

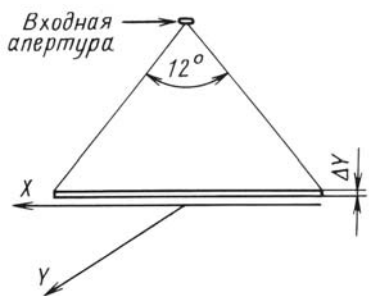
Д. В. Воронцов, В. В. Егоров,  
А. П. Калинин, А. Г. Орлов,  
И. Д. Родионов, И. П. Родионова

## **ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ ГИПЕР- СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОТОТИПА АВИАЦИОННОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА**

*Рассмотрены принципы обработки гиперспектральной информации, и приведены результаты обработки летных испытаний прототипа авиационного гиперспектрометра. Отмечено, что гиперспектрометр обеспечивает совершенно новый, уникальный, качественный характер информации, однако извлечь эту информацию можно только при существенном усовершенствовании методов обработки информации. Продемонстрированы возможности как гиперспектрометра, так и субпиксельного метода обработки гиперспектральной информации.*

В работе [1] приведены описание конструкции и результаты лабораторных испытаний прототипа авиационного гиперспектрометра, предназначенного для дистанционного зондирования поверхности Земли для идентификации объектов и их элементного состава с борта самолетов и вертолетов. Измеряемые характеристики: зависимость интенсивности рассеянного Землей излучения от пространственной координаты точки на ее поверхности; значения длины волны  $\lambda$  регистрируемого излучения; компоненты поляризации излучения. В отличие от традиционной многозональной съемки в гиперспектральных измерениях число спектральных каналов достигает многих сотен, а спектральное и пространственное разрешение бывает порядка 1...3 нм и 1...10 м соответственно. Все это увеличивает не только количество информации, но и обеспечивает совершенно новый, уникальный, качественный характер данных гиперспектральной съемки. Однако извлечь эти новые данные можно только при существенном усовершенствовании методов обработки информации. В настоящей статье речь пойдет о методах и алгоритмах обработки гиперспектральной информации и результатах натурных испытаний прототипа авиационного гиперспектрометра [1].

Прототип гиперспектрометра установлен на днище авиационного носителя (самолет ИЛ-20 или вертолет МИ-8). Спектральный диапазон прибора составляет 0,43...0,86 мкм. Указанный диапазон разделен



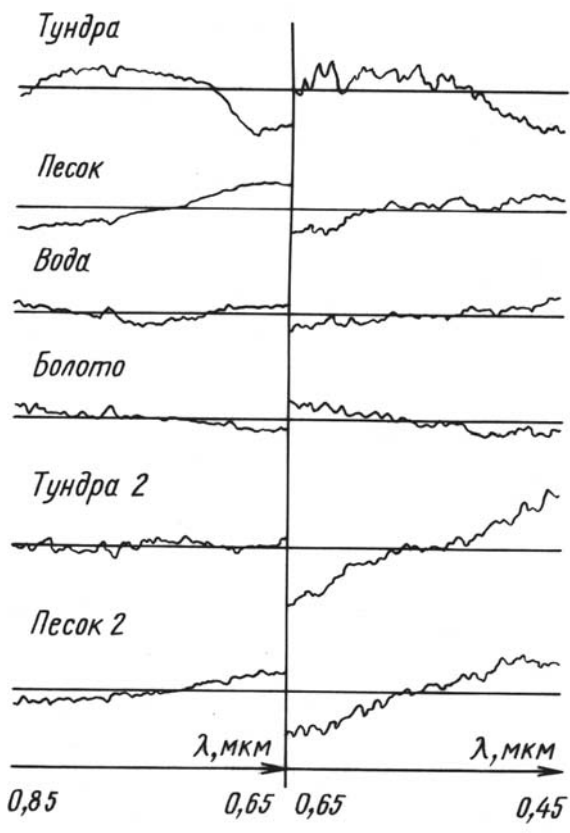
**Рис. 1.** Полоска поверхности Земли, проецируемая на вход фотоприемного устройства. Величина полоски по  $Y$  определяется углом  $1'$  и высотой полета

формировалось изображение с размером пикселя  $\sim 2 \times 2 \text{ м}^2$  при высоте полета 1 км. Движение носителя вдоль трассы происходило в направлении оси  $Y$ , мгновенное угловое поле зрения авиационного прототипа гиперспектрометра равнялось  $12^\circ \times 1'$ .

