

УДК 551.510.535:550.338

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НОРМАЛИЗАЦИИ И КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОЦИФРОВКИ ОТСКАНИРОВАННЫХ ИОНОГРАММ

Д.С. Демин

Поступила в редакцию 30.12.2016 г.

Рассматриваются методы обработки и анализа изображений, позволяющие автоматизировать процесс оцифровки отсканированных ионограмм, полученных при сохранении информации путем электрохимической печати. Предложены методы компенсации аффинных преобразований (трансляция, масштабирование, поворот и скос изображения), сопровождавших процесс регистрации информации на бумаге и последующее сканирование, а также метод распознавания цифровой маркировки ионограммы. Предлагаемые методы основываются на методах морфологического анализа изображений. В вычислительном эксперименте продемонстрирована устойчивость предлагаемых методов к аддитивным шумам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оцифровка ионограмм, морфологический анализ изображений, электрохимическая печать

1. ВВЕДЕНИЕ

Уникальная информация о состоянии ионосферы, полученная по результатам экспериментов с космических аппаратов с ионозондами на борту, таких как «Интеркосмос 19» в 1979 -1983 гг и «Космос 1809» в 1987 году, была сохранена в виде ионограмм на электрохимической бумаге (ЭХБ) либо на магнитных лентах. Ионограммы, записанные на магнитных лентах, с развитием вычислительной техники были переведены в электронный вид, в программы их обработки добавлены системы интерактивного анализа оператором. Эта информация активно используется для создания моделей ионосферы, описания морфологических характеристик как климатических ионосферных явлений, так и неоднородностей различного вида, имеющих различные причины их проявления. Ионограммы, записанные на ЭХБ, во многом не были обработаны комплексно, как непрерывный массив, что связано со значительной трудоемкостью ручной обработки. Эта архивная информация несет огромный потенциал в области анализа и моделирования ионосферной плазмы. Особенно это относится к труднодоступным районам над океанами, Арктикой и Антарктикой. Добавим, что ЭХБ, имеет ограниченный срок хранения, и существует опасность потерять результаты этих уникальных экспериментов. Все вышесказанное определило актуальность задачи оцифровки имеющегося массива.

2. ОПИСАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Исходные ионограммы являются результатом черно-белой электрохимической печати на листах изначально белой импульсной электрохимической (пропитанной электролитом) бумаги ЭХБ-И шириной 200 мм с помощью устройства электрохимической печати БРИС-I [1]. Изображение в устройстве электрохимической печати получается с помощью непрерывного протягивания полосы бумаги, покрытой чувствительным к электрическому току составом, мимо многоэлектродного блока головки (катода), состоящего из 244 записывающих электродов, касающихся бумаги и расположенных по прямой линии перпендикулярно направлению движения бумажного носителя, и общего пишущего вала (анода), расположенного аналогично записывающим электродам с другой стороны листа от них (см. рис. 1).

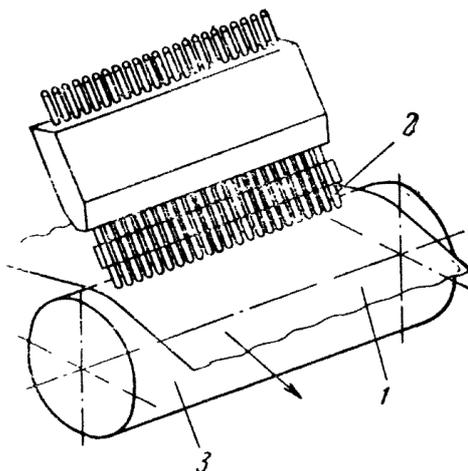


Рис. 1. Конструкция электродов в электрохимическом регистрирующем устройстве с параллельным формированием строк разложения. 1-бумага, 2-записывающий электрод, 3-общий электрод.
Иллюстрация взята из [2]

При необходимости формирования черной точки на между одним из электродов катода и анодом создается разность потенциалов. Электрический ток, проходя через электролит, пропитывающий бумагу, вызывает электрохимическую реакцию, в результате чего выпадает нерастворимый осадок, окрашивающий малую окрестность точки приложения напряжения в черный цвет. Результирующее изображение оказывается чем-то похоже на распечатанное на матричном принтере в том смысле, что информация на нем оказывается представлена в форме крупных различимых глазом точек черного цвета и овальной формы, размер которых вдоль направления протягивания бумажной полосы (примерно 1 мм) превышает размер вдоль перпендикулярного направления (порядка 0.7 мм – расстояния между электродами).

Для перевода информации с бумаги в электронный вид был применен планшетный сканер HP LaserJet M1120MPF. Сканирование проводилось в режиме градаций серого (grayscale) с разрешением 300 dpi (точек на дюйм) в файлы изображений формата PNG размера 3480×2550 пикселей с глубиной градаций серого 8 бит. Поскольку при сканировании не использовались какие-либо дополнительные приспособления или направляющие для ориентации листа бумаги, лист оказывается ориентирован в поле сканирования вольным образом. Основным критерием при сканировании был тот факт, чтобы информативная часть распечатанного изображения ионограммы оказалась сохранена в файл, при этом ориентации результирующего изображения особого внимания уделено не было (см. рис. 2).

Исходные данные, таким образом, поражены следующим набором искажений:

- при сканировании лист электрохимической бумаги был ориентирован относительно поля регистрации сканера с искажениями поворота и трансляции
- графическая информация, наносимая с помощью электрохимического регистрирующего устройства, оказывается не выровнена относительно листа бумаги, и изначально была записана со скосом (координатные оси на изображении оказываются не перпендикулярны друг другу). По всей видимости, это связано с недостатками механизма протягивания бумаги электрохимического регистрирующего устройства.
- неравномерность контрастности изображения в пределах одного документа. Эта неравномерность может быть связана с особенностями электрохимического регистрирующего устройства, к примеру, с неплотностью прилегания некоторых записывающих электродов, неравномерностью пропитки бумаги электролитом или изменением плотности электрического тока через электролит в зависимости от числа активных в каждый отдельно взятый момент времени записывающих электродов. Последней причиной, в частности, объясняется уменьшение локального контраста изображения в областях с большей концентрацией черных точек, например, в правой части рис. 2.

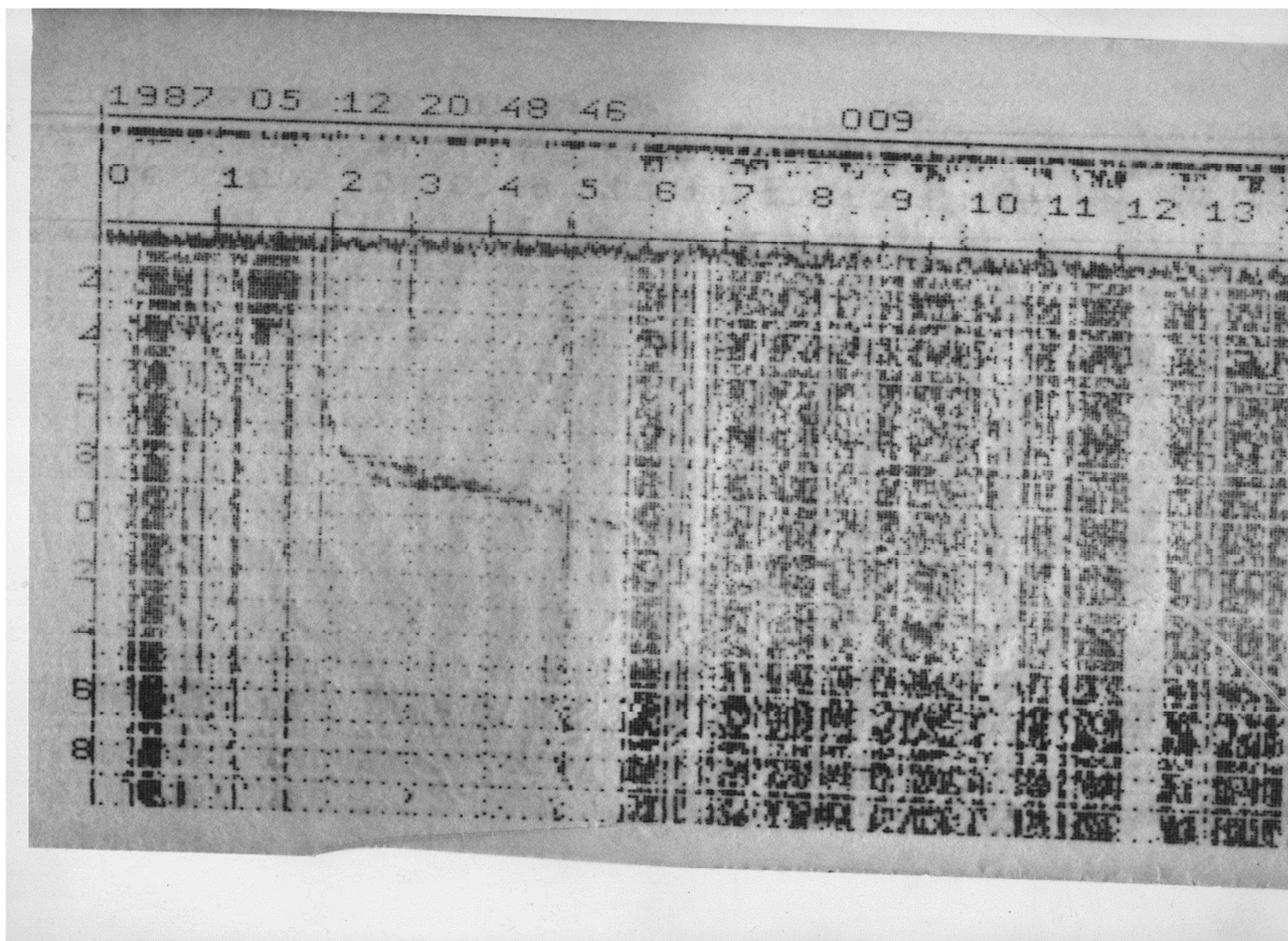


Рис. 2. Типичный пример изображения исходных данных.

