

## Влияние излучательной способности на систематические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения в металлургии

*Исследовано влияние абсолютных значений излучательной способности на основные в оптической термометрии методические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения с использованием наиболее изученных оптических характеристик вольфрама. Доказана перспективность, эффективность использования и высокие метрологические характеристики симметрично-волновой пирометрии для термоконтроля наиболее распространенных в металлургии материалов с монотонными нелинейными спадающими выпуклыми распределениями излучательной способности. Установлено, что в одинаковых сложных термометрических условиях металлургии погрешности симметрично-волновой термометрии ниже погрешностей классической энергетической одноцветовой, спектрального отношения двухцветовой и известной многоцветовой пирометрии излучения соответственно в 13-18; 4-11 и 3-4 раза.*

**Ключевые слова:** одно-, многоцветовая термометрия, температура излучения, симметрично-волновая термометрия, температура объекта, излучательная способность, спектральные распределения

В предыдущих работах [1-3] авторами доказана перспективность многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения (СВПИ) в сложных термометрических условиях, определяемых неизвестными и случайно изменяющимися значениями коэффициентов излучательной способности ( $\varepsilon$ ) и пропускания промежуточных сопутствующих и специальных сред ( $\tau$ ). Проблема пропускания сред обычно эффективно решается использованием продуваемых фурм и известных спектральных диапазонов с известными и стабильными  $\tau$ . Обусловленные  $\varepsilon$  систематические погрешности линейной СВПИ значительно меньше погрешностей других известных методов многоцветовой и, тем более, классической пирометрии излучения. Линейная СВПИ – наиболее простой метод многоцветовой симметрично-волновой пирометрии излучения, который исключает методические погрешности в случае линейных термодинамически равновесных, серых, спадающих и возрастающих распределений  $\varepsilon$  (ТР-, СР-, СЛ- и ВЛ-распределения).

Многие термометрические объекты имеют близкие к линейным распределения  $\varepsilon$  (например, нецветные и цветные металлы, а также их сплавы, оксиды, карбиды, бориды, нитриды и силициды) в определенных участках видимого и ближнего инфракрасного спектров. Поэтому для практического использования линейной СВПИ необходимо определить возможные нелинейности распределений  $\varepsilon$ , обеспечивающие требуемую точность температурных измерений. Интересной также является информация о предельных значениях остальных оптических характеристик СВПИ:

- спектрального диапазона  $\lambda_3$ - $\lambda_1$ , задающего  $\Delta\lambda = (\lambda_3 - \lambda_1) / 2$ , мкм;
- длины средней волны  $\lambda_2$ , мкм;
- коэффициента нелинейности  $K_H = \varepsilon_2 - \varepsilon_{2п}$ ,

где  $\varepsilon_2$  – излучательная способность объекта на длине волны  $\lambda_2$ ;  $\varepsilon_{2п}$  – излучательная способность объекта на длине волны  $\lambda_2$  для линейно аппроксимированного распределения  $\varepsilon_n = f(\lambda)$ ;

– коэффициента крутизны  $K_K = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) / (\lambda_3 - \lambda_1)$ , м<sup>-1</sup>, где  $\varepsilon_3$  и  $\varepsilon_1$  – значения излучательной способности объекта соответственно на длинах волн  $\lambda_3$  и  $\lambda_1$ ;

– диапазона излучательной способности  $\Delta\varepsilon$ , который при имеющейся нелинейности распределений  $\varepsilon$  обеспечивает эту требуемую точность измерений.

В настоящей статье авторы приводят результаты исследований влияния  $\Delta\varepsilon$  на систематические погрешности линейной СВПИ, изученные ранее [1-3]. Исследования выполнены на указанных линейных и возможных в различных спектральных диапазонах нелинейных следующих распределениях  $\varepsilon$ : спадающих выпуклых (СВП); возрастающих выпуклых (ВВП); спадающих вогнутых (СВГ); возрастающих вогнутых (ВВГ).

Установленные в результате этих исследований закономерности влияния  $\Delta\varepsilon$  на погрешности СВПИ при  $\Delta\lambda = 0,3$  мкм;  $\lambda_2 = 0,8$  мкм;  $K_H$  от -0,005343 до 0,005343;  $K_K$  от -184541 до 184541 м<sup>-1</sup>;  $T = 1600$  К представлены на рис. 1.