Световой сигнал после прохождения оптической системы попадал на спектроделитель, в случае авиационного прототипа — дифракционную решетку, а затем через проекционный объектив — на фотоприемную матрицу размером  $1280 \times 1024$  элементов (рабочая область матрицы составляет  $500 \times 1000$  элементов). Таким образом, на матрице формируется кадр в координатах  $X$  (поперек трассы полета 1000 элементов) и  $\lambda$  (длина волны — 500 элементов). Последовательность таких кадров образует гиперкуб ( $X \times Y \times \lambda$ ) [2], в каждом элементе которого записывается значение измеренной интенсивности излучения.

Для того чтобы идентифицировать гиперспектральное изображение, необходимо тем или иным способом сравнивать измеренные для исследуемого элемента изображения спектральные зависимости со спектральными функциями известных веществ поверхности Земли (т.е. иметь по ним спектральную базу данных). Для этого находят спектральную зависимость отражения солнечного света известных поверхностей — это может быть, например, поверхность болота, и найденную таким образом спектральную функцию приписывают определенному виду поверхности. Образцы спектральных функций (реперные компоненты) для некоторых характерных элементов поверхности Земли показаны на рис. 2. В этих функциях устранены искажения спектров, вызванные линиями поглощения атмосферы. Измерения спектральных функций реперных компонентов (рис. 2) выполнялись с помощью двух модулей гиперспектрометра первого и второго видимых диапазонов. Интерпретация результатов с различных модулей гиперспектрометра

на несколько поддиапазонов, соответствующих различным спектральным модулям. По результатам тестов, подробно описанных в работе [1], спектральное разрешение гиперспектрометра — 2,3 нм, а угловое разрешение —  $2,2 \times 10^{-3}$  рад. Типовая высота съемки с самолета составляет порядка 1 км, вертолета — 500 м, а скорость полета носителя выбирали из условия получения непрерывного изображения (без пробелов и наложений строк) и, исходя из геометрии съемки (рис. 1), в результате чего



**Рис. 2. Некоторые спектральные функции известных видов поверхности Земли (измерения выполнены двумя модулями для первого и второго видимых диапазонов)**

зависит от метода обработки гиперспектрального изображения и будет рассмотрена далее. На рис. 2 показаны несколько компонентов, имеющих одинаковое название (например, песок и песок 2). Это означает, что визуально (по снимкам видеокамеры) эти поверхности были видимы практически одинаково, но отличались спектральными функциями. Вопрос о реперных компонентах довольно сложный и требует особого рассмотрения, в случае каждого исследования выделенного участка поверхности Земли реперные компоненты определяются особо. В данном примере приведены предварительные результаты.

Имея такую базу данных, можно приступить к расшифровке (идентификации) изображения. Следует отметить, что в дальнейшем во всех процедурах распознавания поверхности используется лишь форма спектральной функции, что существенно увеличивает надежность распознавания.

**Методы и алгоритмы обработки.** Поскольку на этапе предварительной обработки (нормализации, координатной привязки и др.) применялись традиционные методы, в настоящем разделе кратко из-

ложены только методы тематической обработки и алгоритмической базы гиперспектрального программного обеспечения.

Задачи тематической обработки гиперспектральных данных заключаются в классификации объектов съемки и определении их компонентного состава (“химическое зрение”).

