

# Методы повышения спектрального разрешения изображающих спектрометров, построенных на основе многоканальных приёмников излучения

А. В. ГУРЫЛЁВА\*, А. М. ХОРОХОРОВ, В. С. КОБОЗЕВ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

\* E-mail: guryleva.av@gmail.com

## Аннотация

В статье предложены методы съёмки объектов изображающими спектрометрами, построенными на основе многоканального приёмника излучения, и последующей обработки её результатов, позволяющие значительно повысить спектральную разрешающую способность таких спектрометров с сохранением их исходного пространственного разрешения. Приведена математическая модель процесса съёмки. Определено, что восстановление спектральной плотности энергетической яркости объектов по данным съёмки предложенным методом математически является некорректной обратной задачей. В качестве методов её решения рассмотрены методы Гревилы, вейвлет-преобразования, регуляризации Тихонова и метод Годунова. Показаны результаты численного моделирования рассмотренных методов и установлено, что восстановление спектральной плотности энергетической яркости объектов по данным съёмки, проведённое рассмотренными методами, возможно, и относительная погрешность восстановления составляет доли процента. Определено, что оптимальным методом решения некорректной задачи восстановления спектров яркости объектов является метод вейвлет-преобразования. Также показано, что предложенный метод изображающей спектрометрии работает как при использовании матричных приёмников излучения с увеличенным количеством узкополосных оптических фильтров, так и – широко распространённых стандартных трёхканальных матричных *RGB* приёмников излучения.

**Ключевые слова:** изображающая спектрометрия, некорректные задачи, многоканальная съёмка, восстановление спектра, оптические фильтры.

## Введение

Изображающие спектрометры относятся к довольно востребованному в науке и промышленности типу приборов. Ключевой особенностью изображающих спектрометров является возможность регистрации с помощью них спектральных характеристик каждой точки двумерного изображения объекта. Для условного визуального представления объёма данных, получаемого в ходе измерения изображающим спектрометром, используют понятие куб данных [1]. Куб данных представляет собой трёхмерную структуру, образованную в одной плоскости спектральными характеристиками отражаемого от исследуемой поверхности излучения, а в двух других – соответствующими пространственными координатами.

По количеству спектральных каналов, в которых производится измерение, и спектральному разрешению изображающие спектрометры условно делятся на мультиспектральные и гиперспектральные. К мультиспектральным относят приборы, обеспечивающие регистрацию излучения в 4–100 спектральных каналах с разрешением хуже 10 нм [2, 3]. Среди гиперспектральных наилучшими характеристиками обладают приборы высокого спектрального разрешения [4, 5]. У них более 1000 спектральных каналов и разрешение лучше 1 нм. Для достижения высокого разрешения эти гиперспектрометры содержат диспергирующие системы разного типа, либо построены по принципу фурье-спектрометра [6–9]. Вследствие указанных особенностей и высоких требований к элементам конструкции диспергирующих и интерференционных систем эти приборы обладают значительными габаритами, низкими эксплуатационными характеристиками и высокой стоимостью [10–11]. Кроме того, для обработки информации и формирования куба данных в них необходимо обеспечивать механизм сканирования по одной из координат куба – пространственной или спектральной.

Изображающие спектрометры с числом каналов 100–1000 и разрешением 1–10 нм относят к гиперспектрометрам среднего разрешения. Наибольшей простотой и наилучшими эксплуатационными характеристиками среди всех изображающих спектрометров обладают мультиспектральные приборы [12, 13]. Они представляют собой сочетание объектива и матрицы чувствительных элементов, установленной в плоскости изображения. Чувствительные элементы (микروпиксели) снабжены узкополосными селективными фильтрами, расположение которых на матрице определяет тип многоканального матричного приёмника излучения (ПИ): полосовой, плиточный или мозаичный. С точки зрения построения изображающего спектрометра предпочтение отдают матричным ПИ мозаичного типа, в которых группы микропикселов с селективными фильтрами объединяются в один макропиксел, т.е. в них использован тот же принцип, что и в стандартных *RGB* матрицах, однако количество спектральных каналов увеличено с 3 до 4, 8, 16 и т.д. Повышение спектральной разрешающей способности такого прибора достигается увеличением числа каналов в макропикселе, но это увеличивает размеры макропикселя и, следовательно, снижает пространственное разрешение [14]. В статье рассматривается метод, позволяющий доводить спектральное разрешение мультиспектрального прибора до уровня, характерного для гиперспектрометра среднего разрешения, при сохранении его пространственного разрешения.

Метод состоит в том, что исследуемый объект последовательно снимают через несколько фильтров, спектральные характеристики пропускания которых известны,

и затем математической обработкой параметров полученных изображений находят спектральные характеристики излучения объекта в пределах каждого макропиксела со спектральным разрешением, значительно превышающим возможности мультиспектрометра. В статье также показано, что основой для изображающего спектрометра, работающего по предложенному методу, могут служить не только мультиспектральные матричные ПИ, работающие в четырёх и более каналах, но и стандартные трёхканальные RGB ПИ, а итоговое спектральное разрешение может достигать единиц нанометров.

## Метод

Определение спектральных характеристик протяжённых равномерно освещённых и диффузно отражающих объектов по данным изображающих спектрометров на основе мультиспектральных ПИ представляет собой задачу интерпретации исходной зависимости по результатам косвенных измерений [15, 16], таких как реакция ПИ на входное воздействие [17]. В рамках статьи рассматривается восстановление спектральной характеристики, а именно спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ)  $L_e(\lambda)$  объектов, по величине сигнала  $U$  с пикселей мультиспектрального ПИ по известным функциям спектральной чувствительности соответствующих каналов  $S(\lambda)$ . Значения сигналов с пикселей матричного ПИ в пределах одного макропиксела описываются линейными интегральными уравнениями:

$$\begin{cases} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_1(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda = C \cdot U_1, \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_2(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda = C \cdot U_2, \\ \vdots \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_m(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda = C \cdot U_m, \end{cases}$$

где  $U_1, U_2, U_m$  – величина сигнала пиксела, соответствующего определённому каналу, полученная при съёмке объекта камерой;  $S_1(\lambda), S_2(\lambda), \dots, S_m(\lambda)$  – функция спектральной чувствительности пиксела матричного ПИ в каждом канале;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – границы рабочего диапазона длин волн;  $m$  – количество каналов;  $C$  – коэффициент, не зависящий от  $\lambda$  и определяемый параметрами аппаратуры и условиями съёмки (диаметр входного зрачка объектива, расстояние до объекта, поле зрения и т.п.).