Исходным СВПw-распределением является наиболее изученное распределение излучательной способности вольфрама с  $\varepsilon$  от 0,3588 до 0,4661 при  $T = 1600$  К [4-6]. Для более широких исследований указанный диапазон (без изменений его ширины) смещался на -0,1; +0,1 и +0,4 параллельным смещением исследуемых спектральных распределений по шкале  $\varepsilon$ . Для количественной определенности результатов исследований в качестве СВГзw-, ВВПзw- и ВВГзw-распределений использованы соответствующие зеркальные отображения СВПw-распределения. Используемые экспериментальные распределения вольфрама отличаются значи-

тельными, не связанными с его электромагнитными характеристиками, изменениями излучательной способности. Поэтому для получения СВПав-, СВГазw, ВВПазw- и ВВПазw-распределений в спектральном диапазоне от 0,3 до 1,5 мкм экспериментальные данные были аппроксимированы соответствующими полиномами шестой степени, описанными ранее [7].

В результате исследований установлено, что зависимости  $\delta_{\text{СВПИ}} = f(\Delta\varepsilon)$  имеют монотонный экспоненциальный, спадающий с повышением излучательной способности, характер для СВП-, СВГ-, ВВП- и ВВП-распределений. В соответствии с термодинамическими законами теплового излучения и полученными из них пирометрическими уравнениями методические погрешности классической энергетической и спектрального отношения двухцветовой, а также многоцветовой пирометрии излучения должны снижаться при повышении излучательной способности. На рис. 2 представлены закономерности влияния излучательной способности в изученных диапазонах на методические погрешности классической энергетической одноцветовой пирометрии излучения.

У закономерностей монотонный экспоненциальный спадающий характер. Многоцветовая СВПИ не является исключением и ее методические погрешности также уменьшаются при повышении  $\varepsilon$ . В принципе, такие зависимости погрешностей от  $\varepsilon$  можно использовать для первичной оценки правильности разрабатываемых новых направлений и методов оптической термометрии. Для наиболее распространенных материалов с СВП-распределениями погрешности минимальны и возрастают соответственно для СВГ-, ВВП- и ВВП-распределений. При этом погрешности для СВГ- и ВВП-распределений занимают промежуточное значение между погрешностями СВП- и ВВП-распределений. Эта закономерность определяется количеством рабочих волн СВПИ в области высоких и низких значений  $\varepsilon$  для различных ее распределений по спектру. Погрешности измерений, используемых в СВПИ одноцветовых температур излучений термометрируемого объекта  $S_n$ , снижаются при повышении излучательной способности  $\varepsilon_n$  и уменьшении длины волны.