- неравномерное изменение степени белизны фона, всевозможные замятия и разрывы, связанные с длительным хранением бумажных материалов с момента изготовления до момента сканирования.

3. РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

По предоставленному изображению ионограммы требуется

- оценить углы поворота и скоса изображения и нормализовать изображение
- оценить размеры точки, наносимой методом электрохимической печати
- оценить положение маски ионограммы
- распознать цифры маркировки ионограммы, состоящую из даты и времени ее регистрации, а также порядкового номера ионограммы в серии (маркировку можно видеть в верхней части рис. 2.).

4. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

4.1. МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УГЛОВ ПОВОРОТА И СКОСА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для оценки параметров искажений, связанных с поворотом и скосом изображения, воспользуемся методами морфологического анализа изображений [3]. Морфологические (основанные на понятии формы), методы анализа данных, таких как, например, изображения или сигналы – это математические методы, направленные на решение задач узнавания, классификации физических объектов, оценки их параметров, выделения отличий, не связанных с изменением условий регистрации. В отличие от большинства существующих методов распознавания образов,

направленных на извлечение специальных признаков объектов, морфологические методы в значительной степени используют математическую модель, связывающую объект анализа с физической реальностью и инвариантную по отношению к изменению условий регистрации свойств и характеристик объекта. Максимальный инвариант условий наблюдения называется формой изображения, поэтому методы анализа изображений в терминах их формы и называются морфологическими. Морфологические методы успешно применялись для решения следующих задач:

- задач подавления помех на кусочно-постоянном изображении [4];
- задач выделения неизвестного объекта на известном (с точностью до изменений условий регистрации изображения) фоне [5];
- задач сжатия изображений
- задач оценивания параметров объектов по их изображениям [6], [7].

Сначала рассмотрим морфологический метод оценки параметра угла поворота изображения, состоящего из полос одинаковой яркости. Воспользуемся моделью изображения как функции $f(\mathbf{x}): \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^1$, $f(\cdot) \in L^2(\mathbf{R}^2)$ зависимости яркости от двумерного вектора $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^2$ двумерного евклидова пространства \mathbf{R}^2 , $L^2(\mathbf{R}^2)$ - гильбертово пространство измеримых с квадратом функций. Будем считать, что $f(\mathbf{x}) = 0$ везде, кроме поля зрения X - области $X = \left[-\frac{w}{2}, \frac{w}{2}\right] \times \left[-\frac{h}{2}, \frac{h}{2}\right] \subset \mathbf{R}^2$, имеющего прямоугольную форму шириной w и высотой h , $w > h$

Зададим форму изображения параметрически как множество изображений [8], состоящих из прямых линий шириной 1 пиксел и расположенных под углом, являющимся параметром формы:

$$V(\alpha) = \left\{ f(\cdot): f(\mathbf{x}) = \sum_{i=-\sqrt{w^2+h^2}/2}^{\sqrt{w^2+h^2}/2} c_i \chi_i(\mathbf{x}), \quad c_i \in \mathbf{R}^1 \right\},$$

$$\chi_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & x_2 \cos \alpha + x_1 \sin \alpha \in \left[i - \frac{1}{2}, i + \frac{1}{2}\right], \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$\alpha \in [-\alpha_{max}, \alpha_{max}]$ – диапазон изменения угла, c_i – яркости полос.

Данное множество является линейным подпространством пространства $L^2(\mathbf{R}^2)$. Для оценки параметра по форме изображения воспользуемся методом наименьших квадратов, то есть будем искать такое значение параметра угла α , при котором наиболее близкий элемент $g(\cdot)$ множества $V(\alpha)$ будет наилучшим в $L^2(\mathbf{R}^2)$ образом приближать предоставленное изображение $\xi(\cdot)$:

$$\alpha^* = \arg \inf_{\alpha} \inf_{g(\cdot) \in V(\alpha)} \|\xi(\cdot) - g(\cdot)\|,$$

где $\|\cdot\|$ здесь и далее обозначена норма в соответствующем пространстве.

Задача поиска точной нижней грани по элементам множества $V(\alpha)$ в задаче выше всегда имеет единственное решение в силу того, что осуществляется минимизация выпуклого функционала на выпуклом замкнутом множестве. Вся же задача в совокупности имеет решение всегда, но это решение может оказаться не единственным, поскольку, фактически осуществляется поиск ближайшего к $\xi(\cdot)$ элемента объединения $\bigcup_{\alpha \in [-\alpha_{max}, \alpha_{max}]} V(\alpha)$ линейных подпространств, а данное объединение подпространств может оказаться невыпуклым множеством. Далее будем предполагать, что, решение этой задачи единственное в силу того, что практически для нашей задачи α_{max} не превышает $5 - 10^\circ$, и вычислительные эксперименты показали, что в этом диапазоне для наших данных функцию $Q(\alpha) = \inf_{g(\cdot) \in V(\alpha)} \|\xi(\cdot) - g(\cdot)\|$ можно считать унимодальной.

При фиксированном α минимизация при решении задачи $g(\cdot)_\alpha^* = \arg \inf_{g(\cdot) \in V(\alpha)} \|\xi(\cdot) - g(\cdot)\|$ фактически осуществляется по значениям коэффициентов $c_i \in \mathbf{R}^1$ разложения $g(\mathbf{x}) = \sum_{i=-\sqrt{w^2+h^2}/2}^{\sqrt{w^2+h^2}/2} c_i \chi_i(\mathbf{x})$. Решение этой задачи дается формулой [3]

$$c_i = \frac{\langle \xi(\cdot), \chi_i(\cdot) \rangle}{\|\chi_i(\cdot)\|^2},$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ здесь и далее обозначено скалярное произведение в соответствующем пространстве.

Для численной реализации предложенного метода в ЭВМ будем рассматривать представленное изображение как вектор $\xi \in \mathbf{R}^{w \times h}$ с $w \times h$ координат, где w и h – соответственно, ширина и высота изображения в пикселях, евклидова пространства $\mathbf{R}^{w \times h}$ с координатами $x_{i,j}$, $i = 1, \dots, w$, $j = 1, \dots, h$, соответствующими яркости пиксела с индексами (i, j) .

В численной реализации вычисления значения функции $Q(\alpha)$ оказывается удобно использовать преобразование Радона [9],[10]. Преобразованием Радона функции двух действительных переменных $f(x, y)$ называется функция

$$R_f(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \alpha - z \sin \alpha, s \sin \alpha + z \cos \alpha) dz$$

имеющую смысл интеграла от двумерной функции вдоль прямой, перпендикулярной вектору $\mathbf{n} = (\cos \alpha, \sin \alpha)$ и проходящей на расстоянии s от начала координат (см. рис. 3).

Преобразование Радона позволяет быстро вычислять скалярные произведения (ξ, χ_i) и нормы $\|\chi_i\|^2$ с помощью стандартной библиотечной функции, имеющейся в большом числе прикладных математических пакетов, например, MATLAB:

$$(\xi, \chi_i) = \int_{i-1/2}^{i+1/2} R_{\xi}(s, \alpha) ds$$

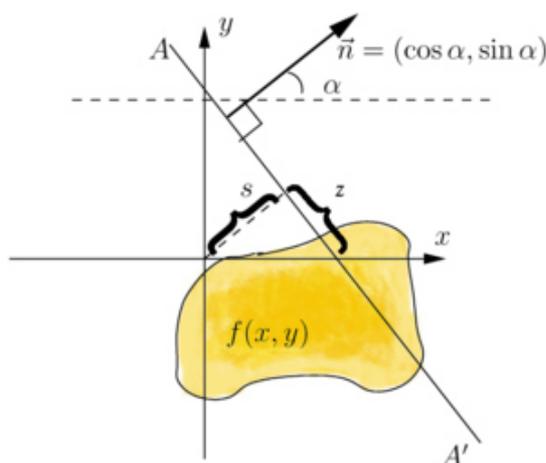


Рис. 3. Двумерное преобразование Радона. В данном случае

$R(s, \alpha)$ есть интеграл от $f(x, y)$ вдоль прямой AA' . Изображение взято из [https://en.wikipedia.org/wiki/Radon_transform].