Для приближённых вычислений соответствующих интегралов с постоянным шагом  $\Delta\lambda$  используется система уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_1(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) = C \cdot U_{1tj}, \\ \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_2(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) = C \cdot U_{2tj}, \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_m(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) = C \cdot U_{mtj}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_e(\lambda_i)$  – значения СПЭЯ объекта в дискретных точках рабочей области спектра;  $S_1(\lambda_i), S_2(\lambda_i), \dots, S_m(\lambda_i)$  – дискретные значения спектральной чувствительности пиксела с узкополосным фильтром матричного ПИ;  $v(\lambda_i)$  – весовые коэффициенты шага, зависящие от способа численного интегрирования: методы прямоугольников, трапеций, Симпсона и т.п.;  $U_1, U_2, \dots, U_m$  – величины сигналов пикселей, полученные при съёмке объекта мультиспектральной камерой;  $m$  – количество узкополосных фильтров;  $n$  – количество точек разбиения по спектру;  $i$  – номер шага разбиения.

При известных функциях  $S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_m(\lambda)$  и значениях  $U_1, U_2, U_m$  система (1) сводится к системе линейных уравнений относительно набора выбранных значений  $L_e(\lambda_i)$ . При этом количество значений  $L_e(\lambda_i)$ , определяется значением  $n$ . Погрешность определения этих значений во многом определяется конструкционной матрицей уравнений системы (1) и характером изменения функции  $L_e(\lambda)$ . Как правило, система (1) не позволяет извлекать информацию о функции  $L_e(\lambda)$  с необходимой точностью, поэтому для получения дополнительной информации о СПЭЯ объекта предлагается выполнять несколько дополнительных снимков через специальные оптические фильтры с известными спектральными функциями пропускания  $\tau_j(\lambda)$  ( $j = 1, 2, \dots, p$ ). Тогда к системе уравнений (1) добавляется ещё  $m \times p$  аналогичных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_1(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) \cdot \tau_j(\lambda_i) = C \cdot U_{1tj}, \\ \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_2(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) \cdot \tau_j(\lambda_i) = C \cdot U_{2tj}, \quad j = 1 \dots p \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_m(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) \cdot \tau_j(\lambda_i) = C \cdot U_{mtj}, \end{cases} \quad (1+)$$

где  $U_{1tj}, U_{2tj}, \dots, U_{mtj}$  – величины сигналов пикселей, полученные при съёмке объекта камерой с соответствующими узкополосными фильтрами через оптический фильтр с функцией пропускания  $\tau_j(\lambda_i)$ . (Система уравнений (1+) может быть расширена за счёт включения в неё системы (1). Для этого в системе (1+) следует ввести значение параметра  $j = 0$  и принять  $\tau_0(\lambda_i) = 1$ , т.е. считать, что съёмка объекта проводится без оптического фильтра.)

Выбор необходимого числа оптических фильтров и оптимального характера их функций пропускания определяется необходимой точностью определения функции  $L_e(\lambda_i)$ , требуемыми динамическими характеристиками системы обработки изображений и другими параметрами технического задания.

Для проведения моделирования и осуществления численного решения удобно представить систему уравнений (1+) в матричном виде:

$$S \cdot l = u, \quad (2)$$

где  $S$  – матрица размера  $m \cdot (p + 1) \cdot n$ , учитывающая спектральную чувствительность пикселей матричного ПИ, известные спектральные функции пропускания  $\tau_j(\lambda_i)$  и весовые коэффициенты шага  $v(\lambda_i)$ ;  $l$  – вектор из  $n$  элементов,

определяющий СПЭЯ объекта;  $\mathbf{u}$  – вектор из  $m \cdot (p+1)$  элементов, определяющий величины сигнала пикселей, полученные при съёмке объекта мультиспектральной камерой непосредственно и с дополнительными оптическими фильтрами.

### Метод Гревилля

При высоких требованиях к спектральной разрешающей способности изображающего спектрометра и естественном стремлении к их технической реализации число неизвестных значений  $L_e(\lambda_i)$  оказывается большим и порой значительно большим числа уравнений (1+).

При этом задача (2) может быть либо неразрешима, либо иметь неединственное решение [18–20], т.е. быть математически некорректно поставленной, поэтому в таких случаях используется псевдорешение [21–23], т.е. такой вектор  $\mathbf{l}$ , который удовлетворяет следующему функционалу [24]:

$$\|S \cdot \mathbf{l} - \mathbf{u}\|^2 \rightarrow \min.$$

С другой стороны, нормальное псевдорешение в силу известной теоремы о перпендикуляре определяется однозначно и может быть найдено из уравнения

$$\mathbf{l} = S^+ \cdot \mathbf{u}, \quad (3)$$

где  $S^+$  – псевдообратная матрица, полученная псевдообращением матрицы  $S$ .

Псевдообращение может пониматься как решение задачи наилучшей аппроксимации по методу наименьших квадратов. Метод псевдорешений служит одним из простейших способов восстановления СПЭЯ объектов по данным мультиспектральной съёмки, а нахождение псевдообратной матрицы в настоящей работе осуществлялось методом Гревилля.