Для решения этих задач были использованы два метода: корреляционный метод, в котором предполагается, что каждый элемент гиперкуба относится только к одному компоненту (песок, вода, растительность и т.п.); субпиксельный метод [3, 4] предполагает, что каждый элемент гиперкуба характеризуется набором различных компонентов и параметрами их состояния (например, влажная или сухая почва, проективное покрытие почвы растительностью и т.п.).

Рассмотрим каждый из методов подробнее.

*Метод корреляционной обработки результатов гиперспектральной съемки.* Суть метода состоит в том, что для каждого пиксела изображения соответствующая ему спектральная функция  $f_{\text{и}}$  сравнивается со спектральными функциями реперных компонентов  $f_{\text{р}}$  из соответствующей базы данных. Результатом сравнения является выбор реперного компонента, спектральная функция которого наиболее близка (в смысле заданной нормы) к измеренной.

Процедура сравнения сводится к вычислению корреляции измеренной и реперной спектральных функций с последующим поиском ее максимума путем перебора реперных компонентов. Предварительно обе спектральные функции приводятся к виду, при котором их среднее значение на интервале длин волн от  $\lambda_{\text{min}}$  до  $\lambda_{\text{max}}$  равно нулю, а интеграл от квадрата функции равен 1:

$$\begin{aligned} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} f_{\text{и}}(\lambda) d\lambda &= 0; & \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} f_{\text{р}}(\lambda) d\lambda &= 0; \\ \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} f_{\text{и}}^2(\lambda) d\lambda &= 1; & \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} f_{\text{р}}^2(\lambda) d\lambda &= 1; \end{aligned} \quad (1)$$
$$C(f_{\text{и}}, f_{\text{р}}) = \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} f_{\text{и}}(\lambda) f_{\text{р}}(\lambda) d\lambda.$$

Величина  $C$ , которая находится в диапазоне  $-1 \dots +1$ , характеризует подобие функций  $f_{\text{и}}$  и  $f_{\text{р}}$ . Из всех реперных компонентов выбирают такую функцию  $f_{\text{и}}$ , для которой значение  $C$  максимально. Среди всех спектральных функций реперных компонентов может и не быть функции, достаточно близкой к исследуемой спектральной функции, поэтому для ограничения поиска задается минимальное пороговое значение

величины  $C_{\min}$ . Если максимальное значение найденного  $C_{\max}$  меньше этого порогового значения, то это означает, что вещество не распознано (как правило, порог  $C_{\min}$  выбирают из соображений качества видеосигнала и числа реперных компонентов,  $C_{\min} = 0,5 \dots 0,8$ ). В случае использования информации с нескольких спектральных модулей гиперспектрометра результирующее значение  $C$  является взвешенной суммой корреляций  $C_i$  от спектральных функций этих модулей:

$$C = \sum_{i=1}^m p_i C_i; \quad \sum_{i=1}^m p_i = 1; \quad (2)$$

здесь  $p_i$  — вес спектральной функции  $i$ -го модуля, определяемый информативностью данного спектрального диапазона;  $m$  — число модулей гиперспектрометра.

К достоинству корреляционного метода относится его алгоритмическая простота. Этот метод устойчив к воздействию помех, связанных с освещением, с различными нелинейностями аппаратуры и т.д. К ограниченности этого метода относится предположение о том, что каждому пикселю изображения соответствует единственный компонент, что существенно уменьшает информативность результатов обработки гиперспектральной съемки.

*Метод субпиксельной обработки результатов гиперспектральной съемки.* Как правило, большинство веществ, из которых состоят зондируемые объекты, являются смесями нескольких веществ, и поэтому спектральная функция элемента изображения поверхности является композицией спектральных функций нескольких компонентов. Термин “субпиксельный” означает возможность осуществления внутрипиксельного анализа компонентного состава и параметров состояния зондируемого объекта в пределах одного элемента изображения, в отличие от корреляционного метода, который относит каждый пиксель изображения к одному компоненту.

Суть субпиксельного метода состоит в следующем: моделируя спектральную функцию от каждого элемента изображения как линейную комбинацию ограниченного числа нескольких спектральных функций [5, 6], соответствующих своим реперным компонентам, и используя метод наименьших квадратов, можно определить компонентный состав элемента изображения.

