

УДК 543.4: 533.3: 543.42.062

## РАЗРАБОТКА И АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДИКИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕДИ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Т.Ф. Рудомёткина\*, В.М. Иванов

(кафедра аналитической химии; \*e-mail: trudometkina@yandex.ru)

Разработана методика прямого фотометрического определения 0,025–1,000 мг/л меди в природных водах с помощью купризон. Ионы сопутствующих элементов маскируют введением цитрата аммония. Разработанная методика аттестована методом добавок и утверждена в качестве отраслевой.

**Ключевые слова:** медь, купризон, природные воды, фотометрическое определение.

Определение меди в природных водах – одна из актуальных задач. Содержание меди в природных и питьевых пресных водах составляет 2–30 мкг/л, а величина ПДК меди в природных водах – 0,1 мг/л. Источником загрязнения природных вод являются сточные воды горнорудной промышленности, гальванических производств, производства боеприпасов, эрозии трубопроводов и др. Миграционные процессы попадания ионов меди в природные воды связаны с присутствием цианидов, хлоридов, аммиакаатов и ряда органических лигандов. В то же время ионы меди являются одними из самых востребованных микроэлементов в процессах жизнедеятельности, входя в состав многих ферментов; отсутствие их нарушает синтез протеинов, витаминов, жиров, препятствует размножению растений.

Для определения меди в природных водах предложен ряд методов (атомно-абсорбционных, электрохимических, фотометрических), при использовании которых применяется различная аппаратура и инструментарий. Так, ГОСТ Р 54276-2010. «Вода. Методы определения меди» предлагает для определения 0,05–0,50 мг/л меди атомно-абсорбционный метод, где предусмотрены предварительная экстракция меди пирролидиндиотикарбаминовой кислотой, последующая минерализация органического реагента и определение в воздушно-ацетиленовом пламени. Метод с электротермической атомизацией предложен для определения 5–100 мкг/л меди. Среди органических реагентов для фотометрического определения меди наиболее селективным и чувствительным является купризон, используемый для определения меди в широком интервале ее содержания в объектах разного состава [1–8], в том числе для прямого определения 0,001–0,500% меди в сплавах на основе магния и алюминия [9].

Цель настоящей работы – разработка и аттестация фотометрического метода определения 0,025–1,000 мг/л меди купризоном в природных водах с минерализацией, не превышающей 1 г/л.

### Экспериментальная часть

**Растворы и реагенты.** Раствор меди (1 мг/мл) готовили из меди мет. ОСЧ 11–4 с дополнительной титриметрической стандартизацией в соответствии с ГОСТ [10] и кратным разбавлением до 5 мкг/мл.

Рабочий раствор купризон [бис-(циклогексанон-оксалилдигидразон)], «ч.д.а.» ТУ 6-09-14-1380-77 0,1%-й в 50%-м этаноле готовили растворением при нагревании 0,1 г препарата в 50 мл этанола и разбавлением водой до 100 мл. Кислотность создавали 1 М HCl и NH<sub>3</sub> (1:1) и контролировали стеклянным электродом (потенциометр «рН-340»). В качестве маскирующего и буферизирующего реагента использовали 10%-й раствор двузамещенного цитрата аммония «ч.д.а.». Оптическую плотность измеряли на фотометре «КФК-3Ц» в стеклянных кюветах с толщиной слоя 3–5 см.

### Результаты и их обсуждение

**Оптимальные условия образования комплекса.** Ионы меди взаимодействуют с купризоном в слабощелочной среде ( $pH_{\text{опт.}} = 8,9–9,1$ ) с образованием интенсивно окрашенного соединения синего цвета с максимумом поглощения при 590 нм ( $\epsilon_{\text{опт.}} = 1,3 \times 10^4$ ). Устойчивый не менее двух часов комплекс количественно образуется в течение 40–45 мин при 10-кратном избытке реагента. Нижняя граница определяемого содержания меди 0,1 мкг/мл. Закон Бера выполняется при содержании меди 2,5–20 мкг в 25 мл. Определению 5 мкг меди не мешают