С использованием преобразования Радона значение функции $Q(\alpha)$ можно вычислить сразу для набора значений аргумента с помощью всего двух преобразований Радона для предоставленного изображения $\xi(\cdot)$, и изображения $1(\cdot)$: $\forall \mathbf{x}, 1(\mathbf{x}) = 1$ – тождественно равно единице:

$$Q(\alpha) = \inf_{g(\cdot) \in V(\alpha)} \|\xi(\cdot) - g(\cdot)\| = \sum_{i=1 \dots w, j=1 \dots h} \xi_{i,j}^2 - \frac{\sqrt{w^2+h^2}}{2} \sum_{i=-\frac{\sqrt{w^2+h^2}}{2}}^{\frac{\sqrt{w^2+h^2}}{2}} \left[\frac{(R_{\xi}(i, \alpha))^2}{(R_1(i, \alpha))^2} \right]$$

Для оптимизации по α при численной реализации можно использовать любой алгоритм оптимизации функции одного аргумента на отрезке, например, метод парабол [11]. В нашем случае мы использовали функцию *fminbnd* среды MATLAB.

4.2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА ТОЧКИ, НАНЕСЕННОЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

Поскольку разрешение современного сканера существенно превышает разрешение использовавшегося для нанесения графической информации электрохимического регистрирующего устройства, для получения исходной бинарной маски, которая представлена в виде графической информации, требуется оценить размеры точки регистрирующего устройства. Для этого предлагается воспользоваться методом анализа Фурье горизонтального и вертикального профилей яркостей нормализованного по углам изображения. Горизонтальным (вертикальным) профилем яркости будем называть зависимость суммы яркостей пикселей столбца (строки) изображения от горизонтальной (вертикальной) координаты этого столбца (строки).

При визуальном анализе изображений видно, что на одну точку электрохимического регистрирующего устройства при имеющихся условиях сканирования приходится приблизительно 10 пикселей отсканированного изображения. Однако, такая точность является недостаточной для проведения границ между столбцами/строками, состоящими из точек электрохимического регистрирующего устройства. Для более точной оценки рассмотрим амплитудный спектр горизонтального (и вертикального) профилей яркости нормализованного изображения (см. рис. 5). Видно, что в окрестности 10 пикселей спектр горизонтального профиля яркости (вдоль направления протягивания бумаги в регистрирующем устройстве) имеет четкий максимум для 10.58 пикселей на точку, а спектр вертикального профиля (поперек направления протягивания) имеет четкий максимум для 8 пикселей на точку. Различие в размерах связано с равномерной подачей бумаги лентопротяжным механизмом регистрирующего устройства со скоростью 50 мм/с [1].

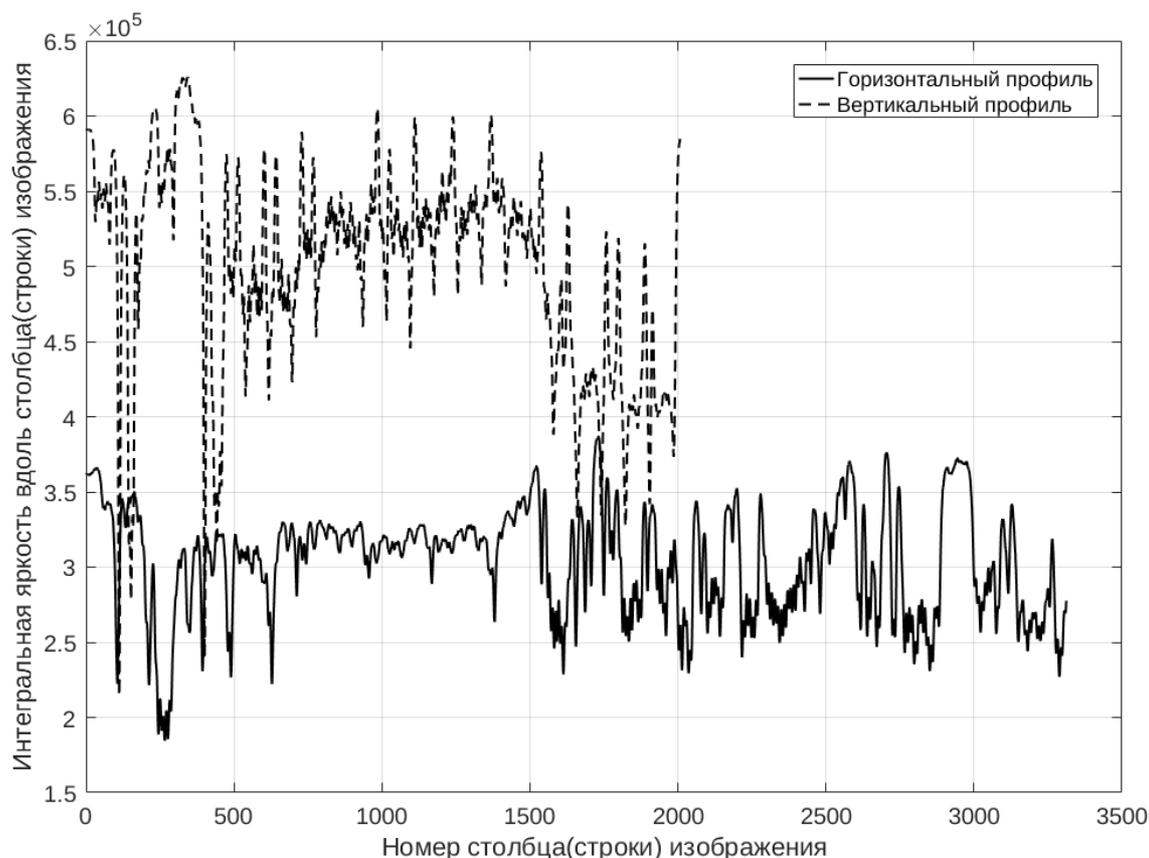


Рис. 4. Вертикальный и горизонтальный профили яркости изображения, представленного на рис. 15.

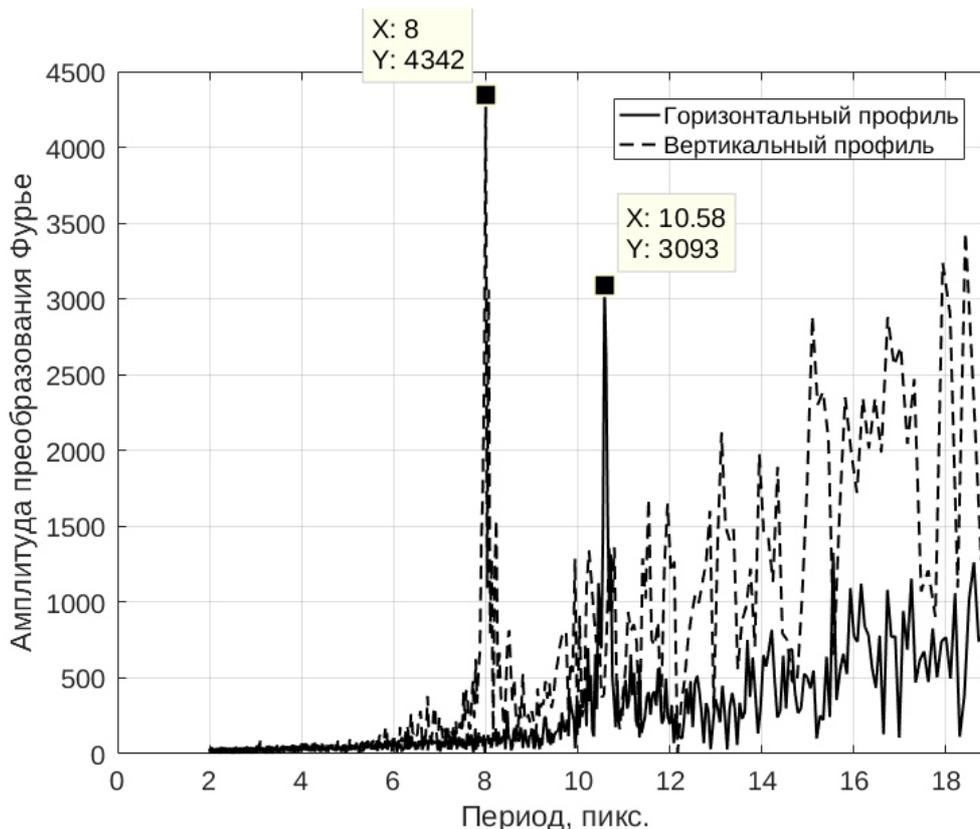


Рис. 5. Преобразование Фурье профилей, приведенных на рис. 4

4.3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МАСКИ ИНФОРМАТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

При известном размере точки изображения для определения положения информативных областей ионограммы (двумерной битовой карты превышения порога коэффициентом отражения от частоты и высоты, зависимость напряжения АРУ от частоты (задана точками снизу от верхней горизонтальной оси), маркировки ионограммы служебными символами сверху от верхней горизонтальной оси: год, месяц, число, часы, минуты, секунды, номер ионограммы), масштабируем маску (см. рис. 6) информативных областей в соответствии с результатом оценки размера точки изображения. При масштабировании маски для интерполяции индексов маски используется метод ближайшего соседа.