Удобным математическим представлением спектральных функций для смесей компонентов элемента изображения  $i$  является  $N$ -мерный вектор, определяемый числом спектральных каналов  $N$  гиперспектрометра:

$$\mathbf{A}_i = \{f_{i\lambda_1}, f_{i\lambda_2}, \dots, f_{i\lambda_j}, \dots, f_{i\lambda_N}\}, \quad (3)$$

где  $f_{i\lambda_j}$  — интенсивность излучения спектральной функции  $f_i(\lambda)$  с длиной волны  $\lambda_j$ .

Произвольное число спектральных функций реперных компонентов  $M$  ( $M$  всегда меньше  $N$ ) будет определять  $M$ -мерное подпространство в  $N$ -мерном векторном пространстве.  $N$ -мерный вектор спектральной функции элемента изображения можно представить линейной комбинацией векторов спектральных функций реперных компонентов. Каждой спектральной функции реперных компонентов приписывается вес, значение которого должно лежать в пределах  $0 \dots 1$ . Кроме того, полная сумма весов для всех реперных компонентов в данном элементе изображения должна быть равна единице.

Описанная геометрическая интерпретация спектра является основой метода ортогональных подпространственных проекций анализа смешанного спектра [5]. Таким образом, процедура субпиксельной обработки сводится к сравнению композиции спектральных функций реперных компонентов с измеренной гиперспектрометром спектральной функцией и нахождению таких весов реперных функций и, соответственно, долей компонентов, которые дают наилучшее совпадение в смысле минимума наименьших квадратов.

Количество реперных компонентов зависит от числа спектральных каналов, ширины выбранного спектрального диапазона, соотношения сигнал/шум в спектральном диапазоне исследуемого участка поверхности Земли и может меняться от единиц (при плохих условиях) до сотен.

Процедура субпиксельной обработки состоит в следующем. Как было отмечено, каждый элемент изображения характеризуется своей спектральной функцией  $f_i(\lambda)$ . В методе субпиксельного преобразования спектральные функции  $f_i$  приводятся к такому же нормированному виду, как и в случае корреляционного метода, при котором их среднее значение равно нулю и интеграл квадрата функции равен единице (1).

В субпиксельном методе используется так называемая линейная модель разложения (linear mixing model) [5]. В модели каждый элемент гиперспектрального изображения представлен линейной комбинацией реперных компонентов с соответствующими весовыми коэффициентами.

Итак, исследуемая спектральная функция  $f_i$  преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_i &= \sum_{k=1}^M b_k s_k + \mathbf{e} = S \cdot \mathbf{b} + \mathbf{e}; \\ S &= [s_1, s_2 \dots s_M]; \\ \mathbf{b} &= [b_1, b_2 \dots b_M]^T, \end{aligned} \tag{4}$$

где  $f_{и}$  — векторное представление ожидаемой спектральной функции элемента изображения;  $s_k$  —  $k$ -я составляющая векторного представления реперных компонентов;  $b_k$  — веса (доли) реперных компонентов;  $M$  — число реперных компонентов;  $e$  — вектор ошибки, обусловленный шумами прибора и неизвестными веществами;  $t$  — означает транспонирование.

С помощью формул (4) спектральная функция приводится к векторному виду, а далее полученный вектор  $f_{и}$  проецируется на подпространство, образованное реперными компонентами. В результате проецирования возникает векторная проекция  $f_{п}$  и ортогональный ей вектор  $e$ .

Вектор  $e$  обязан своим происхождением наличию шумов прибора и недостаточному числу реперных компонентов. Если бы вектор  $f_{и}$  лежал в подпространстве векторов реперных компонентов, то ошибка  $e$  была бы равна 0, т.е. линейная комбинация векторов реперных элементов полностью бы описывала вектор спектральной функции исследуемого элемента изображения. Для ошибки разложения можно записать

$$e = x - x_{п} = x - S \cdot b. \quad (5)$$

В силу того, что вектор ошибки  $e$  ортогонален всем векторам реперных компонентов, то имеет место следующее равенство:

$$S^T e = S^T (x - x_{п}) = 0, \quad (6)$$

где  $S^T$  — транспонированная матрица.