Т а б л и ц а 1

**Результаты анализа проб для интервала содержания меди менее 0,05 мг/л;  $\sigma_{D,r}(\Delta) = 30\%$ ;  
общая минерализация проб составила ( $C_{\text{минер}}$ , г/л : А – 0,3; Б – 1,05)**

Проба воды	Объем анализируемой воды, мл + добавка меди, мкг ( $C_{\text{доб}}$ , мг/л)	Получено, добавка $C_j$ , мг/л	$ C_j - \bar{C}  \times 10^3$	$(C_j - \bar{C})^2 \times 10^6$
А	200 + 5 (0,025)	0,020; 0,018; 0,028; 0,030; 0,021; 0,030; 0,016; 0,018 $\bar{C} = 0,0226$	2,6; 4,6; 5,4; 7,4; 1,6; 7,4; 6,6; 4,6	6,76; 21,16; 29,16; 54,76; 2,56; 54,76; 43,56; 21,16 $\Sigma = 233,88$
Б	250 + 10 (0,040)	0,037; 0,038; 0,041; 0,0415; 0,0425; 0,033 0,035; 0,036 $\bar{C} = 0,038$	1,0; 0; 3,0; 3,5; 4,5; 5,0; 3,0; 2,0	1,0; 0; 9,0; 12,25; 20,25; 25,0; 9,0; 4,0 $\Sigma = 80,5$

Примечания. А.  $d = (C_{\text{доб}} - \bar{C}) = 0,0024$ ;

$d_r = 2,4 \times 10^{-3} \times 100 / 2,5 \times 10^{-2} = -9,6\%$  ( $\sigma_{D,r}(\Delta) = 30\%$ ;  $d_r = -9,6\% \leq 1/3 \sigma_{D,r}(\Delta)$ , поэтому по критерию «ничтожной погрешности» систематическая составляющая погрешности на фоне допустимого среднего квадратичного отклонения относительной погрешности (для данного интервала) незначима и ею можно пренебречь).

Выборочная дисперсия, характеризующая воспроизводимость определений:

$$\sigma_{bm} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (C_j - \bar{C})^2 / m - 1} = \sqrt{0,0002339/7} = 5,78 \times 10^{-3};$$

$$\sigma_{bm,r} = 5,78 \times 10^{-3} \times 100 / 22,6 \times 10^{-3} = 25,6\%; Z = 30 / 25,6 = 1,17,$$

$$\text{где } Z - \text{запас точности; } t_{\text{экс}} = d_r \times \sqrt{n} / \sigma_{bm,r} = 9,6 \times 2,83 / 25,6 = 1,06 < t_{\text{ст}} = 2,37.$$

Систематическая погрешность незначима для данного уровня значимости и при данном числе степеней свободы, и по критерию Стьюдента.

$$\text{Б. } d = (C_{\text{доб}} - \bar{C}) = 0,002; d_r = 2,0 \times 10^{-3} \times 100 / 4,0 \times 10^{-2} = -5,0\%; d_r = -5,0\% \leq 1/3 \sigma_{D,r}(\Delta).$$

Систематическая погрешность незначима – ею можно пренебречь.  $\sigma_{bm} = \sqrt{0,000081/7} = 3,4 \times 10^{-3}$ ;

$$\sigma_{bm,r} = 3,4 \times 10^{-3} \times 100 / 38,0 \times 10^{-3} = 8,9\%; Z = 30 / 8,9 = 3,37;$$

$$t_{\text{экс}} = d_r \times \sqrt{n} / \sigma_{bm,r} = 5,3 \times 2,83 / 8,9 = 1,69 < t_{\text{ст}} = 2,37.$$

Систематическая погрешность незначима и ею можно пренебречь.

более чем 2500-кратный избыток ионов алюминия, магния и кальция и 100-кратный избыток железа(III). При более высоком содержании ионов железа(III) для устранения его влияния строят градуировочный график на фоне такого же содержания железа. Ионы других металлов, содержащиеся в природных и питьевых водах, не мешают определению меди.