Для оценки положения (трансляции $\mathbf{t} = (t_x, t_y) \in \mathbf{R}^2$) маски относительно нормализованного по углам скоса и поворота изображения, приведенного на рис. 6, воспользуемся также методом оценки параметра по форме изображения, однако в данном случае зададим форму как следующее множество:

$$V(\mathbf{t}) = \{f(\cdot): f(\mathbf{x}) = c_1\chi_1(\mathbf{x} - \mathbf{t}) + c_2\chi_2(\mathbf{x} - \mathbf{t}), \quad c_i \in \mathbf{R}^1, \quad c_1 < c_2\},$$

где $\chi_1(\cdot)$ и $\chi_2(\cdot)$ – индикаторные функции областей на масштабированном изображении маски, обозначенные на рис. 6 черным и желтым цветом.

Это множество при фиксированном значении \mathbf{t} является двумерным конусом в пространстве $\mathbf{R}^{w \times h}$. Оценку параметра для формы, заданной как конус, в соответствии с [3], будем искать как решение экстремальной задачи

$$\mathbf{t}^* = \arg \inf_{\mathbf{t}} j(\mathbf{t}) = \arg \inf_{\mathbf{t}} \frac{\|\xi - \Pi_{\mathbf{t}} \xi\|^2}{\|\Pi_{\mathbf{t}} \xi - \Pi_{0\mathbf{t}} \xi\|'}$$

где $\Pi_{\mathbf{t}}$ – оператор проецирования на форму $V(\mathbf{t})$, а $\Pi_{0\mathbf{t}}$ – оператор проецирования на ровное поле зрения $V_0(\mathbf{t}) = \{f(\cdot): f(\mathbf{x}) = c_0(\chi_1(\mathbf{x} - \mathbf{t}) + \chi_2(\mathbf{x} - \mathbf{t}))\}$, которые определяются как решения экстремальных задач

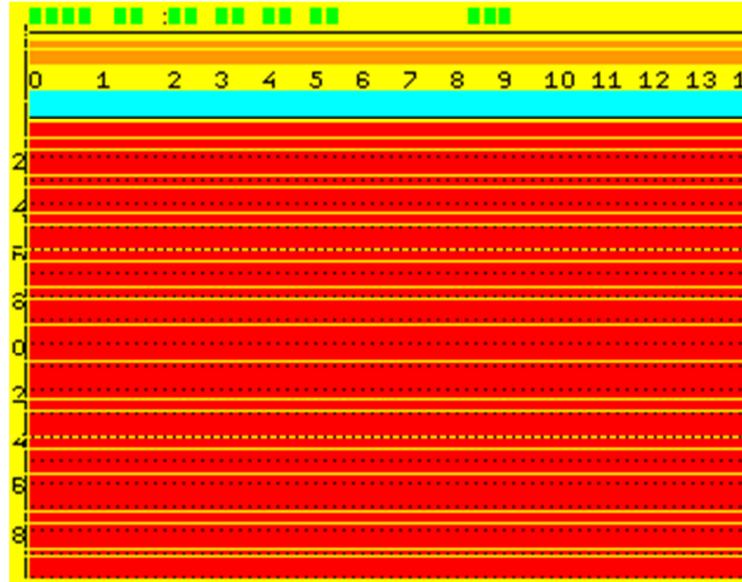


Рис. 6. Маска информативных областей ионограммы до масштабирования в соответствии с оценкой размера точки, нанесенной методом электрохимической печати (1 пиксел маски=1 точка изображения на бумаге). Красным обозначена область двумерной битовой карты превышения порога коэффициентом отражения от частоты и высоты, оранжевым обозначена область задания зависимости напряжения АРУ от частоты, зеленым обозначены области цифр, задающих дату, время и номер ионограммы. Черным (желтым) обозначены области изображения ионограммы, всегда имеющие черный (белый) цвет независимо от значений информативных областей. Область, обозначенная голубым цветом, при обработке игнорируется.

$$P_t \xi = \arg \inf_{g(\cdot) \in V(t)} \|\xi(\cdot) - g(\cdot)\|^2 = \arg \inf_{\substack{c_1, c_2 \in R^1, \\ c_1 < c_2}} \sum_{x \in X_t} (\xi(x) - c_1 \chi_{1t}(x) - c_2 \chi_{2t}(x))^2,$$

$$P_{0t} \xi = \arg \inf_{g(\cdot) \in V_0(t)} \|\xi(\cdot) - g(\cdot)\|^2 = \arg \inf_{c_0 \in R^1} \sum_{x \in X_t} (\xi(x) - c_0 \chi_{0t}(x))^2,$$

где введены дополнительные обозначения $\chi_{1t}(x) = \chi_1(x - t)$, $\chi_{2t}(x) = \chi_2(x - t)$, $\chi_{0t}(x) = \chi_{1t}(x) + \chi_{2t}(x)$, $X_t = \{x \in X: \chi_{1t}(x) + \chi_{2t}(x) > 0\}$.

Решение задач, определяющих операторы проецирования при фиксированном t , всегда существуют и единственны, поскольку являются задачами оптимизации выпуклого функционала на выпуклом замкнутом конусе. Решение задачи, определяющей проектор на форму, задается следующим условием [3]:

$$\begin{cases} c_i = \frac{\langle \xi(\cdot), \chi_{it}(\cdot) \rangle}{\|\chi_{it}(\cdot)\|^2}, & i = 1, 2, \text{ если } \frac{\langle \xi(\cdot), \chi_{1t}(\cdot) \rangle}{\|\chi_{1t}(\cdot)\|^2} < \frac{\langle \xi(\cdot), \chi_{2t}(\cdot) \rangle}{\|\chi_{2t}(\cdot)\|^2} \\ c_i = \frac{\langle \xi(\cdot), \chi_{0t}(\cdot) \rangle}{\|\chi_{0t}(\cdot)\|^2}, & i = 1, 2, \text{ иначе} \end{cases}$$

Решение задачи, определяющей проектор на ровное поле зрения, задается следующей формулой:

$$c_0 = \frac{\langle \xi(\cdot), \chi_{0t}(\cdot) \rangle}{\|\chi_{0t}(\cdot)\|^2}$$

4.4. МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ЦИФР МАРКИРОВКИ ИОНОГРАММЫ

Над верхней горизонтальной осью изображения электрохимическое регистрирующее устройство наносило информацию о дате (год, месяц, число) и времени (час, минута, секунда) момента регистрации, а также порядковый номер ионограммы. Изображение каждой из составляющих эти числа цифр имеет размер 7x5 точек и задается одним из 10 шаблонов, приведенных на рис. 7.

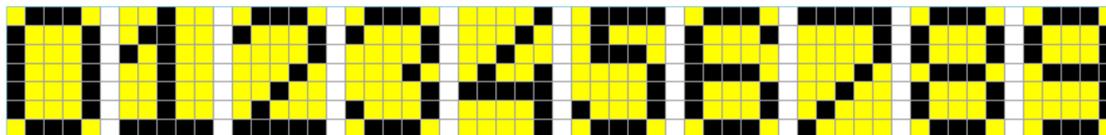


Рис. 7. Шаблоны цифр, формирующих информацию о дате, времени и порядковом номере ионограммы.

Для распознавания цифр будем вырезать из исходного изображения фрагменты, превышающие размерами обозначенные на маске зеленым цветом (см. рис. 6) на удвоенный размер точки электрохимического регистрирующего устройства. Это позволит распознавать цифры даже при небольших ошибках в локализации маски ионограммы. Для каждого из $k=0, \dots, 9$ шаблонов цифр можно задать индикаторные функции области, соответствующей черному (выделена на рис. 7 черным цветом, будем обозначать ее далее $\chi_{1t}^{(k)}(x)$) и белому цвету (выделена на рис. 7 желтым цветом, будем обозначать ее далее $\chi_{2t}^{(k)}(x)$) и, таким образом задать формы изображений цифр $V^{(k)}(t)$, $k=0, \dots, 9$ и форму ровного поля зрения $V_0(t)$ аналогично тому, как это было сделано для задания формы при оценке местоположения маски ионограммы.

Тогда, в соответствии с [3], для вырезанного фрагмента ξ изображения ионограммы будем принимать решение о присутствующей на ней цифре по следующему правилу:

$$k^* = \arg \inf_k \inf_t j^k(t) = \arg \inf_k \inf_t \frac{\|\xi - \Pi_t^{(k)} \xi\|^2}{\|\Pi_t^{(k)} \xi - \Pi_{0t} \xi\|}$$

5. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

5.1. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМЫХ МЕТОДОВ К АДДИТИВНЫМ ШУМАМ

5.1.1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для оценки устойчивости предлагаемых методов к аддитивным шумам требуется иметь возможность создать изображение, имитирующее ионограмму, добавить к этому изображению шум и вычислить показатель качества работы метода (для методов оценки используется среднеквадратичная (RMS, корень из среднего значения) погрешность оценивания, для метода классификации используется среднее число ошибок).

Для создания незашумленных изображений, имитирующих ионограмму, заполним области изображения маски (на рис. 6), обозначенные красным и оранжевым (область двумерной битовой карты превышения порога коэффициентом отражения от частоты и высоты, область задания зависимости напряжения АРУ от частоты) пикселями белого и черного цвета, где решение о цвете пикселя определяется случайным образом в соответствии с распределением Бернулли с параметром 0.5. После заполнения, масштабируем изображение в соответствии с характерным размером точки, получаемой методом электрохимической печати (от 8 до 12 пикселей на точку по горизонтали и от 6 до 9 пикселей на точку по вертикали). Для имитации «точечной» структуры изображения дополнительно умножим полученное изображение на периодическую функцию.