Или, если воспользоваться выражением (4),

$$S^T (x - S \cdot b) = 0. \quad (7)$$

Преобразовывая равенство (7), получим

$$b = (S^T S)^{-1} S^T x = P_S x,$$

где  $P_S$  — матрица проецирования на подпространство реперных компонентов;

Аналогично, вектор ошибки  $e$  можно выразить, используя матрицу проецирования ошибки  $P_E$ :

$$e = x - x_{п} = P_E x, \\ P_E = E - P_S,$$

$E$  — единичная матрица.

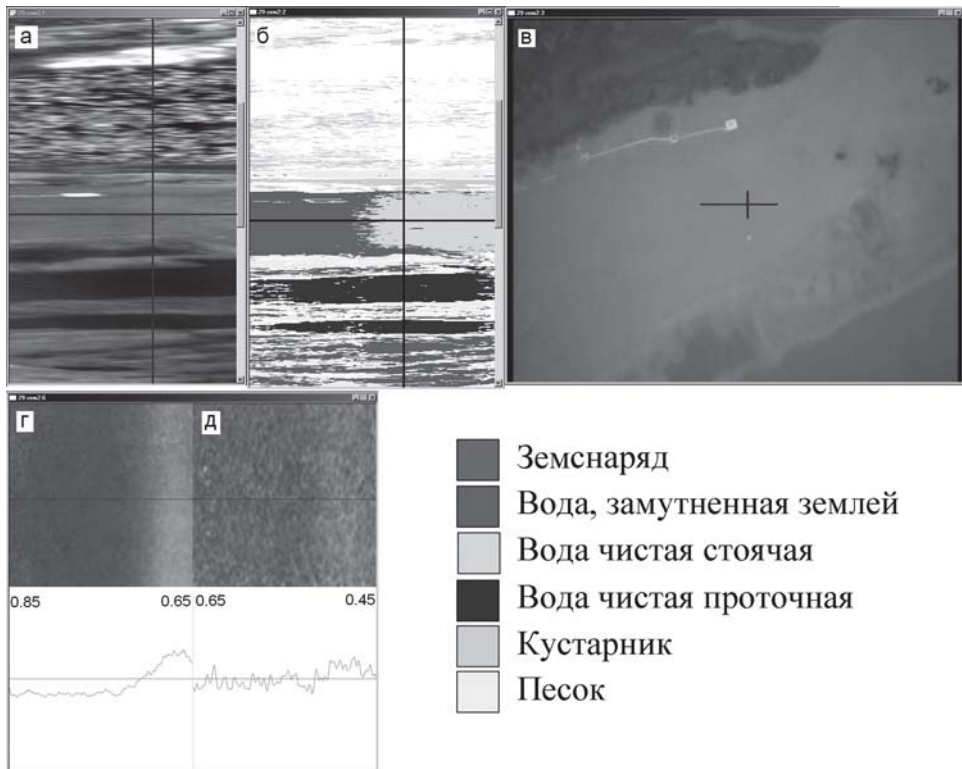
Координаты вектора  $\mathbf{b}$ , т.е.  $b_i$ , как было сказано ранее, дают величину вклада данного  $i$  — вещества (реперного компонента) в элементный состав исследуемого элемента изображения. Величина вектора ошибки  $\epsilon$  показывает, насколько вообще справедливо использование данной базы реперных компонентов для идентификации элемента изображения. Появление вектора ошибки является “платой” данного метода за его высокую чувствительность к компонентному составу и состоянию объекта в пределах пикселя.