**Методика определения.** Аликвотную часть исследуемой воды 100–500 мл, содержащую 3–20 мкг меди, упаривают до влажных солей, добавляют 1 мл конц.  $\text{HNO}_3$ , несколько капель  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1:1) и упаривают до выделения паров  $\text{SO}_3$ . Остаток солей может иметь желтоватый цвет (но не черный или коричневый, что свидетельствует о наличии несгоревших органических соединений; в этом случае обработку азотной кислотой и упаривание до паров  $\text{SO}_3$  необходимо повторить). Соли охлаждают, растворяют в воде с до-

бавлением 1–2 капель конц.  $\text{HCl}$  при нагревании и количественно переносят в мерную колбу емкостью 25 мл (объем раствора не должен превышать 15–17 мл). При наличии нерастворимого осадка его необходимо отфильтровать. Если при этом объем раствора с промывными водами превысит 17–20 мл, то фотометрическую реакцию необходимо проводить в мерных колбах емкостью 50 мл, построив соответствующий градуировочный график для расчета содержания меди. К полученному раствору добавляют 5 мл 10%-го раствора цитрата аммония и 2,0 мл раствора куприона. Раствор переносят в стакан емкостью 30–50 мл и при перемешивании добавляют по каплям раствор аммиака до pH 9,00–9,05 (контроль по pH-метру). Полученный раствор переносят в ту же мерную колбу емкостью 25 мл, обмывая электроды водой, разбавляют до метки и перемешивают. Через 40–45 мин измеряют опти-

Т а б л и ц а 2

Результаты анализа проб для интервала содержания меди 0,05–0,1 мг/л  
( $\sigma_{D,r}(\Delta) = 15\%$ ; общая минерализация проб ( $C_{\text{минер}}$ ) составила, г/л: А – 0,5; Б – 0,3)

Проба воды	Объем анализируемой воды, мл + добавка меди, мкг ( $C_{\text{доб}}$ , мг/л)	Получено, добавка $C_j$ , мг/л	$ C_j - \bar{C}  \times 10^3$	$(C_j - \bar{C})^2 \times 10^6$
А	Колодец Добря 200 + 10 (0,050)	0,052; 0,049; 0,046; 0,047	2,7; 0,3; 3,3; 2,3; 4,7	7,29; 0,09; 10,89 5,29; 22,09
Б	Пушкинский колодец 200+10 (0,050)	0,054; 0,052; 0,049; 0,048; 0,047 $\bar{C} = 0,0493$	4,7; 2,7; 0,3; 1,3; 2,3	22,09; 7,29; 0,09; 1,69; 5,29 $\Sigma = 60,01$

Примечания. А.  $d = (C_{\text{доб}} - \bar{C}) = 0,0007$ ;  $d_r = 7 \times 10^{-4} \times 100/5,0 \times 10^{-2} = -1,4\%$ ;  $d_r = -1,4\% \leq 1/3 \sigma_{D,r}(\Delta) = 15/3 = 5\%$ . Систематическая погрешность незначима;  $\sigma_{bm} = \sqrt{0,00006/8} = 2,7 \times 10^{-3}$ ; Б.  $\sigma_{bm,r} = 2,7 \times 10^{-3} \times 100/49,3 \times 10^{-3} = 5,5\%$ ;  $Z = 15/5,5 = 2,73$ ;  $t_{\text{экс}} = d_r \times \sqrt{n}/\sigma_{bm,r} = 1,4 \times 3/5,5 = 0,76 < t_{\text{ст}} = 2,31$ . Систематическая погрешность незначима и ею можно пренебречь.

ческую плотность раствора при 590 нм в кювете 3–5 см относительно воды.

**Построение градуировочного графика.** В стаканы емкостью 50 мл вводят 0; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 и 4,0 мл стандартного раствора меди, содержащего 5 мкг/мл Cu (0; 2,5; 5,0; 10,0; 15,0 и 20,0 мкг), приливают 5 мл раствора цитрата аммония и 2,0 мл раствора куприона, разбавляют водой до ~20 мл и добавляют по каплям раствор аммиака до pH 9,05 по pH-метру. Полученные растворы количественно переносят в мерные колбы емкостью 25 мл, разбавляют до метки водой, перемешивают и оставляют на 40–45 мин для развития окраски. Оптическую плотность измеряют на фотометре при 590 нм относительно воды в тех же условиях, что и при анализе проб.