Поскольку при сканировании были получены изображения с глубиной серого 8 бит (256 градаций серого от 0 (черный) до 255 (белый)), для имитации серого цвета бумаги при моделировании было принято значение серого 180 для чистой бумаги, и значение серого 20 для центра точки, нанесенной методом электрохимической печати. Пример получаемого незашумленного модельного изображения

ионограммы приведен на рис. 8.

В качестве аддитивного шума используется случайный шум, распределенный в соответствии с нормальным законом с нулевым средним и задаваемым стандартным отклонением. Стандартное отклонение задается в единицах градаций серого, таким образом, стандартное отклонение, равное 160 градаций серого, будет соответствовать отклонению между цветами, соответствующими «чистой бумаге» и «центру точки».

Для оценки устойчивости метода классификации цифр приведенным выше способом в целях увеличения скорости проведения вычислительного эксперимента создается модельное изображение не всей ионограммы, а только конкретной цифры.

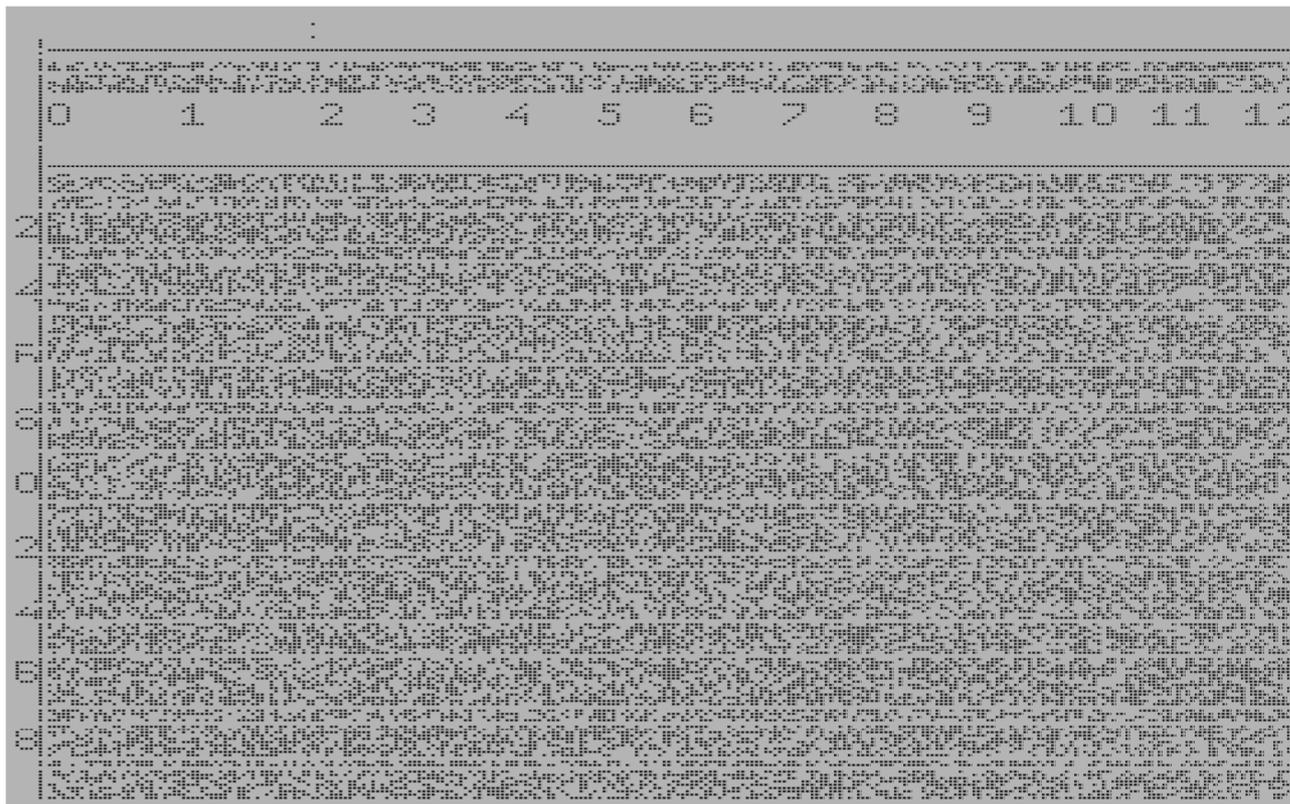


Рис. 8. Пример «незашумленной» модельной ионограммы, используемой в вычислительном эксперименте.

5.1.2. МЕТОД ОЦЕНКИ УГЛА ПОВОРОТА ИЗОБРАЖЕНИЯ

В данном вычислительном эксперименте размер точки считался равным 10.5x8.4 пиксела (характерный размер точки для отсканированного изображения). Модельное изображение ионограммы с аддитивным шумом подвергалось аффинному преобразованию с углами поворота и скоса, распределенными равномерно в диапазоне углов от -10° до 10° .

Стандартное отклонение аддитивного шума варьировалось от 0 до 200 градаций серого с неравномерным шагом.

Полученная зависимость среднеквадратичной (RMS) ошибки оценки угла поворота от стандартного отклонения шума приведена на рис. 9.

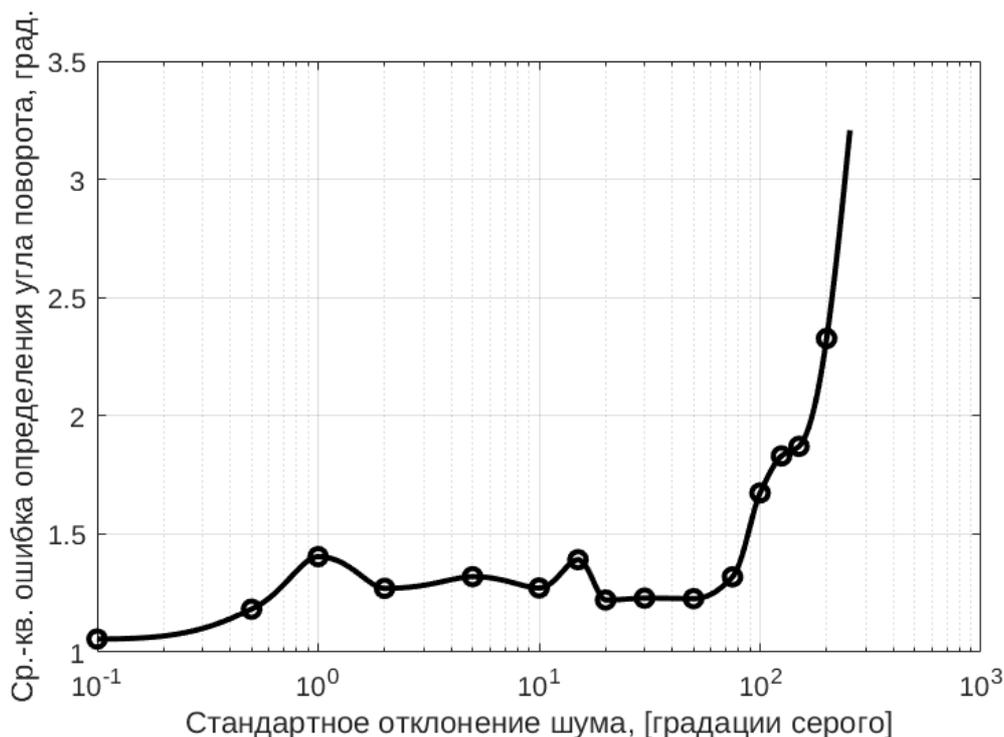


Рис. 9. Зависимость среднеквадратичной ошибки оценки угла поворота от стандартного отклонения шума.

По полученной зависимости видно, что для характерной величины шума, не превышающей контраста модельного изображения, получаемая среднеквадратичная ошибка не превышает двух градусов.

5.1.3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА ТОЧКИ, НАНЕСЕННОЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

В данном вычислительном эксперименте размер точки выбирался в соответствие с непрерывным равномерным распределением от 8 до 12 пикселей на точку по ширине и от 6 до 9 пикселей на точку по высоте. Граничные значения распределения были выбраны по результатам анализа имеющихся отсканированных изображений.

Стандартное отклонение аддитивного шума варьировалось от 0 до 200 градаций серого с неравномерным шагом.

Полученная зависимость среднеквадратичной (RMS) ошибки оценки размеров точки изображения от стандартного отклонения шума приведена на рис. 10.

