremal'nikh vidiv diyal'nosti. *Informatsiyni tekhnologii ta komp'yuterna inzheneriya. VNTU-2012*, 2012, no. 3 (25), pp. 71–78. (in Ukrainian)
5. *International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*. 2008, JCGM.
6. Freund J.E., Walpole R.E. *Mathematical Statistics*. N.-Y., Prentice-Hall, Inc., 1987.
7. Huber P.J. *Robust Statistics*. N.-Y., Chichester, Brisbane, Toronto John Wiley and Sons, 1981. DOI: 10.1002/0471725250
8. Randa J. *Update to Proposal for KCRV & Degree of Equivalence for GTRF Key Comparisons*. NIST, February 2005 GT-RF / 2005-04.

Поступила в редакцию 30 сентября 2013 г.