Погрешности измерений  $S_n$

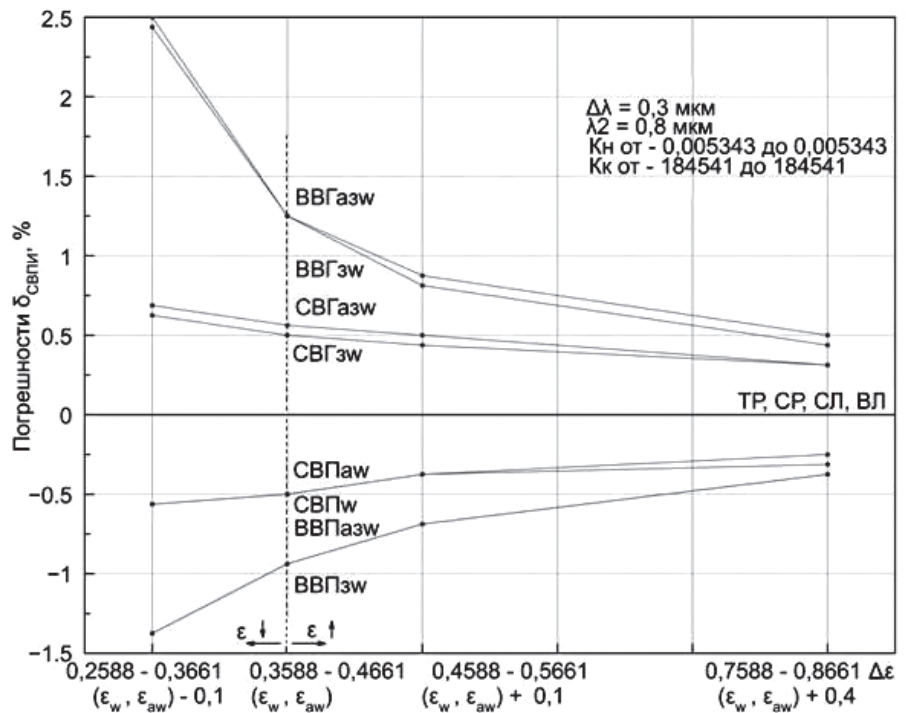


Рис. 1. Изменение погрешностей линейной СВПИ от  $\Delta\varepsilon$  для различных возможных монотонных распределений  $\varepsilon$

(кроме излучательной способности) определяются также длинами волн  $\lambda_n$  в соответствии с полученным из закона Вина обобщающим пирометрическим уравнением

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_n} = \frac{\lambda_n}{c_2} \ln \varepsilon_n \frac{1}{T} - \frac{1}{S_n} = \frac{\lambda_n}{c_2} \ln \varepsilon_n,$$

где  $T$  – температура металлического сплава, К;  $S_n$  – температура излучения металлического сплава на длине волны  $\lambda_n$ ;  $\lambda_n$  – эффективная длина рабочей волны СВПИ, м;  $c_2 = hc/k = 0,014388$ , К·м – вторая

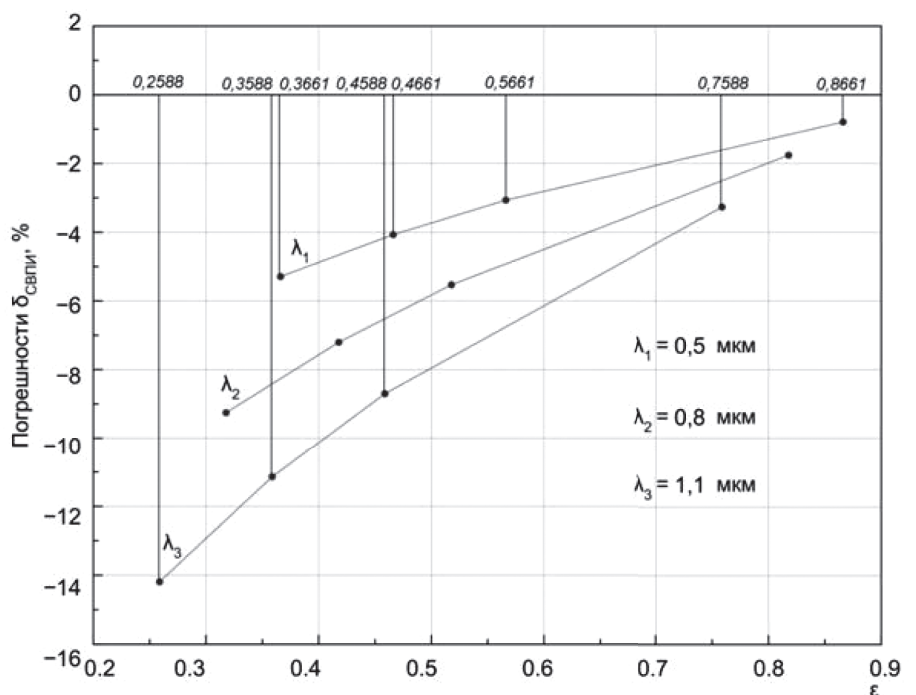


Рис. 2. Изменение погрешностей энергетической одноцветовой пирометрии излучения от  $\varepsilon$  для СВПав-распределения при  $T = 1600$  К

постоянная Планка ( $h = 6,62619 \cdot 10^{-34}$ , Дж·с – постоянная Планка;  $c = 299792458$ , м/с – скорость света в вакууме;  $k = 1,380662(44) \cdot 10^{-23}$ , Дж/К – постоянная Больцмана);  $\varepsilon_n$  – излучательная способность металлического сплава на рабочей длине волны  $\lambda_n$ .