### Метод вейвлет-преобразования

Уравнение (2) представляет собой обратную некорректную задачу [25, 26], а её решение в виде (3) является простым, но с серьёзным недостатком. Он заключается в том, что в силу особенностей обсуждаемой в статье проблемы матрица  $S$  зачастую является плохо обусловленной (из-за линейной зависимости строк матрицы между собой), и, соответственно, влекущей за собой низкую устойчивость решения к погрешностям правой части уравнения (2). Для устранения этого фактора снижения точности восстановления исходного спектра яркости можно использовать вейвлет-преобразование функции [27, 28].

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала – это его представление в виде обобщённого ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из материнского (исходного) вейвлета  $\psi(\lambda)$ , обладающего определёнными свойствами за счёт операций сдвига во времени  $b$  и изменения временного масштаба  $a$ . Для заданных значений параметров  $a$  и  $b$  функция  $\psi_{ab}(\lambda)$  является вейвлетом, порождаемым материнским вейвлетом  $\psi(\lambda)$  [29]. В настоящей статье вейвлеты используются для сокращения избыточной информации. Каждая строка матрицы  $S$  раскладывается по базису, а далее в решении уравнения (2) относительно  $\mathbf{l}$  используются не элементы матрицы  $S$ , число которых определяется количеством точек

разбиения по спектру и может достигать десятков и сотен единиц, а вейвлет-коэффициенты её разложения по базису, число которых определяется количеством функций, входящих в базис, что в конечном счёте на порядки снижает число обусловленности  $\mu$ . В настоящей статье в качестве материнской функции вейвлетов использовался интеграл ошибок  $\psi(\lambda) = \text{erf}(\lambda)$ , а базис разложения состоял из  $k = 8$  функций и выглядел следующим образом:

$$\begin{cases} \psi_0(x) = 1, \\ \psi_1(x) = \text{erf}(2 \cdot x), \\ \psi_2(x) = \text{erf}\left(4 \cdot \left(x - \frac{1}{2}\right)\right), & \psi_5(x) = \text{erf}\left(8 \cdot \left(x + \frac{1}{2}\right)\right), \\ \psi_3(x) = \text{erf}\left(4 \cdot \left(x + \frac{1}{2}\right)\right), & \psi_6(x) = \text{erf}\left(8 \cdot \left(x - \frac{3}{4}\right)\right), \\ \psi_4(x) = \text{erf}\left(8 \cdot \left(x - \frac{1}{4}\right)\right), & \psi_7(x) = \text{erf}\left(8 \cdot \left(x + \frac{3}{4}\right)\right), \end{cases} \quad (4)$$

где  $x$  – переменная, имеющая смысл длины волны  $\lambda$ , приведённой к стандартному отрезку  $[-1, 1]$ , аналогично тому как в [30].

Определение СПЭЯ объекта с использованием вейвлет-преобразования матрицы  $S$  производилось по следующей, полученной из выражения (3), формуле

$$\mathbf{l} = \Phi \cdot (S \cdot \Phi)^+ \cdot \mathbf{u},$$

где  $\Phi$  – матрица значений базовых функций из выражений (4) размера  $(k \times n)$ ;  $(S \cdot \Phi)^+$  – матрица, полученная псевдообращением матрицы  $S \cdot \Phi$ .

### Метод регуляризации Тихонова

Так как вследствие некорректности задачи восстановления исходного спектра яркости нельзя получить точного решения уравнения (2), устойчивого к малым изменениям исходных данных, следует искать некоторое приближённое решение [31]. Решаемое уравнение (2) – операторное первого рода [32]; в [25, 33] показано, что его решение эквивалентно решению задачи минимизации функционала:

$$M^\alpha(\mathbf{l}, \mathbf{u}) \equiv \|S \cdot \mathbf{l} - \mathbf{u}\|^2 + \alpha \cdot \|\mathbf{l}\|^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\mathbf{l} \in L, \quad \alpha > 0,$$

где  $M^\alpha(\mathbf{l}, \mathbf{u})$  – сглаживающий функционал Тихонова,  $\alpha$  – параметр регуляризации.

Регуляризованное решение задачи (2) определяется как единственное решение уравнения Эйлера [25, 31]

$$(S' \cdot S + \alpha \cdot E) \cdot \mathbf{l} = S' \cdot \mathbf{u} + \alpha \cdot \mathbf{u}^*,$$

где  $E$  – единичная матрица порядка  $n$ .

Случаю  $\mathbf{u}^* = 0$  соответствует каноническая форма метода регуляризации, которая и использовалась в данной работе.

При практическом применении этого метода очень важны алгоритмические способы выбора параметра  $\alpha$ . Один из них обоснован в работе [34] и заключается в выборе  $\alpha$  по значениям функционала  $M^\alpha(\mathbf{l}, \mathbf{u})$  на регуляризован-

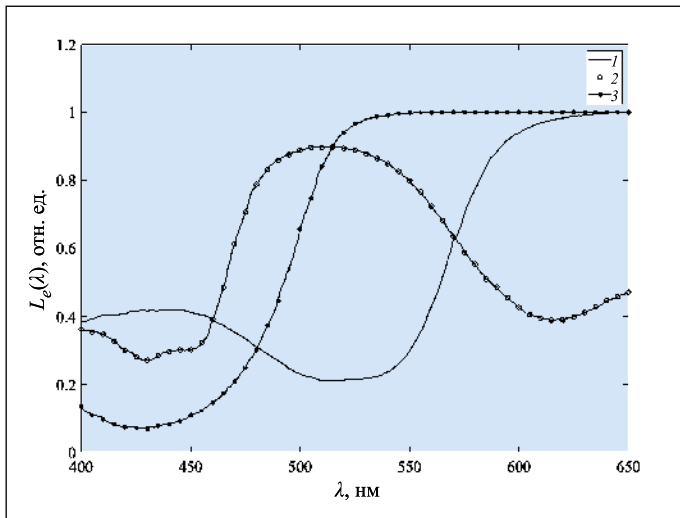


Рис. 1. Кривые относительной СПЭЯ образцов 1 (1), 2 (2) и 3 (3)

ных решениях из условия (5). Решение такой задачи ищется по принципу обобщённой невязки [35] методом последовательных приближений Ньютона на сетке по  $\alpha$ :  $\alpha_{s+1} = \alpha_s + \beta$ ;  $s = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\beta = 0,001$ .