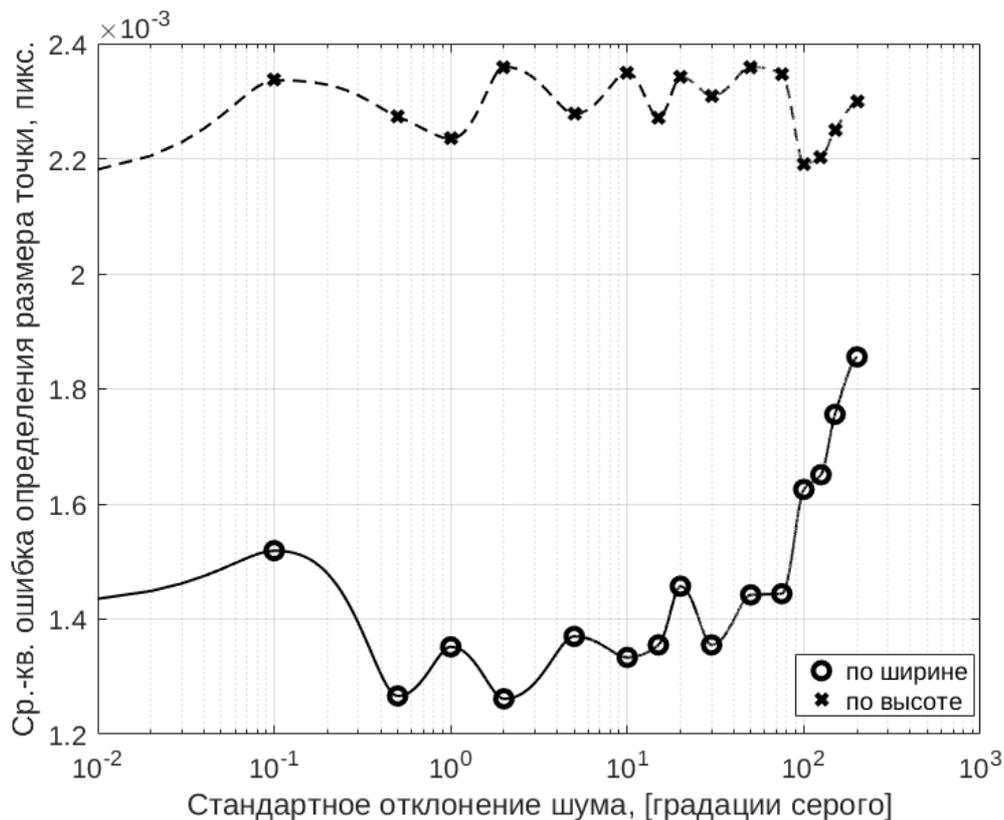


Рис. 10. Зависимость среднеквадратичной ошибки оценки размеров точки от стандартного отклонения шума.

По полученной зависимости видно, что ошибка оценки ширины точки оказывается в среднем меньше, чем ошибка оценки высоты точки. Это связано с тем, что изображение ионограммы имеет большее количество точек по ширине, а также с тем, что в среднем размер точки по ширине превышает ее размер по высоте. Таким образом, при оценке шум на каждом изображении фактически усредняется по большему числу реализаций в случае оценки ширины по сравнению с оценкой высоты точки.

5.1.4. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МАСКИ

В данном вычислительном эксперименте размер точки считался равным 10.5×8.4 пиксела (характерный размер точки для отсканированного изображения). Изображение ионограммы перед наложением шума было вписано в изображение, превышающее его по ширине и высоте на 200 пикселей (порядка 10% размера) со случайным смещением, распределенным равномерно в интервале $[-100, 100]$ пикселей.

Стандартное отклонение аддитивного шума варьировалось от 0 до 200 градаций серого с неравномерным шагом.

Полученная зависимость среднеквадратичной (RMS) ошибки оценки положения маски приведена на рис. 11. Положение маски оценивается в пикселах.

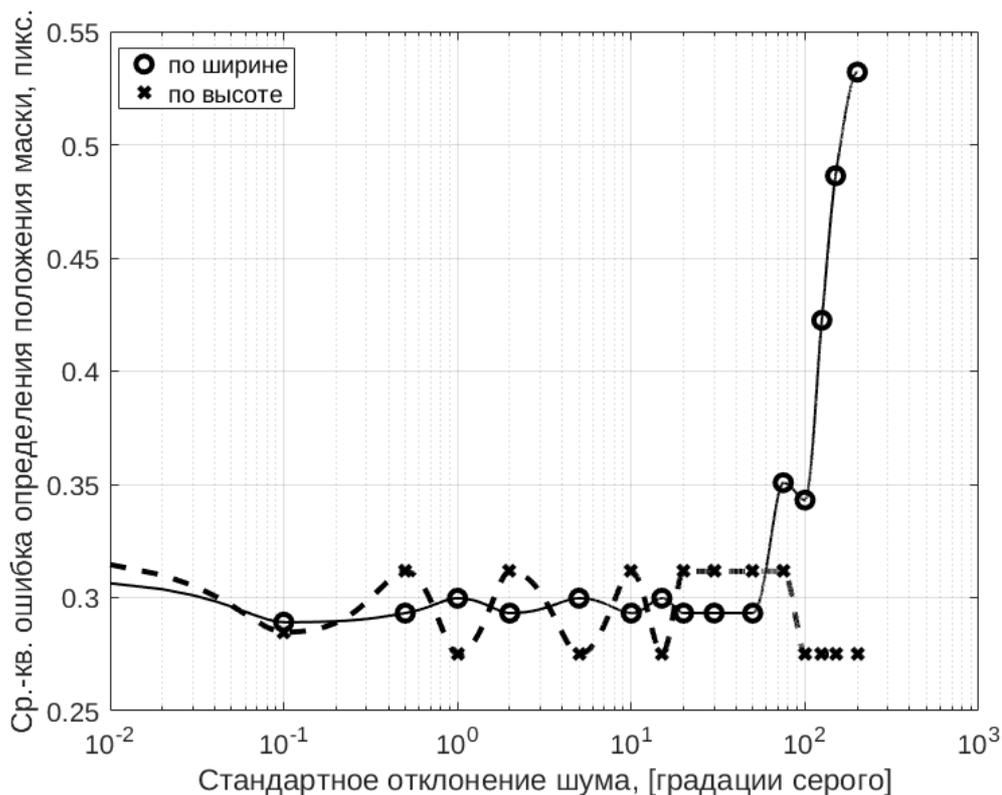


Рис. 11. Зависимость среднеквадратичной ошибки оценки положения маски от стандартного отклонения шума.

По полученной зависимости видно, что для рассматриваемого шума, получаемая среднеквадратичная ошибка составляет доли пикселей и связана, по всей видимости, с тем, что параметр трансляции при создании модельного изображения задается в качестве вещественного числа, а оценка, получаемая в результате работы реализующего метод алгоритма, оказывается кратна целому числу пикселей.

5.1.5. МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ЦИФР МАРКИРОВКИ ИОНОГРАММЫ

В данном вычислительном эксперименте считался равным 10.5×8.4 пиксела (характерный размер точки для отсканированного изображения). Изображение цифры (5×7 точек электрохимической печати), подлежащее классификации, для каждого создаваемого в вычислительном эксперименте модельного изображения, было вписано прямоугольник размером 9×11 точек для имитации неточного определения положения цифры на изображении ионограммы. Цифры выбирались случайным образом в соответствии с дискретным равномерным распределением на множестве от 0 до 9.

Стандартное отклонение аддитивного шума варьировалось от 0 до 1000 градаций серого с неравномерным шагом.

Полученная зависимость частоты неправильной классификации цифр от стандартного отклонения шума приведена на рис. 12.

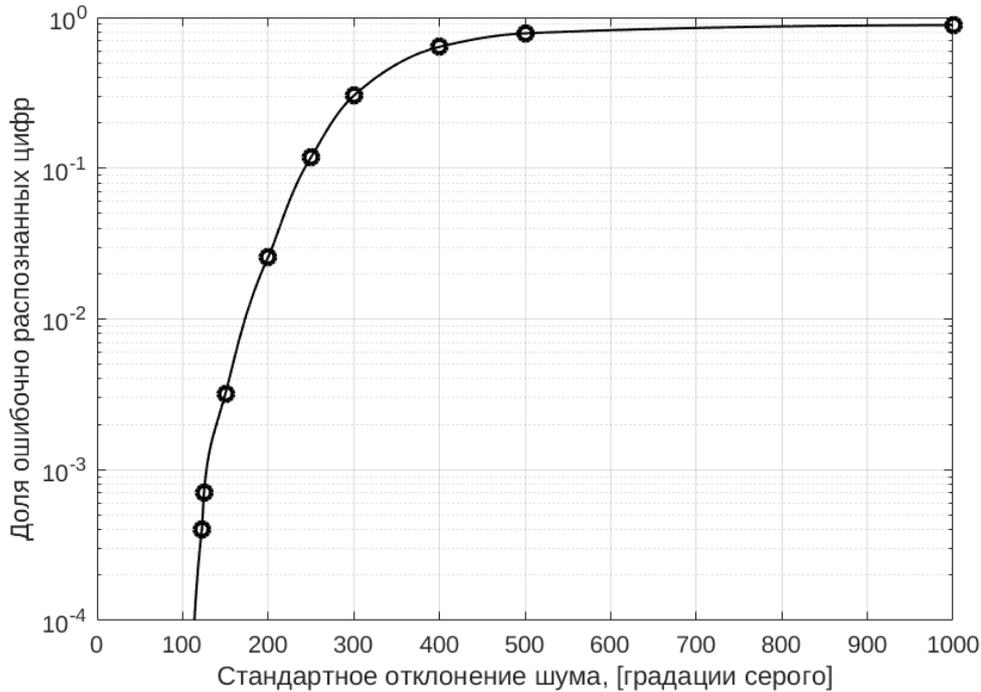


Рис. 12. Зависимость частоты неправильной классификации цифр от стандартного отклонения шума.