Сочетание факторов  $\varepsilon$  и  $\lambda$  при доминирующем влиянии излучательной способности (для СВП- и ВВГ-распределений соответственно) наиболее и наименее благоприятно. Этим сочетанием определяется положение полученных закономерностей на шкале погрешностей для изученных распределений излучательной способности. Погрешности линейной СВПИ для ТР-, СР-, ВЛ- и СЛ-распределений не зависят от  $\Delta\varepsilon$  и равны нулю. Погрешности носят систематический характер, имеют различные знаки и для СВП-, ВВП- и СВГ-, ВВГ-распределений соответственно отрицательны и положительны. Систематичность погрешностей допускает введение температурных поправок для дополнительного повышения метрологических характеристик СВПИ.

Особый интерес для изучения метрологических характеристик СВПИ представляют количественные оценки влияния  $\Delta\varepsilon$ . Линейная СВПИ идеально работает в случае линейных распределений излучательной способности, при которых  $\delta_{\text{СВПИ}} = 0$ . Для наиболее распространенных реальных СВП-распределений ( $\varepsilon = 0,3588-0,4661$ ) погрешности не превышают 0,5 %, а для их возможных зеркальных отображений, то есть СВГ-, ВВП- и ВВГ-распределений, соответственно 0,5; 0,9 и 1,3 %. При уменьшении излучательной способности на 0,1 ( $\varepsilon = 0,2588-0,3661$ ) и повышении ее от 0,1 ( $\varepsilon = 0,4588-0,5661$ ) до 0,4 ( $\varepsilon = 0,7588-0,8661$ ) указанные погрешности повышаются и снижаются до (0,6; 0,7; 1,4; 2,5); (0,4; 0,4; 0,7; 0,8); (-0,3; 0,3; 0,4; 0,5) % соответственно. Погрешности линейной СВПИ для наиболее распростра-

ненных реальных СВП-распределений в 8-22 раза меньше погрешностей классической энергетической одноцветовой пирометрии излучения на длинах волн 0,5; 0,8 и 1,1 мкм, достигающих соответственно 4; 7 и 11 % (рис. 2). Вполне очевидно, что погрешности классической спектрального отношения двухцветовой пирометрии излучения в этих условиях занимают промежуточное значение между СВПИ и энергетической одноцветовой термометрией. Например, на длинах волн 0,5 и 1,1 мкм, то есть на эквивалентной длине волны, равной 0,92 мкм, погрешности двухцветовой пирометрии излучения в исследованных условиях находятся в диапазоне 1,3-3,4 %.

Безусловный интерес для линейной СВПИ представляет влияние  $\Delta\varepsilon$  в реальных диапазонах изменений остальных оптических характеристик, определяющих погрешности, то есть  $\Delta\lambda$ ,  $\lambda_2$  и  $K_n$ . На рис. 3 представлены диапазоны изменений погрешностей СВПИ под воздействием указанных оптических характеристик для СВП-распределений, в том числе СВПав-распределения с  $\Delta\varepsilon = 0,3588-0,4661$ .

Анализ полученных закономерностей показывает, что общим для них является уменьшение погрешностей с повышением излучательной способности. Изменение  $\Delta\lambda$  в диапазоне от 0,1 до 0,3 мкм не влияет на погрешности. Ранее авторами было установлено, что при  $\Delta\lambda > 0,3$  мкм погрешности незначительно снижаются с увеличением  $\Delta\lambda$  за счет повышения относительной линейности.

С увеличением  $\lambda_2$  от 0,6 до 1,1 мкм погрешности снижаются от 0,5 до 0,2 и от 0,3 до 0,1 % соответственно для  $\Delta\varepsilon 0,2588-0,3661$  и  $0,7588-0,8661$ . Для СВПав-распределения погрешности СВПИ в этом случае уменьшаются от 0,4 до 0,1 %. Уменьшение методических погрешностей линейной СВПИ для наиболее распространенных в металлургии мате-

риалов с СВП-распределениями излучательной способности определяется их спектральными характеристиками. В видимом диапазоне эти распределения более нелинейны, чем в ближней инфракрасной области спектра. Например, с увеличением  $\lambda_2$  от 0,6 до 1,1 мкм рабочий спектральный диапазон СВПИ смещается на более линейный участок СВП-распределения с более низким  $K_n$ .