**Результаты натуральных экспериментов.** Как следует из описания методов корреляционной и субпиксельной обработки гиперспектральных данных, первый из них является, по сути, вырожденным случаем второго. Следствием этого является то, что корреляционному методу присущ более грубый анализ компонентного состава, и он может быть использован, в первую очередь, для решения задачи классификации изображений по категориям объектов (почва, вода, растительность и т.д.) зондируемой территории. Субпиксельный метод, как более тонкий и информативный, позволяет решать задачи “химического зрения” и оценки состояния объектов. В качестве примера гиперспектрального дистанционного зондирования поверхности Земли и математической обработки полученных данных с использованием субпиксельного метода рассмотрим результаты съемок, проведенных с борта самолета ИЛ-20 территории Ямбургского газоконденсатного месторождения. На рис. 3, *а* показана черно-белая свертка гиперкуба участка реки с земснарядом, на рис. 3, *б* приведен пример субпиксельного распознавания этого участка реки с земснарядом. Соответствие цветов составу веществ (реперных компонентов) приведено на рис. 3 внизу справа. Кадры видеоизображения, поступающего непосредственно с двух модулей видимого диапазона, в точке, соответствующей перекрестию на всех рисунках, продемонстрированы на рис. 3, *г*, *д*. При построении изображения на рис. 3, *б* модуль вектора ошибки лежал в пределах  $0 \dots 0,35$ . Для точки в перекрестии величины координат (веса реперных компонентов) по принятому базису и модуль вектора ошибки приведены в таблице.

Под этими рисунками показаны зависимости спектральной плотности от длины волны в точке перекрестия для рис. 3, *г* и *д* соответственно. На врезке (см. рис. 3, *в*) приведено изображение исследуемого участка поверхности Земли, полученное видеокамерой.

Наличие нескольких видов компонентов одной природы (например, три сорта воды) означает, что визуально эти поверхности напоминают воду, но имеют различные спектральные функции. Из рис. 3 наглядно видно преимущество гиперспектрального анализа по сравнению с панхромным снимком — хорошо видно отличие чистой проточной воды от воды, замутненной земснарядом.





**Рис. 3.** Пример субпиксельного распознавания участка земной поверхности с рекой и работающим земснарядом

**Выводы.** Таким образом, в НТЦ “Реагент” в кооперации с несколькими академическими институтами был создан первый действующий российский гиперспектрометр. Разработана методика обработки и интерпретации результатов гиперспектральной съемки. Проведены натурные испытания гиперспектрометра с борта вертолета и самолета. На примере распознавания гиперспектральных изображений продемонстрирована возможность использования субпиксельного метода для распознавания объектов дистанционного зондирования на поверхности Земли и принципиальная новизна получаемых данных.

**Значение вектора ошибки и веса реперных компонентов в точке перекрестия (рис. 3)**

Модуль вектора ошибки	Веса реперных компонентов				
	Вода, замутненная землей	Чистая стоячая вода	Чистая проточная вода	Кустарник	Песок
0,25	0,61	0,07	0,06	0,0	0,01

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин А. П., Орлов А. Г., Родионов И. Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". – 2006. – № 3. – С. 11–24.
2. Использование гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования Земли / Д.В. Воронцов, А.Г. Орлов, А. П. Калинин и др. // Препринт ИПМ РАН № 702, 2002. – 35 с.
3. Shrestha D. P., Margate D. E., Anh H. V. et al. Spectral unmixing versus spectral angle mapper for land degradation assessment: a case study in southern Spain, Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science. – Bangkok, 2002. – P. 1141–1:1141-10.
4. Robila S. A., Varshney P. K. A. Fast Source Separation Algorithm for Hyperspectral Image Processing, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02.2002, vol. 6, 2002. – P. 3516–3518.
5. Manolakis D., Sircusa C., Shaw G. Hyperspectral subpixel target detection using the linear mixing model / IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2001. – V. 39, № 7. – P. 1392–1409.
6. Kruse F. A. Predictive subpixel spatial/spectral modeling using fused HSI and MSI data, Proceedings, SPIE Symposium on Defense & Security, 12–16 April 2004, Orlando, FL, V. 5425. – P. 414–424.