#### Метод Годунова

Согласно [36, 37], использование дополнительной информации о том, что искомое решение имеет не слишком большие вторые производные, позволяет при составлении системы линейных уравнений так её дополнять, что это дополнение существенно снижает число обусловленности и делает систему разрешимой. В таком случае система уравнений (1+) преобразуется в систему вида

$$\begin{bmatrix} (1-\tau) \cdot S \\ \tau \cdot B \end{bmatrix} \cdot I = \begin{bmatrix} (1-\tau) \cdot u \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $B$  – матрица размера  $n$ , элементы которой  $(b_{ij})$  таковы, что

$$b_{ij} = \frac{-2}{(1/n-1)^2} \quad \text{при } i = j;$$

$$b_{ij} = \frac{-1}{(1/n-1)^2} \quad \text{при } i = j-1 \text{ и } i = j+1;$$

$$b_{ij} = 0 \quad \text{при } |i-j| \geq 2;$$

$\tau$  – коэффициент, определяемый выражением  $\tau = 1/(n-1)^2$ .

Ожидалось, что при соблюдении описанных выше условий вычисления элементов матрицы  $B$  и коэффициента  $\tau$  нормальное решение системы (6), которую можно переписать как

$$((1-\tau)^2 \cdot S' \cdot S + \tau^2 \cdot B' \cdot B) \cdot I = (1-\tau)^2 \cdot S' \cdot u,$$

будет близко к интересующему нас вектору [24].

#### Процедура моделирования

Проверка описанной методики определения СПЭЯ объекта по данным косвенных измерений проводилась с помощью численного моделирования согласно выражению (1+). В качестве исследуемых образцов использовались реальные однородные диффузно рассеивающие цветные пластинки. Кривые СПЭЯ этих образцов,  $L_{e1}(\lambda_i)$ ,  $L_{e2}(\lambda_i)$  и  $L_{e3}(\lambda_i)$ , определялись с помощью сертифицированного устройства: спектрофотометра *Perkin Elmer Lambda 950* (рис. 1).

Для каждого образца было проведено отдельное моделирование. Многоканальные мозаичные матричные ПИ выпускаются с макропикселями, состоящими из некоторого фиксированного числа пикселей с определённым фильтром (по количеству каналов  $m$ ). В моделировании рассматривались два ПИ: стандартная *RGB* матрица с тремя каналами ( $m = 3$ ) и мультиспектральный восьмиканальный матричный мозаичный ПИ, макропиксели которого содержали восемь пикселей с узкополосными фильтрами ( $m = 8$ ). Для каждой матрицы проводилось отдельное численное моделирование. Кривые относительной спектральной чувствительности *RGB* матрицы,  $S_R(\lambda)$ ,  $S_G(\lambda)$  и  $S_B(\lambda)$ , и мультиспектральной восьмиканальной матрицы,  $S_1(\lambda)$ ,  $S_2(\lambda)$ , ...,  $S_8(\lambda)$ , соответственно, приведены на рис. 2, а и б.

В рамках численного моделирования в качестве оптических фильтров, поочерёдно включаемых в ход лучей, были выбраны цветные стекла ЖЗС-5, ЖЗС-18, СЗС-16 и СС-1, из каталога оптического стекла, функции пропускания которых,  $\tau_1(\lambda_i)$ ,  $\tau_2(\lambda_i)$ ,  $\tau_3(\lambda_i)$  и  $\tau_4(\lambda_i)$  ( $p = 4$ ), соответствуют ГОСТ 9411–91. Выбор указанных цветных стёкол выполнялся с применением классического метода, заключающегося в подборе фильтров с максимально различным видом кривых пропускания и равномерным покрытием всего рабочего диапазона  $\lambda$  [38].

На первом этапе моделирования из прямого решения уравнения (1+) по известным параметрам – спектральной чувствительности пикселей матричного ПИ с филь-

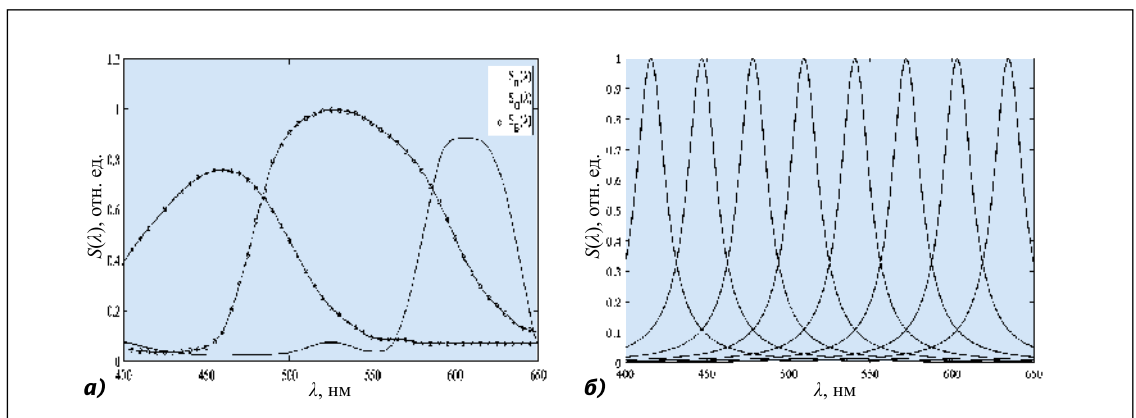


Рис. 2. Кривые относительной СПЭЯ пикселей с фильтрами Байера трёхканальной *RGB* матрицы (а) и восьмиканальной мультиспектральной матрицы (б)