По полученной зависимости видно, что для значений стандартного отклонения шума менее 100 неправильно классифицированных цифр выявлено не было. Поскольку при проведении данного вычислительного эксперимента усреднение проводилось по 10000 реализаций для каждого из значений стандартного отклонения шума, это означает, что для стандартного отклонения шума менее 100 частота ошибок классификации в среднем не превышает 10^{-4} .

5.2. ПРИМЕР РАБОТЫ РЕАЛИЗОВАННЫХ МЕТОДОВ НА ОТСКАНИРОВАННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Воспользуемся предложенным выше методом для определения ориентации листа бумаги на изображении, приведенном на рис. 1. Для сегментации листа от белого фона воспользуемся многопороговым методом Оцу [12], реализованным в функции *multithresh* среды MATLAB. Модельное предположение, подтвердившееся на практике в 100% случаев для рассматриваемой нами выборки изображений, состоит в том, что пороги будут подобраны так, что один из порогов отделит лист бумаги от фона сканера за счет того, что с течением времени электрохимическая бумага потеряла белизну. Получившееся бинарное изображение, на котором лист бумаги обозначен черным цветом, а фон – белым цветом, приведено на рис. 13.

Для оценки угла скоса листа воспользуемся приведенным выше методом. На рисунке 14 представлен график зависимости функции $Q(\alpha)$ от угла скоса листа. Было получено значение минимума около -2° . После оценки значений углов поворота и скоса листа было выполнено обратное аффинное преобразование, затем произведена обрезка полей изображения, лежащих за пределами листа и повторно была выполнена оценка углов скоса и поворота, но теперь уже по изображению, содержащему графическую информацию, нанесенную электрохимическим методом. В силу того, что информация организована в форме черных точек, расположенных в узлах деформированной прямоугольной сетки, в диапазоне углов скоса и поворота в пределах $5-10^\circ$, выполняется модельное предположение о том, что представленное изображение можно считать состоящим из прямых постоянной яркости, углы наклона которых лежат в интервалах $[-15^\circ, 15^\circ]$ и $[-105^\circ, 75^\circ]$ в зависимости от того, какое измерение прямоугольной сетки мы анализируем.

После компенсации всех искажений скоса и поворота приведенным выше методом и обрезки полей получается изображение, представленное на рис. 15.

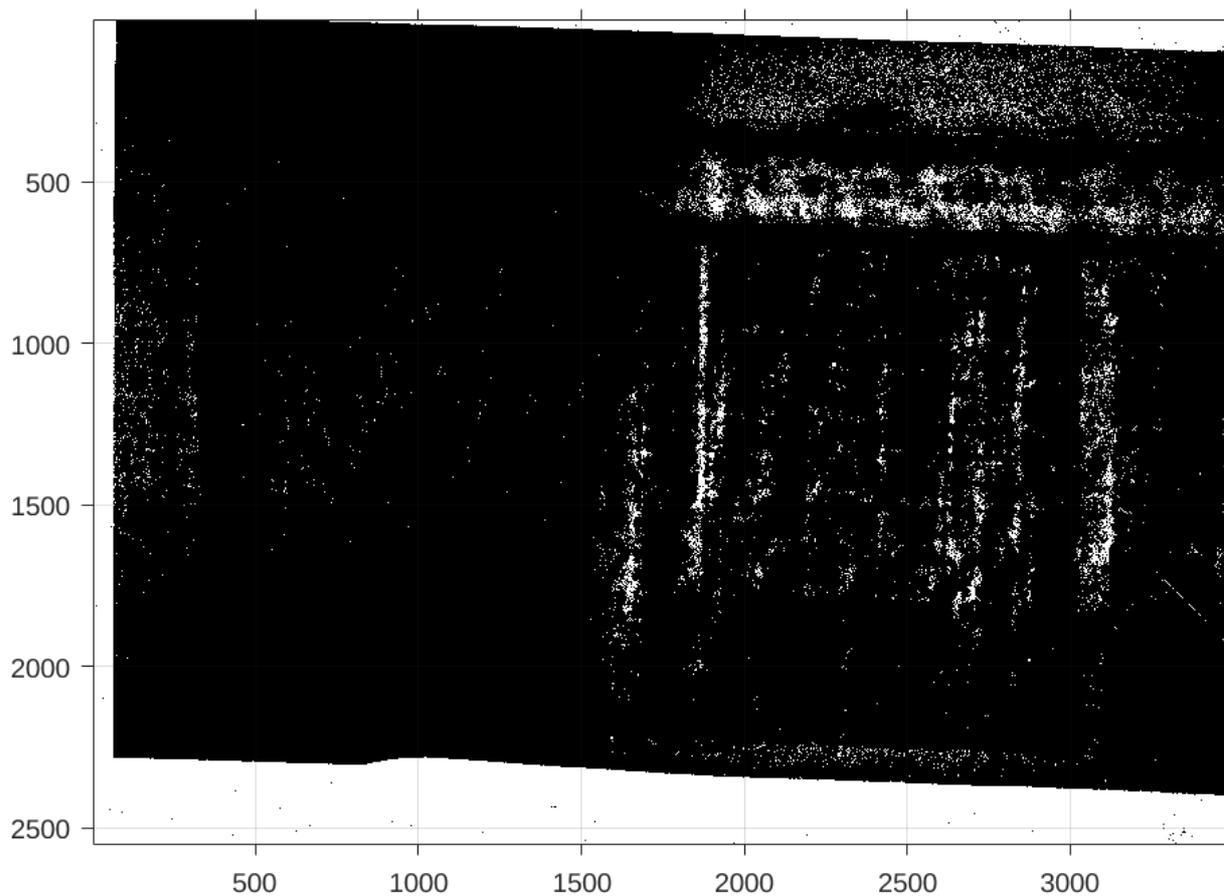


Рис. 13. Результат сегментации изображения с рисунка 1 на лист бумаги и фон.

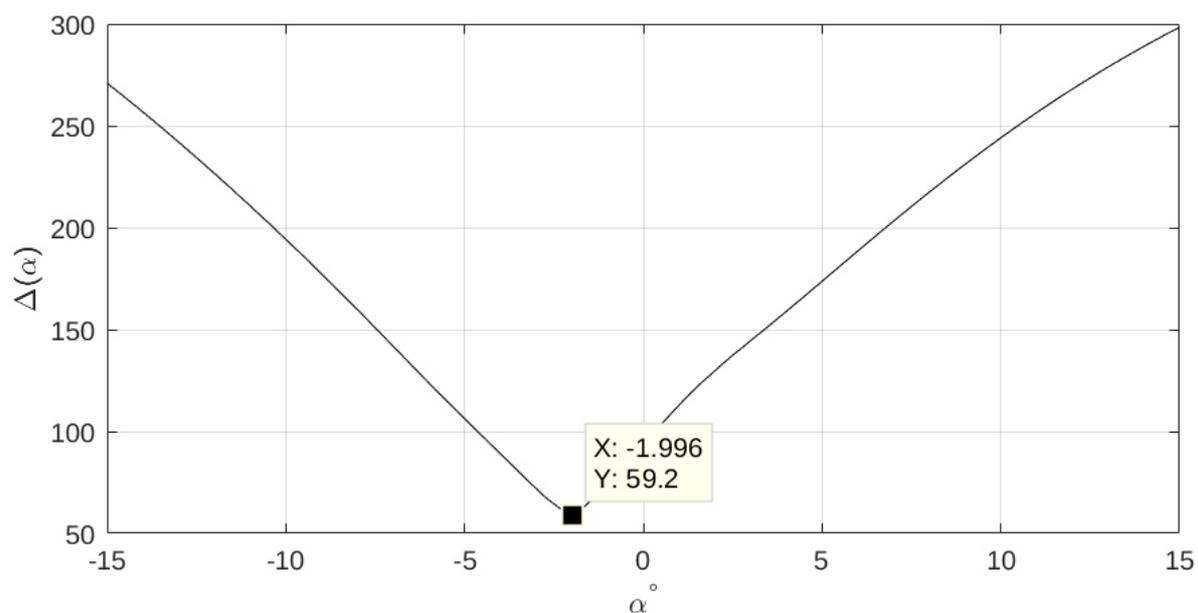


Рис. 14. Зависимость значения функции $Q(\alpha)$ от угла скоса α . Отмечен минимум, равный -2°