В линейной СВПИ  $K_n$  является наиболее существенной и определяющей погрешности характеристик спектральных распределений излучательной способности. Для СВПав-распределения с  $\Delta\varepsilon = 0,3588-0,4661$   $K_n = 0,0053$  и  $\delta_{\text{СВПИ}} = 0,5$  %. При уменьшении и увеличении  $K_n$  от реального значения  $K_n = 0,0053$  в 2 раза погрешности СВПИ соответственно снижаются и возрастают до 0,3 и 0,9 %. В этом же диапазоне изменений  $K_n$  погрешности СВПИ в области

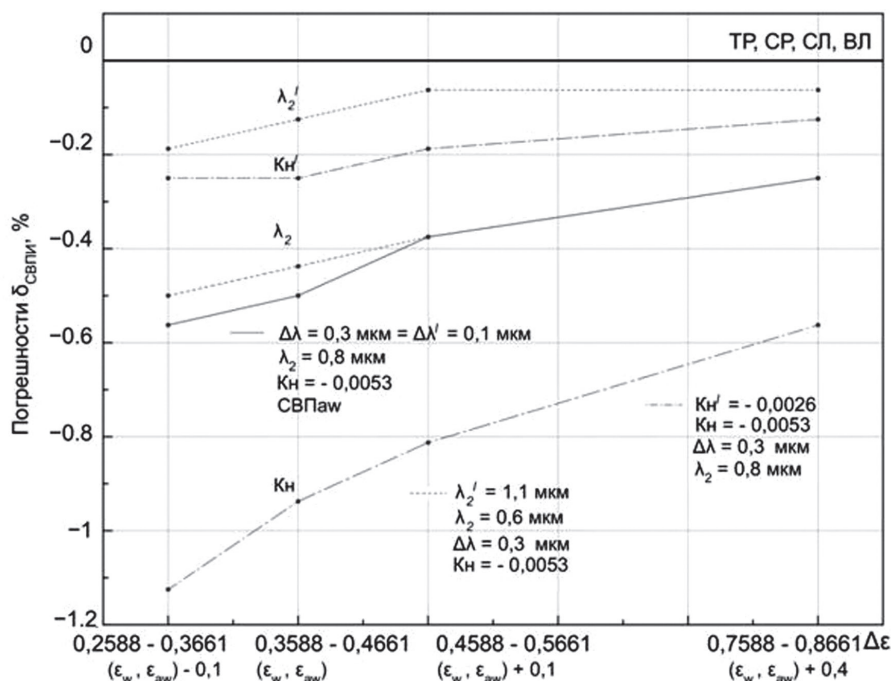


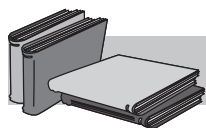
Рис. 3. Изменение погрешностей линейной СВПИ от  $\Delta\varepsilon$  в исследованных диапазонах  $\Delta\lambda$ ,  $\lambda_2$  и  $K_n$

низких и высоких значений излучательной способности соответственно находятся в пределах 0,3-1,3 и 0,1-0,6 %.

### Выводы

Таким образом, в результате исследований установлены закономерности влияния излучательной способности на основные в оптической термометрии методические погрешности линейной СВПИ в реальных диапазонах изменений остальных определяющих характеристик, в том числе спектрального диапазона, длины средней волны и коэффициента нелинейности. Исследования выполнены на наиболее распространенных и характерных для металлургических материалов СВП-распределениях излучательной способности, а также на возможных монотонных нелинейных СВГ-, ВВП- и ВВГ- и линейных ТР-, СР, СЛ- и ВЛ-распределениях. Погрешности линейной СВПИ равны нулю и независят от излучательной способности  $\Delta\varepsilon$ , что имеет явное преимущество по сравнению с классическими энергетическими одноцветовыми и спектрального отношения двухцветовыми, а также известными многоцветовыми методами пирометрии излучения. Это свидетельствует о перспективности разрабатываемых методов СВПИ.