Результаты моделирования восстановления спектральной плотности яркости по данным многоканальной съёмки

Номер образца	Относительная погрешность, %							
	Метод Гревилля		Метод вейвлет-преобразования		Метод регуляризации Тихонова		Метод Годунова	
	$m=3$	$m=8$	$m=3$	$m=8$	$m=3$	$m=8$	$m=3$	$m=8$
	$p=4$	$p=2$	$p=4$	$p=2$	$p=4$	$p=2$	$p=4$	$p=2$
1	0,96	2,86	0,62	0,25	1,33	0,77	0,65	1,61
2	0,91	2,55	0,29	0,11	1,20	0,61	0,42	1,33
3	0,61	2,00	0,30	0,15	1,11	0,56	0,55	1,54

трами Байера  $S_R(\lambda_i)$ ,  $S_G(\lambda_i)$ ,  $S_B(\lambda_i)$ , СПЭЯ образцов  $L_e(\lambda_i)$  и функциям пропускания  $\tau_j(\lambda_i)$  дополнительных  $p$  фильтров ( $j = 1, 2, \dots, p$ ) – определяются величины сигнала пикселей стандартной  $RGB$  матрицы  $U_R \tau_j$ ,  $U_G \tau_j$ ,  $U_B \tau_j$ , ( $j = 0, \dots, p$ ) Процедура определения величин сигналов пикселей стандартной  $RGB$  матрицы проводится отдельно для каждого образца, т.е. для  $L_{e1}(\lambda_i)$ ,  $L_{e2}(\lambda_i)$ ,  $L_{e3}(\lambda_i)$ . Аналогично получают соответствующие модельные значения величин сигналов пикселей мультиспектрального ПИ. В этом случае используется другое количество  $p$  дополнительных оптических фильтров. Для обеспечения достаточной точности моделирования шаг разбиения по спектру для всех функций составил 1 нм, что для спектрального диапазона 400–650 нм соответствовало общему числу точек  $n = 251$ .

Второй этап моделирования заключался в определении СПЭЯ,  $L_{e1}^*(\lambda_i)$ ,  $L_{e2}^*(\lambda_i)$  и  $L_{e3}^*(\lambda_i)$ , каждого образца в  $n$  точках одним из приведённых выше методов решения обратной некорректной задачи (2). Кроме того, СПЭЯ образцов определялись отдельно для двух вариантов моделирования: с трёхканальным ( $m = 3$ ) и с восьмиканальным ( $m = 8$ ) матричными ПИ. Мерой соответствия восстановленного таким образом спектра исходному являлась относительная погрешность, выраженная в процентах.

## Результаты

Основные результаты математического моделирования методов определения СПЭЯ объектов выглядят следующим образом.

1. Решение обратной некорректной задачи по определению СПЭЯ объекта с точностью, характерной для гиперспектрометра среднего разрешения, без применения дополнительных оптических фильтров ни одним из предложенных методов не представляется возможным. Относительные погрешности восстановленной и исходной СПЭЯ образцов составляют десятки процентов. Это относится как к многоканальным, так и к  $RGB$  ПИ.

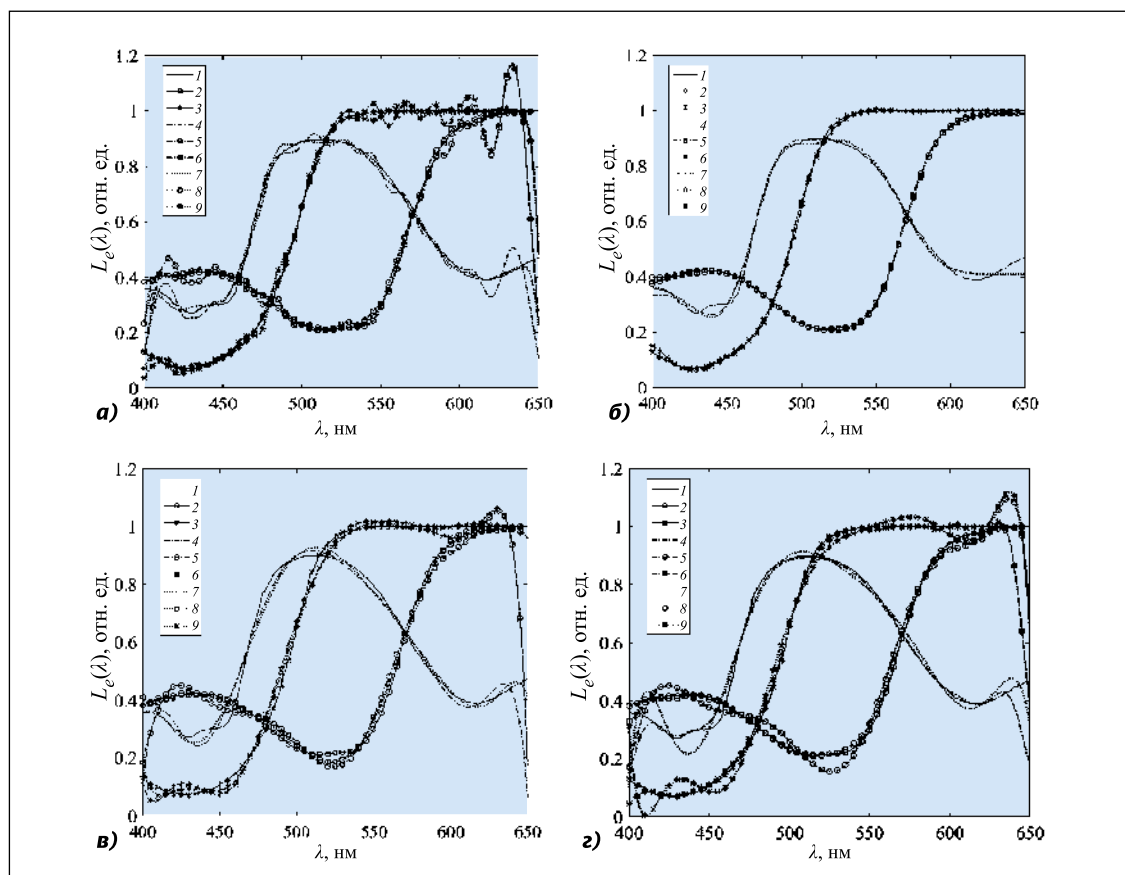
2. Использование при съёмке объекта дополнительных фильтров способствует увеличению точности определения СПЭЯ с требуемым спектральным разрешением. Для мультиспектральных систем в большинстве случаев в зависимости от числа каналов достаточно одного-двух дополнительных фильтров. При используемом в статье для расчёта восьмиканальном приёмнике излучения целесообразно использовать значение  $p = 2$ . Установлено, что метод изображающей спектрометрии на основе многока-