**Аттестация методики.** В соответствии с документом Минприроды ОСТ 41-08-295-99 [13] в качестве показателя точности аттестуемой методики [12, 13], характеризующего гарантируемую точность, принимают значение  $\sigma_{D,r}(\Delta) = \sigma_{\Sigma,r}$  соответствующее установленной категории точности анализа, при условии незначимости систематической составляющей погрешности  $d_r$  на фоне значения  $\sigma_{D,r}(\Delta)$ ;  $\sigma_{\Sigma,r}$  – суммарное среднее квадратичное отклонение относительной погрешности (показатель точности);  $\sigma_{bm,r}$  – среднее квадратичное отклонение относительной случайной составляющей погрешности, характеризующее воспроизводимость результатов анализа (показатель воспроизводимости).

Дисперсия, характеризующая разброс экспериментальных данных  $\sigma_{\Sigma}^2$ , складывается из  $\sigma_b^2$  –

дисперсии сходимости  $\sigma_c^2$  – дисперсии избирательности а также  $\sigma_m^2$  – дисперсии, обусловленной неконтролируемыми факторами:  $\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_b^2 + \sigma_c^2 + \sigma_m^2$ . Если принять  $\sigma_b^2 + \sigma_m^2 = \sigma_{bm}^2$  и обозначить ее как дисперсию воспроизводимости, то  $\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{bm}^2 + \sigma_c^2$ . Если не выявлены отклонения в результатах анализа, связанные с дисперсией избирательности, то значения  $\sigma_{bm}^2$  приравнивают к  $\sigma_{\Sigma}^2$ .

Для аттестации методики весь определяемый интервал концентрации меди разделили на четыре интервала, чтобы внутри каждого интервала дисперсию считать однородной. Необходимо оценить случайную и систематическую составляющие измерений по аттестуемой методике. Для этого проводили исследование в целях установления показателей точности измерения и их соответствие установленным нормам точности для каждого из интервалов концентрации [11, 12]. В качестве изучаемых проб использовали воды Пушкинского колодца, р. Учи, колодца пос. Добря, водопроводной воды с общей минерализацией от 0,30 до 1,05 г/л и анализировали их в разное время несколькими партиями для получения оценки воспроизводимости измерений. Для оценки характеристик погрешности использовали метод добавок стандартного раствора меди к пробам анализируемых вод. Например, для интервала содержания меди менее 0,5 мг/л провели 8 определений меди в пробах воды Пушкинского колодца, используя для анализа 200–250 мл воды. Среднее содержание меди не превышало 0,010 мг/л ( $n = 8$ ). В каждую из 8 проб воды объемом 200 мл добав-

Т а б л и ц а 3

Результаты анализа проб для интервала содержания меди 0,1–0,5 мг/л;  $\sigma_{D,r}(\Delta) = 15\%$  (р. Уча,  $C_{\text{минер.}} = 1,05$  г/л)

Проба	Объем анализируемой воды р. Уча, мл + добавка меди, мкг ( $C_{\text{доб.}}$ мг/л)	Получено, добавка $C_j$ , мг/л	$ C_j - \bar{C}  \times 10^3$	$(C_j - \bar{C})^2 \times 10^6$
А	100+10 (0,100)	0,095; 0,105; 0,109; 0,092; 0,101; 0,110; 0,112; 0,090 $\bar{C} = 0,102$	0,7; 0,3; 0,7; 1,0; 0,1; 0,8; 1,0; 1,2	0,49; 0,09; 0,49; 1,0; 0,01; 0,64; 1,0; 0,64; 1,44 $\Sigma = 5,8$
Б	50+20 (0,400)	0,408; 0,396; 0,432; 0,420; 0,372; 0,430; 0,408; 0,384 $\bar{C} = 0,406$	0,2; 1,0; 2,6; 1,4; 0,8; 3,4; 0,2; 2,2	0,04; 1,0; 6,76; 1,96; 0,64; 11,56; 0,04; 4,84 $\Sigma = 26,84$