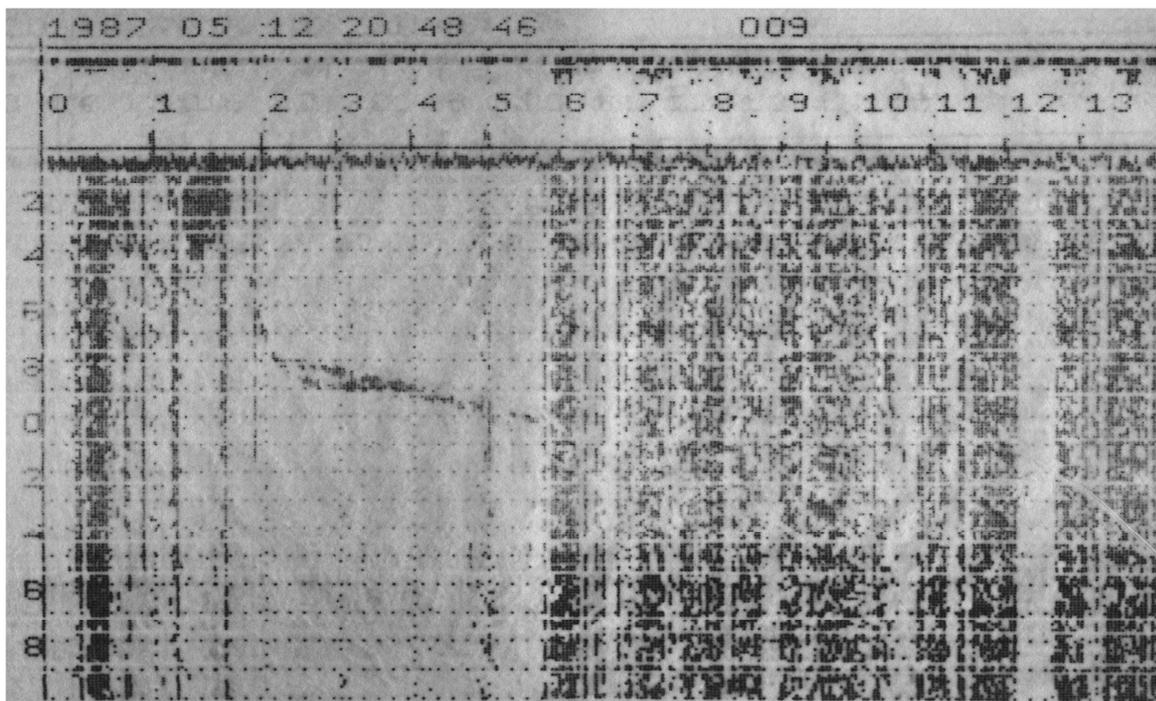


Рис. 15. Нормализованное по углам скоса и поворота изображение с рис. 1.

Результаты оценки размеров точки электрохимической печати и соответствующие иллюстрации для этого изображения приведены в п.4.2.

Результат наложения масштабированной маски на анализируемое изображение после оценки ее положения как параметра формы приведен на рис. 16.

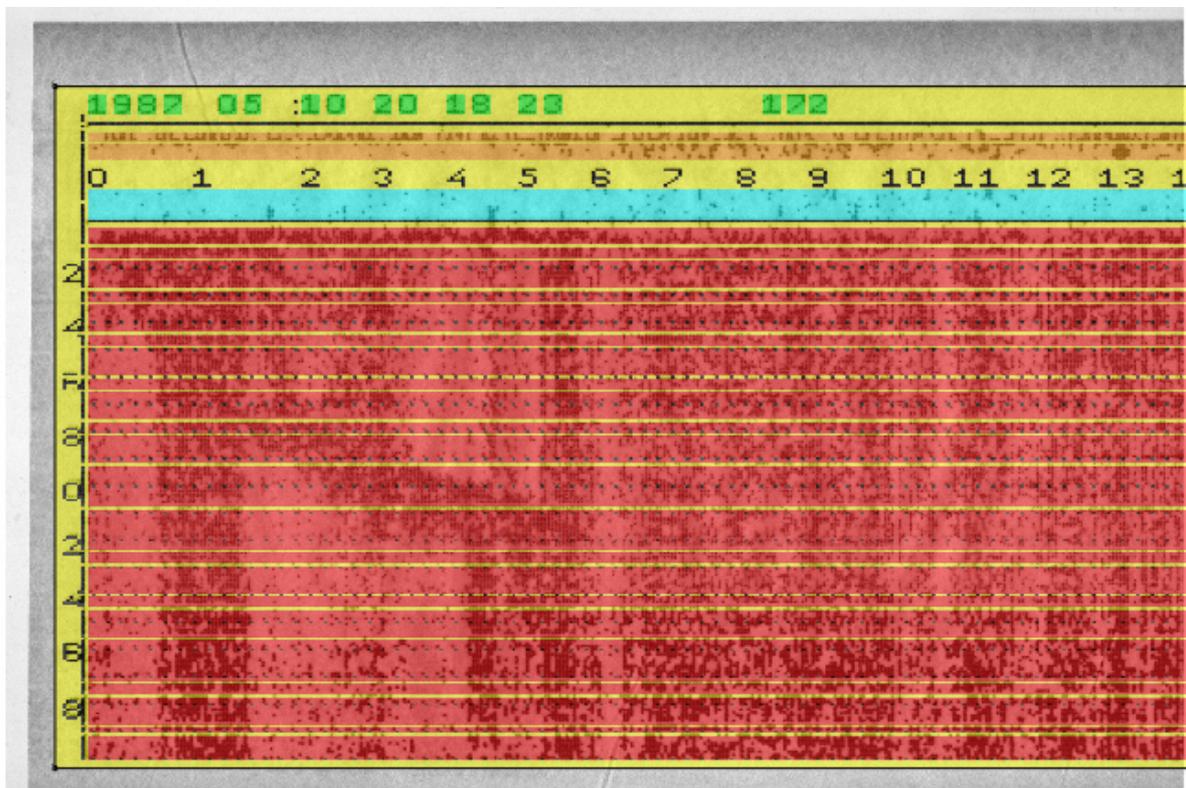


Рис. 16. Результат наложения масштабированной маски на анализируемое изображение после оценки ее положения как параметра формы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был предложен ряд методов, позволяющих автоматизировать задачи оцифровки отсканированных ионограмм, основанных на методах морфологического анализа изображений, а именно, морфологически метод оценки углов поворота и скоса изображения и нормализовать изображение, метод оценки размеров точки, наносимой методом электрохимической печати, морфологический метод оценки положения маски ионограммы и морфологически метод распознавания цифр маркировки ионограммы.

В вычислительном эксперименте продемонстрирована устойчивость предлагаемых методов к аддитивному нормально распределенному шуму на модельных изображениях, а также работоспособность методов на отсканированных изображениях.

В качестве направления дальнейшего совершенствования процесса оцифровки отсканированных ионограмм, позволяющего автоматизировать процесс в большей степени, следует выбрать компенсацию искажений, вносимых в изображение процедурой регистрации электрохимическим способом, выходящих за класс аффинных преобразований изображения.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.П.Гончаров, В.П.Прохоренко, Э.А.Прохоренко. Быстродействующий регистратор спутниковых ионограмм БРИС-1. В сб. «Аппаратура для исследования внешней ионосферы». М., ИЗМИРАН, 1980, стр. 261-270.
2. Степанов И.М. Электрохимическая запись. – М., «Энергия», 1970, 96 с.
3. Пытьев Ю.П., Чуличков А.И. Методы морфологического анализа изображений. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 336 с.
4. Богданов И.В., Чуличков А.И. Применение локального морфологического фильтра при анализе изображений. // 6-я Международная конференция "Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии" РОАИ-6-2002. В. Новгород, 2002г. С.71-74.
5. Пытьев Ю.П., Животников Г.С. Теоретико-вероятностные и теоретико-возможностные модели распознавания. Сравнительный анализ. // «Интеллектуальные системы», 2001, N 6, сс. 63-90.
6. Захарченко А.А., Чуличков А.И. Измерение микрорельефа поверхности по набору изображений с различным положением фокуса. // Измерительная техника, 2006.
7. Чуличков С. Н., Чуличков А. И., Демин Д. С. Об опыте использования морфологического метода в атмосферной акустике // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2010. — Т. 47, № 2. — С. 171–183.
8. Пытьев Ю.П., Чуличков А.И. и др. Морфологический метод в задаче идентификации объектов по их изображениям. - В сб. Проблемы искусственного интеллекта и распознавания образов. Киев, 1984.
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Radon_transform
10. J. Radon. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten Akad. Wiss., Vol. 69 (1917), pp. 262-277
11. Ф.П. Васильев. Численные методы решения экстремальных задач. – М., «Наука», 1988
12. Otsu, N., "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, 1979, pp. 62-66.

Demin D.S.

MORPHOLOGICAL METHODS OF IMAGE NORMALIZATION AND CLASSIFICATIONS FOR SCANNED IONOGRAMS DIGITIZATION

Methods for image processing and analysis are considered allowing to automate the digitization of scanned ionograms. Paper ionograms which are being digitized were obtained by storing information with electrochemical printing. This article presents methods for affine transformation compensation (translation, scale, rotation and shear), which is a cumulative effect of printing, storage of printed ionograms and scanning them. Also a method for digits (which represent date, time and sequence number of ionogram) recognition is presented. Methods being developed are based on methods for morphological image analysis suggested by Yu.P.Pytev. The computational experiment demonstrates high stability of the approach considered in presence of additive noise.

KEYWORDS: DIGITIZATION OF IONOGRAM, MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF IMAGES, ELECTROCHEMICAL PRINTING