нальных ПИ даёт хорошие результаты не только для матричных ПИ с увеличенным, относительно стандартного, количеством каналов, что было ожидаемым [39], но и для широко распространённых трёхканальных матричных ПИ. В последнем случае количество оптических фильтров  $p$ , участвующих в многоканальной съёмке, увеличивается, но остаётся в технически реализуемых пределах, и представляется оправданным [40, 41]. В настоящей статье принято значение  $p = 4$ .

3. На рис. 3 проиллюстрированы результаты восстановления исходной СПЭЯ методами Гревилля, вейвлет-преобразования, Годунова и регуляризации Тихонова. Из графиков следует, что для определения СПЭЯ разных образцов все рассмотренные методы решения уравнения (2) представляются применимыми. На границах спектрального диапазона практически все методы обнаруживают некоторое расхождение исходной и восстановленной кривых, и это обстоятельство следует учитывать при практическом применении методов. Основная проблема при использовании метода Тихонова – расчёт оптимального значения параметра регуляризации  $\alpha$ . При моделировании значения этого параметра находились методом последовательных приближений Ньютона. Они составили 0,0616 при  $m = 3$  и 0,1481 при  $m = 8$ . Метод вейвлет-преобразований даёт более однозначное представление о виде кривой СПЭЯ, поэтому в задачах, требующих дальнейшего включения в расчёты значений в определённых точках восстановленных кривых, предпочтительно использовать метод вейвлет-преобразования ввиду меньшей относительной погрешности восстановления СПЭЯ этим методом.

4. В таблице представлены значения относительной погрешности восстановления СПЭЯ трёх объектов методами решения некорректных обратных задач, описанными выше. Из таблицы видно, что численное моделирование обсуждаемых методов многоканальной изображающей спектрометрии и методов последующей обработки данных даёт положительные результаты, и исходная СПЭЯ образцов восстанавливается с малой погрешностью. Может показаться, что приведённые в таблице результаты слишком оптимистичны, но следует подчеркнуть, что речь здесь идёт лишь о погрешностях восстановления спектральных кривых с точки зрения методов решения обратных задач. При использовании методов Гревилля и Годунова наблюдается ухудшение результатов с ростом количества каналов матрицы, что объясняется высокой чувствительностью этих методов к плохой обусловленности матри-

Рис. 3. Кривые относительных СПЭЯ: исходной и восстановленной методами Гревилля (а), вейвлет-преобразования (б), регуляризации Тихонова (в) и Годунова (г). Исходные кривые образцов – 1, 2, 3; кривые, восстановленные по данным трёхканальной съёмки ( $m = 3$ ,  $p = 4$ ) – 4, 5, 6; кривые, восстановленные по данным восьмиканальной съёмки ( $m = 8$ ,  $p = 2$ ) – 7, 8, 9



цы  $S$ , входящей в расчёт, но метод Годунова показывает более предпочтительные результаты по сравнению с методом Гревилля. С другой стороны, методы вейвлет-преобразования и регуляризации Тихонова лучше работают в условиях высокого числа обусловленности матрицы  $S$ , что служит важным фактором в решении некорректных задач, и с увеличением числа уравнений, входящих в систему (1+), относительная погрешность расчёта с помощью этих методов падает. При этом метод вейвлет-преобразования позволяет уменьшить число обусловленности ( $\mu$ ) матрицы  $S$  при  $m = 3$ ,  $p = 4$  с  $8,4 \cdot 10^2$  до  $0,3 \cdot 10^2$ , а при  $m = 8$ ,  $p = 2$  – с  $1,4 \cdot 10^3$  до  $0,1 \cdot 10^3$ , и получить усреднённое по трём образцам значение погрешности не более 0,40 % при  $m = 3$ ,  $p = 4$  и 0,17 % при  $m = 8$ ,  $p = 2$ , что, очевидно, является лучшим результатом.

### Обсуждения и заключение

В статье рассмотрены методы съёмки объектов изображающим спектрометром, построенным на основе многоканального ПИ, с соответствующей программной обработкой результатов съёмки, позволяющие проводить определение СПЭЯ объектов с повышенной спектральной разрешающей способностью при сохранении исходной пространственной разрешающей способности за счёт получения дополнительной информации о спектральных характеристиках объекта в процессе его съёмки через специальные оптические фильтры. Приведена математическая модель процесса съёмки, подтверждающая теоретическую обоснованность метода. В ходе работы выявлено, что задача обработки результатов нетривиальна, и потому в статье приведены результаты моделирования её решения

разными методами. Определено, что наиболее универсальный метод решения некорректной задачи восстановления кривых СПЭЯ объектов – метод вейвлет-преобразования. Установлено численным моделированием, что относительная погрешность восстановления СПЭЯ объектов по данным многоканальной съёмки предложенным методом составляет около 0,17 %, являясь удовлетворительной. Также показано, что обсуждаемый метод многоканальной изображающей спектрометрии работает как при использовании мультиспектральных восьмиканальных матричных ПИ, так и – широко распространённых стандартных трёхканальных матричных ПИ. В случае использования трёхканальных ПИ количество используемых в съёмке оптических фильтров представляется конструктивно достижимым и оправданным.