Погрешности несут систематический характер, допускающий дополнительное повышение метрологических характеристик СВПИ введением температурных поправок; они минимальные в случае СВГ- и возрастают соответственно для СВГ-, ВВП- и ВВГ-распределений. С повышением излучательной способности в исследованном диапазоне ее значений погрешности трехволновой СВПИ (на  $\lambda_1 = 0,5$ ;  $\lambda_2 = 0,8$ ;  $\lambda_3 = 1,1$  мкм) уменьшаются от 0,6 до 0,3 (при 0,5 % для СВГw-распределения). Для аналогичных значений излучательной способности от 0,26 до 0,87 ее распределения и спектрального диапазона погрешности методов классической энергетической одноцветовой и спектрального отношения двухцветовой пирометрии излучения находятся в пределах 4-11 и 1,3-3,4 % соответственно. Погрешности известных методов многоцветовой пирометрии излучения в случае СВГw-распределения составляют 1,4-1,9 %.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Инновационные технологии многоцветовой термометрии // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2012. – № 73. – С. 45-51.
2. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Новые технологии многоцветового бесконтактного и световодного термоконтроля металлических сплавов // Металл и литье Украины. – 2012. – № 9. – С. 29-35.
3. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Симметрично-волновая многоцветовая термометрия металлургических объектов с неизвестной и случайно изменяющейся излучательной способностью // Там же. – 2012. – № 11. – С. 36-40.
4. Латыев Л. Н., Чеховской В. Я., Шестаков Е. Н. Теплофизика высоких температур. – М.: Энергия, 1969. – С. 666.
5. Latyev L. N., Chekhovskoi V. Ya., Shestakov E. N. High Temp / High Press. –1970. – V. 2. – P. 175.
6. Излучательные свойства твердых материалов: Справ. / Под ред. А. Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – С. 247.
7. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Исследование влияния термометрических характеристик металлических сплавов на погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения // Металл и литье Украины. – 2013. – № 3. – С. 21-26.

### Анотація

Жуков Л. Ф., Корнієнко А. Л.

Вплив випромінювальної здатності на систематичні похибки багатокольорової лінійної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання в металургії

Досліджено вплив абсолютних значень випромінювальної здатності на основні в оптичній термометрії методичні похибки багатокольорової лінійної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання з використанням найбільш вивчених оптичних характеристик вольфраму. Доведено перспективність, ефективність використання та високі метрологічні характеристики симетрично-хвильової пірометрії для термоконтроля найбільш поширених в металургії матеріалів з монотонними нелінійними спадаючими опуклими розподілами випромінювальної здатності. Встановлено, що в однакових складних термометричних умовах металургії похибки симетрично-хвильової термометрії нижчі за похибки класичної енергетичної однокольорової, спектрального відношення двокольорової та відомої багатокольорової пірометрії випромінювання відповідно в 13-18; 4-11 і 3-4 рази.

## Ключові слова

одно-, багатокольорова термометрія, температура випромінювання, симетрично-хвильова термометрія, температура об'єкту, випромінювальна здатність, спектральний розподіл

## Summary

Zhukov L. F., Kornienko A. L.

### Influence of emissivity on systematic errors of multicolor linear symmetric-wave radiation pyrometry in metallurgy

Investigated the effect of the absolute values of the emissivity on the main optical thermometry methodological errors of multicolor linear symmetric-wave radiation pyrometry with the use of the most investigated the optical characteristics of tungsten. Proved promising, efficiency and high metrological characteristics of symmetric-wave pyrometer for temperature control in the most common metallurgical materials with monotone convex nonlinear decaying distributions emissivity. Found that in the same difficult conditions thermometric metallurgy error symmetrical wave thermometry below errors onecolor classical energy, spectral ratio twocolor and famous multicolor pyrometric radiation respectively 13-18, 4-11 and 3-4.

## Keywords

one-, multicolor thermometry, temperature of radiation, symmetrical-wave thermometry, temperature of object, emissivity, spectral distribution

Поступила 29.01.13

**Предлагаем разместить в нашем журнале  
рекламу продукции или рекламного материала  
о Вашем предприятии**

## РАСЦЕНКИ НА РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ

(цены приведены с учетом налога на рекламу)

2, 3-я страницы обложки		страница внутри журнала	
цветная	1400 грн.	цветная	1050 грн.
черно-белая	700 грн.	черно-белая	500 грн.
1/2 страницы формата		1/2 страницы формата А4	
цветная	900 грн.	цветная	800 грн.
черно-белая	500 грн.	черно-белая	450 грн.
1/4 страницы формата		1/4 страницы формата А4	
цветная	550 грн.	цветная	300 грн.
черно-белая	300 грн.	черно-белая	200 грн.

При повторном размещении рекламы – скидка 15 %