Статья поступила в редакцию 6.06.2006

Дмитрий Викторович Воронцов родился в 1980 г. Окончил Московский институт электроники и математики в 2002 г. Автор 14 научных работ в области вычислительной математики и программирования.

D.V. Vorontsov (b. 1980) graduated from the Moscow Institute for Electronics and Mathematics in 2002. Author of 14 publications in the field of computing mathematics and programming.

Виктор Валентинович Егоров родился в 1939 г. Окончил МАИ им. С. Орджоникидзе в 1963 г. Главный специалист Института космических исследований РАН. Автор 120 научных работ в области методов и средств обработки видеoinформации.

V.V. Yegorov (b. 1939) graduated from the Moscow Aviation Institute n. a. S. Ordzhonikidze in 1963. Chief specialist of the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Author of 120 publications in the field of methods and aids of processing.

Александр Петрович Калинин родился в 1945 г. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1968 г. Ведущий научный сотрудник Института проблем механики РАН. Автор 125 научных работ в области детекторов частиц и излучений, технического зрения, физики атомных столкновений.

A.P. Kalinin (b. 1945) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1968. Leading researcher of the Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. Author of 125 publications in the field of detectors of particles and radiations, technical vision, physics of atom collisions.

Андрей Геннадиевич Орлов родился в 1980 г. Окончил Московский институт электроники и математики в 2002 г., аспирант Института химической физики им. Н.Н.Семенова РАН. Автор 15 научных работ в области научного приборостроения.

A.G. Orlov (b. 1980) graduated from the Moscow Institute for Electronics and Mathematics in 2002. Post-graduate of Institute for Chemical Physics n. a. N.N. Sechenov of the Russian Academy of Sciences. Author of 15 publications in the field of scientific instrument engineering.

Игорь Дмитриевич Родионов родился в 1951 г. Д-р физ.-мат. наук. Заведующий лабораторией Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, генеральный директор Научно-технического центра "Реагент". Автор 140 научных работ в области научного приборостроения, детекторов частиц и излучений, атомной физики.

I.D. Rodionov (b. 1951) – D. Sc. (Phys.-Math.), head of laboratory of Institute for Chemical Physics n. a. N.N. Sechenov of the Russian Academy of Sciences, general director of the research center "Reagent". Author of 140 publications in the field of scientific instrument engineering, detectors of particles and radiations, atom physics.

---

УДК 535.31

Д. В. Дерезовский, В. И. Алехнович,  
И. Н. Пиотровская

### **УСТРАНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕФРАКТОМЕТРА**

*Показана возможность повышения точности рефрактометрических измерений (если априорно известны факторы, искажающие результат измерения) на основе анализа преобразования сигнала в автоматическом рефрактометре с учетом информации о функции рассеяния, из решения интегрального уравнения Фредгольма 1-рода. Точность измерения повышена на 40–60 %.*

Автоматический рефрактометр применяется для контроля состава и свойств растворов в различных отраслях промышленности [1, 2]. Прибор позволяет определить показатель преломления с точностью 0,0001... 0,00001, т.е. до 0,01 % и даже до 0,001 % измеряемой величины. В основе методов отражательной рефрактометрии лежат измерения интенсивности световых потоков, отраженных поверхностью, разделяющей среды, одна из которых является контролируемой.

Измерения концентрации раствора автоматическим рефрактометром [3] сводятся к определению сдвига кривой углового распределения коэффициента отражения контролируемого раствора относительно такой же кривой эталонного раствора (рис. 1). Необходимую точность [4] корреляционной методики определения критического угла  $\varphi_k$  можно получить, учитывая форму кривой эталонного раствора. Однако в реальных условиях корреляция происходит на искаженных сигналах как эталонного, так и контролируемого раствора.

Сигнал при прохождении оптической системы формирования изображения искажается и на фотоприемном устройстве (ФПУ) вместо четкой границы между светом и тенью получается расплывчатая область распределения интенсивности. Вносимые искажения имеют