Основными достоинствами описанного метода многоканальной съёмки представляются простота его технической реализации, малая подверженность влиянию внешних факторов (повышенные вибрации, значительные изменения температуры и др.) и возможность получения изображающим спектрометром данных по трём координатам куба без организации сканирования с высоким спектральным и пространственным разрешением. Рассмотренный метод допускает большое количество вариаций его осуществления, (например, путём изменений количества каналов съёмки и участвующих в ней оптических фильтров, кривых пропускания этих фильтров и т.д.). Вследствие такой вариативности оптимизация значений указанных параметров и их комбинаций, а также учёт влияния погрешностей измерения на результаты восстановления СПЭЯ объектов по данным косвенных измерений должны явиться предметом дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин А.Д., Дёмин А.В. Имитационная модель многоканального гиперспектрометра Оффнера // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 521–528. Doi 10.18287/0134-2452-2015-39-4-521-528.
2. Larar Allen M. et al. Multispectral, hyperspectral, and ultraviolet remote sensing technology, techniques, and applications III // Proc. SPIE International Society for Optical Engineering. 13–14 October 2010. Incheon, Korea Republic, 2010. –Vol. 7857.
3. Родионов И.Д., Родионов А.И., Ведешин Л.А., Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П. Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования // Исследование земли из космоса. – 2013. – № 6. – С. 81–93.
4. Горбунов Г.Г., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Интерференционные гипер- и ультраспектральные видеоспектрометры для задач дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Т. 1, № 33. – С. 70–94.
5. Vilaseca M., Schael B., Delpueyo X., Chorro E., Perales E., Hirvonen T., Pujol J. Repeatability, reproducibility, and accuracy of a novel pushbroom hyperspectral system // Color Research & Application. – 2013. – Vol. 39, No. 6. – P. 549–558. Doi 10.1002/col.21851.
6. Pozhar V.E., Machikhin A.S., Gaponov M.I., Shirokov S.V., Mazur M.M., Sheryshev A.E. Hyper-spectrometer Based on an Acousto-optic Tuneable Filters for UAVS // Light & Engineering. – 2019. – Vol. 27, No. 3 – P. 99–104.
7. Палто С.П., Алпатова А.В., Гейвандов А.Р., Блинов Л.М., Лазарев В.В., Юдин С.Г. Фурье-спектроскопия как метод изучения фотоэлектрических свойств органических систем // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, № 2. – С. 210–220. Doi 10.21883/OS.2018.02.45526.209–17.
8. Заварзин В.И., Митрофанова Ю.С. Схемные решения для перспективной гиперспектральной аппаратуры // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 4. – С. 12–16.
9. Головин А.Д., Дёмин А.В. Имитационная модель многоканального гиперспектрометра Оффнера // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 521–527. Doi 10.18287/0134-2452-2015-39-4-521-528.
10. Балашов А.А., Вагин В.А., Голяк И.С., Морозов А.Н., Нестерук И.Н., Хорохорин А.И. Фурье-спектрометр видимого и ближнего ИК диапазонов // Радиостроение. – 2017. – № 6. – С. 27–38. Doi 10.24108/rdeng.0617.0000124.
11. Архипов С.А., Заварзин В.И., Ли А.В. // Зеркальные оптические системы для малогабаритной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования земли из космоса / В сб. Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Материалы 10-й Международной научно-технической конференции. – Российское НТОРЭС им. А.С. Попова, 2017. – С. 262–264.
12. Veys C., Davies P., Hibbert J., Grieve B. (2017). An Ultra-Low-Cost Active Multispectral Crop Diagnostics Device. 1005–1007. Paper presented at IEEE Sensors 2017 Conference, Glasgow, United Kingdom. Doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234211.
13. Burns P.D., Berns R.S. Analysis Multispectral Image Capture // Color Imaging Conf. – 1996. – № 1. – P. 19–22.
14. Хорохоров А.М., Введенская А.В., Ширанков А.Ф., Кобозев В.С. Алгоритм расширения возможностей матричных приёмников излучения с фильтрами Байера / Междунар. конф. «Прикладная оптика-2018». – СПб.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, 2018. – Т. 2.
15. Варенцова С.А., Трофимов В.А., Троциев Ю.В. Восстановление сигнала и динамики его спектральных характеристик при нерегулярном наборе измерений // Ж. техн. физ. – 2008. – Т. 78, № 7. – С. 57–68.
16. Жучко О.В., Пытьев Ю.П., Восстановление функциональной зависимости теоретико-возможностными методами // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2003. – Т. 43, № 5. – С. 767–783.
17. Hardeberg J. Acquisition and reproduction of color images: colorimetric and multispectral approaches. – USA: Dissertation.com, 2001.
18. Ванник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
19. Иванов В.К., Васин В.В., Танана В.П. Теория линейных некорректных задач и её приложение. – М.: Наука, 1978. – 206 с.
20. Сизиков В.С., Лавров А.В. Современные устойчивые математические и программные методы восстановления искажённых спектров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 6.
21. Сыдыхов А.Ш., Аранов С.Ю., Аранова С.П. Псевдоинверсная обработка данных мультиспектральной фотосъёмки в стационарных зонах изображения / Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»: сб докл. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 179–185.
22. El-Rifai I. et al. Enhanced Spectral Reflectance Reconstruction Using Pseudo-Inverse Estimation Method // Int. J. Image Process. IJIP. – 2013. – Vol. 7, № 3. – P. 278–285.
23. Барлиани А.Г. Разработка алгоритмов уравнивания и оценки точности свободных и несвободных геодезических сетей на основе псевдонормального решения. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 135 с.
24. Морозов В.В., Гребенников А.И. Методы решения некорректно поставленных задач. Алгоритмический аспект. – М.: – Изд-во Моск. ун-та. – 1992. – 319 с.
25. Vogel C.R. Computational Methods for Inverse Problems. SIAM. Philadelphia. – 2002. – 179 p. Doi 10.1137/1.9780898717570.
26. Гурьева А.В., Хорохоров А.М., Латышев В.И. Сравнительный анализ методов решения некорректных обратных задач для многоканальной гиперспектрометрии // Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 127, № 4. – С. 551–557. Doi 10.21883/OS.2019.10.48356.171–19
27. Аранов С.Ю., Аранова С.П., Дубинин И.С., Сергеев А.П. Восстановление спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъёмки / Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации: материалы международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 21–33.
28. Аранов С.Ю., Тарасов Д.А., Сергеев А.П., Колмогоров Ю.Н. Моделирование спектров отражения на основе базиса из функций типа интеграла ошибок // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 6. – С. 17–29.
29. Новиков Л.В. Спектральный анализ сигналов в базе вейвлетов // Научное приборостроение. – 2000. – Т. 10, № 3. – С. 70–77.
30. Тарасов Д.А. Моделирование спектров отражения суперпозицией полиномов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 5. – С. 59–66.
31. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
32. Calvetti D., Morigi S., Reichel L., Sgallari F. Tikhonov regularization and the L-curve for large discrete ill-posed problems // J. Comput. Appl. Math. – 2000. – Vol. 123. – P. 423–446.