Примечание. А.  $d = (C_{\text{доб.}} - \bar{C}) = 0,002$ ;  $d_r = 2 \times 10^{-3} \times 100/0,100 = 2,0\%$ .  $d_r = 2,0\% \leq 1/3 \sigma_{D,r}(\Delta) = 15/3 = 5\%$ ; Систематическая погрешность незначима.  $\sigma_{bm} = \sqrt{0,00058/7} = 0,91 \times 10^{-2}$ ;  $\sigma_{bm,r} = 0,91 \times 10^{-2} \times 100/0,102 = 8,9\%$ ;  $Z = 15/8,9 = 1,69$ ;  $t_{\text{экс}} = d_r \times \sqrt{n}/\sigma_{bm,r} = 2,0 \times 2,83/8,9 = 0,64 < t_{\text{кр}} = 2,37$ . Систематическая погрешность незначима. Б.  $d = (C_{\text{доб.}} - \bar{C}) = 0,006$ ;  $d_r = 6 \times 10^{-3} \times 100/0,400 = 1,5\%$ ;  $d_r = 1,5\% \leq 1/3 \sigma_{D,r}(\Delta) = 15/3 = 5\%$ . Систематическая погрешность незначима и ею можно пренебречь.  $\sigma_{bm} = \sqrt{0,002684/7} = 1,96 \times 10^{-2}$ ;  $\sigma_{bm,r} = 1,96 \times 10^{-2} \times 100/0,406 = 4,83\%$ ;  $Z = 15/4,83 = 3,10$ ;  $t_{\text{экс}} = d_r \times \sqrt{n}/\sigma_{bm,r} = 1,96 \times 2,83/4,83 = 1,15 < t_{\text{кр}} = 2,37$ . Систематическая погрешность незначима и ею можно пренебречь.

Т а б л и ц а 4

Результаты анализа проб для интервала содержания меди более 0,5 мг/л,  $\sigma_{D,r}(\Delta) = 10\%$ ;  $C_{\text{минер.}}$  г/л: 1,05 (р. Уча); 0,32 (водопроводная вода)

Проба воды	Объем анализируемой воды, мл + добавка меди, мкг ( $C_{\text{доб.}}$ мг/л)	Получено, добавка $C_j$ , мг/л	$ C_j - \bar{C}  \times 10^3$	$(C_j - \bar{C})^2 \times 10^6$
А	25+15 (0,600)	0,620; 0,630; 0,575; 0,580; 0,590; 0,560; 0,640; 0,620 $\bar{C} = 0,602$	18; 28; 27; 22; 12; 42; 38; 18	324; 784; 729; 484; 144; 1764; 1444; 324 $\Sigma = 5997$
Б	25+25 (1,000)	0,970; 0,960; 0,985; 0,995; 1,025; 0,950; 1,010; 1,005 $\bar{C} = 0,988$	18; 28; 3; 7; 37; 38; 22; 17	324; 784; 9; 49; 1369; 1444; 484; 289 $\Sigma = 4752$

Примечание. А.  $d = (C_{\text{доб.}} - \bar{C}) = 0,0002$ ;  $d_r = 0,002 \times 100/0,600 = 0,33\%$ ;  $d_r = 0,33\% \leq 1/3 \sigma_{D,r}(\Delta) = 3,33\%$ . Систематическая погрешность незначима.  $\sigma_{bm} = \sqrt{0,005997/7} = 2,9 \times 10^{-2}$ ;  $\sigma_{bm,r} = 2,9 \times 10^{-2} \times 100/0,602 = 4,8\%$ ;  $Z = 10/4,8 = 2,1$ ;  $t_{\text{экс}} = d_r \times \sqrt{n}/\sigma_{bm,r} = 0,33 \times 2,83/4,8 = 0,2 < t_{\text{кр}} = 2,37$ . Систематическая погрешность незначима и ею можно пренебречь. Б.  $d = (C_{\text{доб.}} - \bar{C}) = 0,012$ ;  $d_r = 0,012 \times 100/1,000 = 1,2\%$ ;  $d_r = 1,2\% \leq 1/3 \sigma_{D,r}(\Delta) = 3,33\%$ . Систематическая погрешность незначима и ею можно пренебречь.  $\sigma_{bm} = \sqrt{0,004752/7} = 0,026$ ;  $\sigma_{bm,r} = 0,026 \times 100/0,988 = 2,6\%$ ;  $Z = 10/2,6 = 3,8$ ;  $t_{\text{экс}} = d_r \times \sqrt{n}/\sigma_{bm,r} = 1,2 \times 2,83/2,6 = 1,3 < t_{\text{кр}} = 2,37$ . Систематическая погрешность незначима и ею можно пренебречь.