33. Hansen C.A. Matlab Package for Analysis and Solution of Discrete Ill-Posed Problems // Numerical Algorithms. – 1994. – Vol. 6. – P. 1–35.

34. Морозов В.А. Линейные и нелинейные некорректные задачи // Итоги науки и техн. Сер. Мат. анализ. – 1973. – Т. 11. – С. 129–178.

35. Гончарский А.В., Леонов А.В., Ягола А.Г. Обобщённый принцип невязки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1973. – Т. 13, № 2. – С. 294–302.

36. Годунов С.К., Антонов А.Г., Кирилюк О.П., Костин В.И. Гарантированная точность решения систем линейных уравнений в евклидовых пространствах. – Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1988. – 456 с.

37. Ванник В.Н., Михальский А.И. О поиске зависимостей методом упорядоченной минимизации риска // Автомат. и телемех. – 1974. – № 10. – С. 10–21.

38. Connah D., Alsam A., Hardeberg J.Y. Multispectral imaging: How many sensors do we need? // J. Imaging Sci. Technol. – 2006. – Vol. 50, No. 1. – P. 45–52. Doi 10.2352/j.imagingsci.technol. (2006)50:1(45).

39. Helling S., Seidel E., Biehlig W. Algorithms for spectral color stimulus reconstruction with a seven-channel multispectral camera / Proc. of CGIV (2nd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision). – 2004. – Vol. 2. – P. 254–258.

40. Imai F.H., Berns R.S. Spectral estimation using trichromatic digital cameras // Proc. Int. Symp. Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives. – Chiba: Society of Multispectral Imaging of Japan, 1999. – P. 42–48.

41. Masahiro Y., Hideaki H., Nagaaki O. Beyond Red–Green–Blue (RGB): Spectrum-Based Color Imaging Technology // J. Imaging Sci. Technol. – 2008. – Vol. 52, No. 1. – P. 1–15.



**Гурылёва Анастасия Валентиновна, инженер.** Окончила в 2017 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: фотоника, оптотехника, спектрометрия



**Хорохов Алексей Михайлович, кандидат техн. наук.** Окончил в 1968 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы» МВТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный работник высшей школы РФ. Область научных интересов: фотоника, оптотехника, лазерная техника



**Кобозев Виталий Сергеевич, студент 5-го курса** кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: оптика, оптико-электронные приборы

## Перенос на 2021 год: новые даты выставки *Interlight Russia | Intelligent building Russia*

В связи с нестабильной эпидемиологической ситуацией в России и в мире компания Messe Франкфурт РУС приняла решение о переносе дат проведения 26-й Международной выставки освещения, автоматизации зданий, электротехники и систем безопасности – *Interlight Russia | Intelligent building Russia*.

Новые даты проведения выставки – 13–16 сентября 2021 года.

По словам организаторов выставки, решение было принято исходя из того, что прогнозировать ситуацию с проведением выставки этой осенью крайне сложно: международный опыт показывает, что ограничения на проведение массовых мероприятий будут отменены в последнюю очередь, существует высокий риск повторных запретов, связанных с большой вероятностью новых вспышек заболеваемости. Кроме того, весомой причиной переноса выставки послужило отсутствие гарантий её проведения в текущей ситуации на высоком уровне. Привлечение на выставку ведущих мировых и российских экспертов, а также целевой аудитории может стать невыполнимой задачей: специалисты отрасли, как и вся страна, в первую очередь заботятся о безопасности и здоровье близких. Организаторы полностью разделяют и поддерживают эти ценности.

«В сентябре 2020 года мы готовы были обеспечить на выставке все зависящие от нас меры безопасности и принять тот факт, что никто из иностранных партнёров и экспонентов не сможет присутствовать на мероприятии. Однако до выставки осталось чуть больше 3-х месяцев, а у нас до сих пор нет уверенности в возможности проведения выставки ввиду ограничительных мер, непредсказуемости развития эпидемии. Мы не можем обнадёживать участников выставки, откладывая это сложное для нас решение. Честность и доверительные отношения с экспонентами и посетителями для нас очень важны, поэтому мы объявляем о переносе дат выставки заранее, чтобы компании могли спланировать вторую половину года с учётом переноса выставки и участия в 2021 году», – Алексей Карамян, руководитель проекта *Interlight Russia | Intelligent building Russia*.

Билеты, полученные на выставку 2020 года, будут действительны для посещения выставки в 2021 году.

Организаторы выразили благодарность партнёрам и участникам выставки за понимание и призывали представителей отрасли поддерживать друг друга в это сложное время.

www.interlight-building.ru.  
messefrankfurt.com  
01.06.2020