ляли по 5,0 мкг меди (в добавке 0,025 мг/л), и проанализировали полученные пробы.

Результаты расчета случайной и систематической погрешностей представлены в табл. 1. Общая минерализация проб ( $C_{\text{минер.}}$ ) составила 0,3 г/л.

Для интервала содержания 0,05–0,1 мг/л было использовано четыре пробы воды пос. Добряя ( $C_{\text{минер.}} = 0,5$  г/л), содержащей 0,047 мг/л меди ( $n = 8$ ) и пять проб воды, содержащей 0,010 мг/л меди ( $n = 8$ ) (табл. 2). Данные для содержания

Т а б л и ц а 5

## Метрологические характеристики методики

Интервал содержания, мг/л	Относительное среднее квадратичное отклонение, %		Запас точности, Z
	$\sigma_{D,r}(\Delta)$ (норматив)	$\sigma_{\Sigma,r}$	
<0,05	30	25,6	1,2
0,05–0,1	15	5,5	2,7
0,1–0,5	15	8,4	1,8
>0,5	10	4,8	2,1

Методика аттестована по III категории точности и утверждена в качестве отраслевой Минприроды.

меди 0,1–0,5 мг/л и более 0,5 мг/л приведены в табл. 3, 4 соответственно. Метрологические

характеристики разработанной методики приведены в табл. 5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коростелев П.П. Реактивы для технического анализа. Справочник. М., 1988. С. 125.
2. Лазарев А.И. Органические реактивы в анализе металлов. Справочник. М., 1980. 231 с.
3. Умланд Ф., Янсен А., Тириг Д., Вюни Г. Комплексные соединения в аналитической химии. М., 1975. 531 с.
4. Элвелл В.Т., Вуд Д.Ф. Анализ новых металлов. Титан, цирконий, гафний, ниобий, тантал, вольфрам и их сплавы. М., 1970. 220 с.
5. Хольцбежер З., Дивизи Л., Крал М., Шуца Л., Влачил Ф. Органические реагенты в неорганическом анализе. М., 1979. С. 403.
6. ГОСТ 1293.2-83. Сплавы свинцово-сурьмянистые. Методы определения меди.
7. ГОСТ 1652.1-77. Сплавы медно-цинковые. Методы определения меди.
8. Камаева Л.В., Зобнина Н.А., Чечулина Л.В., Махнева В.П. Стандартные образцы в черной металлургии. М., 1976. С. 63.
9. Рудомёткина Т.Ф., Чернова И.Б., Орлов В.В. // Заводская лаборатория. 1987. Т. 53. № 9. С. 16.
10. ГОСТ 25794. 2-83. Методы приготовления титрованных растворов.
11. ГОСТ 27384-2002. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств.
12. Разработка, аттестация и утверждение методик анализа подземных вод. НСАМ. Гидрохимические методы. Методические указания № 37. М., 1988. 56 с.
13. ОСТ 41-08-205-99 УКАР. Методики количественного химического анализа. Разработка, аттестация, утверждение. М., 1999. 96 с.
14. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.
15. ГОСТ 8.556-91 ГСИ. Методики определения состава и свойств проб воды. Общие требования к разработке.

Поступила в редакцию 10.04.15

## DEVELOPMENT AND ATTESTATION OF METHOD PHOTOMETRIC DETERMINATION COPPER IN NATURAL WATERS

T.F. Rudomyotkina\*, V.M. Ivanov

(Division of Analytical Chemistry; \*e-mail: trudometkina@yandex.ru)

The photometric method has been developed for copper determination in natural waters with reagent cuprizon (bis-ciclogecsanonocsalyldigydrizon). The interfere ions has been masked of addition ammonium citrate. The method has been attested by Additions Standart Method for copper concentration range of 0,025–1 mg/L and confirmed, as branch.

**Key words:** copper, cuprizon, natural waters, photometric determination.

**Сведения об авторах:** Рудомёткина Татьяна Федоровна – ассистент кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (trudometkina@yandex.ru); Иванов Вадим Михайлович – профессор кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук.