

УДК 535.338.41

Ю. В. Федотов, М. Л. Белов,  
О. А. Матросова, В. А. Городничев,  
В. И. Козинцев

## МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОСНОВАННЫЙ НА РЕГИСТРАЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУХ УЗКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ

*Рассмотрена задача обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности. Показано, что использование метода, основанного на регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах, позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения с вероятностью правильного обнаружения, близкой к единице.*

**E-mail:** [ekomonit@mx.bmstu.ru](mailto:ekomonit@mx.bmstu.ru)

**Ключевые слова:** нефтяные загрязнения, обнаружение, флуоресценция, водная поверхность.

С 60-х гг. XX в. актуальной становится задача контроля нефтяных загрязнений морских, озерных и речных акваторий промышленно развитых и нефтедобывающих стран. Это явилось побудительным фактором для разработки дистанционных датчиков, предназначенных для проведения мониторинга нефтяных загрязнений с борта летательных аппаратов. Одним из наиболее перспективных классов таких дистанционных авиационных датчиков являются лазерные флуорометры [1].

Флуоресцентный анализ широко используется в науке и технике в качестве высокоточного аналитического средства, позволяющего в лабораторных условиях детектировать примеси в веществе до нескольких частиц на миллион. Создание мощных лазеров, работающих в ближнем УФ-диапазоне, позволило распространить методы флуоресцентного анализа на область дистанционного зондирования [1–6].

Принцип действия лазерного флуорометра основан на облучении водной поверхности лазером в УФ-диапазоне (для возбуждения флуоресценции) и регистрации характеристик флуоресцентного излучения.

Весьма важными информационными признаками нефтяных загрязнений на водной поверхности являются форма спектральных кривых флуоресценции нефтепродуктов и время затухания флуоресценции, что позволяет потенциально решать задачи не только обнаружения нефтяных загрязнений, но и их идентификации.

Наибольший интерес для практических приложений представляет регистрация формы спектральных кривых флуоресценции, потому что для регистрации времени затухания флуоресценции необходима сложная измерительная аппаратура с высоким временным разрешением.

Поскольку спектры флуоресценции нефти и нефтепродуктов сильно отличаются от спектра флуоресценции чистой воды, это дает возможность обнаруживать нефтяные загрязнения на водной поверхности путем регистрации спектра флуоресценции исследуемого участка акватории.

К настоящему времени разработаны и созданы различные методы и датчики для дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений и измерения их характеристик [1–10].

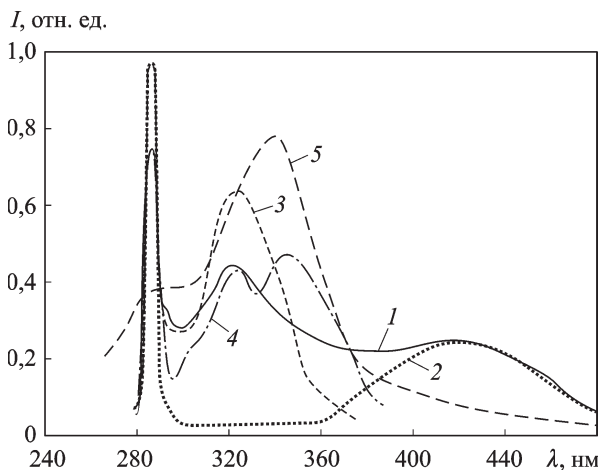
Общим недостатком существующих методов дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, в которых используется регистрация флуоресцентного излучения, является их сложность и избыточность используемой информации. Далее рассматривается более простой (в сравнении с существующими) метод обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения только в двух узких спектральных диапазонах.

К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по спектрам флуоресценции различных нефтепродуктов и чистой воды для разных акваторий (и для разных длин волн возбуждения). Эти экспериментальные данные были получены разными авторами, на различной аппаратуре, для разных нефтепродуктов, при использовании различных калибровок и т.п.

На рис. 1 показаны спектры флуоресценции нефтепродуктов, растворенного органического вещества (РОВ) и чистой воды для длины волны возбуждения 266 нм [3, 5, 11]. Из рис. 1 следует, что спектры флуоресценции нефтепродуктов, РОВ и чистой воды сильно отличаются, поэтому, используя, например, корреляционный анализ, можно уверенно обнаруживать нефтяные загрязнения на водной поверхности. Однако такой метод использует очень большой объем информации, поскольку требует регистрацию флуоресцентного излучения в широком диапазоне спектра.

Естественно возникает вопрос об отборе из используемого большого объема информации лишь некоторых наиболее информативных признаков [12], которые смогли бы обеспечить решение задачи обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности.

Вопрос о выборе из широкого спектра флуоресценции лишь некоторых регистрируемых узких спектральных диапазонов решали, используя экспериментально полученные спектры флуоресценции различных нефтепродуктов и воды с разными характеристиками [1–11].



**Рис. 1. Спектры флуоресценции нефтепродуктов, РОВ и воды:**

1 — вода [11]; 2 — РОВ [11]; 3 — нефть Шаимская [11]; 4 — мазут [11]; 5 — нефть Ливийская [5]

Для этого была создана база данных экспериментальных спектров флуоресценции различных веществ.

Спектры флуоресценции оцифровывались, математически обрабатывались и заносились в специально разработанную в СУБД MySQL реляционную базу данных, представляющего собой набор взаимосвязанных таблиц, содержащих информацию о спектрах флуоресценции различных веществ, условиях возбуждения флуоресценции, приемной системы флуоресцентного излучения, ходе эксперимента, источнике экспериментальных данных.

В базу данных к настоящему времени записано около 80 экспериментально измеренных спектров флуоресценции, полученных для разных длин волн возбуждения (200, 210, 220, 222, 230, 248, 250, 266, 300, 308, 337, 350, 390, 410, 510, 520, 532 нм). Наибольшее число спектров соответствует длинам волн возбуждения 266, 308 и 337 нм.

В настоящее время в базу данных внесены спектры флуоресценции следующих веществ: белка; бензина (А-76, АИ-76, АИ-93, Б-70); воды (дистиллированной, из Амурского залива, из Уссурийского залива, медицинской, из Балтийского, Северного, Черного и Японского морей, очищенной на установке Милли-Q, с побережья Рио-де-Жанейро, из пролива Петра Великого); дизельного топлива; керосина; масла (ВМ-6, И20А, М10В2, М16-ИХПЗ, МК-8); нефти (Ливийской, Русской, Самогторской, Саратовской, Советской, Шаимской); РОВ; топлива; хлорофилла (лиственного дерева, пальмы, водорослей).

Анализ экспериментальных спектров флуоресценции показывает, что объем используемой (для решения задачи обнаружения нефтяных загрязнений) спектральной информации можно сократить, используя количественные характеристики флуоресцентного сигнала, переход к

которым можно осуществить, проводя нормировку данных измерений сигнала флуоресценции, например, на значение сигнала флуоресценции на некоторой (специально выбранной для нормировки) длине волны излучения  $\lambda_1$  и последующее сравнение нормированного сигнала на определенной длине волны  $\lambda_2$  с пороговым значением.

Для обнаружения конкретного вида нефтепродукта на фоне конкретного типа вод естественным требованием к выбору длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  является максимизация “расстояния”  $R(\lambda_1, \lambda_2)$  в пространстве нормированных значений интенсивности сигнала флуоресценции  $\frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)}$  между нормированным значением интенсивности сигнала флуоресценции для этого нефтепродукта и нормированным значением интенсивности сигнала флуоресценции для воды. В качестве “расстояния”  $R(\lambda_1, \lambda_2)$  использовалось следующее выражение:

$$R(\lambda_1, \lambda_2) = \left| \frac{I_H(\lambda_2)}{I_H(\lambda_1)} - \frac{I_B(\lambda_2)}{I_B(\lambda_1)} \right|,$$

где  $\frac{I_H(\lambda_2)}{I_H(\lambda_1)}$ ,  $\frac{I_B(\lambda_2)}{I_B(\lambda_1)}$  — нормированные значения интенсивности сигнала флуоресценции соответственно для нефтепродукта и воды.

Для задачи обнаружения любого нефтепродукта на фоне произвольного типа вод и РОВ естественным требованием к выбору длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  является максимизация минимального (по всем видам нефтепродуктов, типам вод и РОВ) “расстояния” в пространстве нормированных значений интенсивности сигнала флуоресценции. Таким образом, в общем случае задача выбора  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  сводится к поиску максимума функции  $F(\lambda_i, \lambda_j)$  двух переменных:

$$F(\lambda_i, \lambda_j) = \min_{m,k} \left\{ \left| \frac{I_H^m(\lambda_2)}{I_H^m(\lambda_1)} - \frac{I_B^k(\lambda_2)}{I_B^k(\lambda_1)} \right| \right\}, \quad (1)$$

где  $\frac{I_H^m(\lambda_2)}{I_H^m(\lambda_1)}$ ,  $\frac{I_B^k(\lambda_2)}{I_B^k(\lambda_1)}$  — нормированные значения интенсивности сигнала флуоресценции соответственно для  $m$ -го вида нефтепродукта и  $k$ -го типа воды и РОВ.

Условие максимизации функции  $F(\lambda_i, \lambda_j)$  — основное необходимое условие для выбора длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Другим условием для выбора  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  является требование, чтобы сигнал флуоресценции (на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ) значительно превышал значение шума измерения регистрирующей аппаратуры. В работе использовалось условие

$$I_H^m(\lambda_1), I_H^m(\lambda_2), I_B^k(\lambda_1), I_B^k(\lambda_2) > 3\sigma_I, \quad (2)$$

где  $\sigma_I$  — среднеквадратическое значение шума регистрирующей аппаратуры.

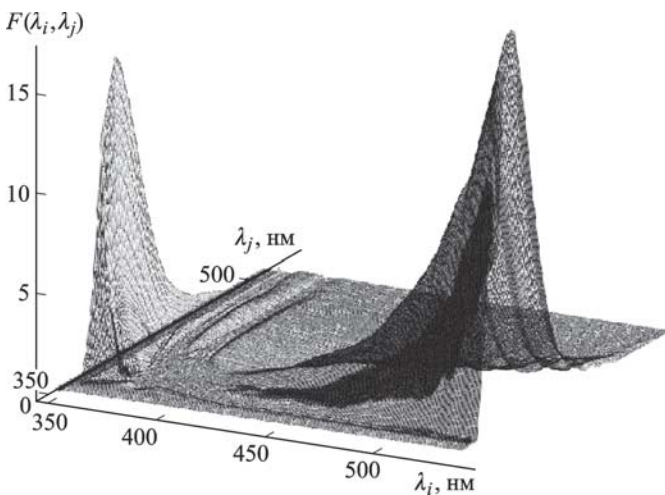


Рис. 2. График функции  $F(\lambda_i, \lambda_j)$  для длины волн возбуждения 337 нм

На рис. 2 приведен график функции  $F(\lambda_i, \lambda_j)$  при условии (2) для длины волны возбуждения 337 нм.

Результаты поиска волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  для длин волн возбуждения 266 нм и 337 нм приведены в табл. 1. Поиск проводился вычислительным алгоритмом в спектральном диапазоне, соответствующем имеющимся данным измерений спектров флуоресценции, из условия максимизации функции  $F(\lambda_i, \lambda_j)$  и условия (2).

Эффективность метода обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, основанного на регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах, исследовали методом математического моделирования.

Таблица 1

Результаты поиска длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  для длин волн возбуждения 266 и 337 нм

Параметр	Длина волны возбуждения, нм	
	266	337
$\lambda_1$	348,5	537,5
$\lambda_2$	317	395,0

В качестве исходных спектров флуоресценции нефтепродуктов и воды использовались спектры из созданной базы данных. Для конкретных длин волн возбуждения значения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  выбирались из табл. 1. Считалось, что регистрация спектров флуоресценции происходит в шумах. Диапазон относительного (по отношению к сигналу флуоресценции) среднеквадратического значения шума измерения полагали равным 2...12%. Результаты моделирования сигналов флуоресценции

$I(\lambda_1)$  и  $I(\lambda_2)$  на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в условиях шумов использовались для вычисления нормированного сигнала  $I(\lambda_2)/I(\lambda_1)$ .

Для принятия решения об обнаружении нефтяных загрязнений использовались пороговые алгоритмы принятия решений:

— если нормированный сигнал  $I(\lambda_2)/I(\lambda_1)$  равен или больше некоторого порогового значения  $[I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор}}$  (т.е.  $I(\lambda_2)/I(\lambda_1) \geq [I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор}}$ ), то принимается решение о наличии нефтяных загрязнений на водной поверхности;

— если нормированный сигнал  $I(\lambda_2)/I(\lambda_1)$  меньше порогового значения  $[I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор}}$  (т.е.  $I(\lambda_2)/I(\lambda_1) < [I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор}}$ ), то принимается решение об отсутствии нефтяных загрязнений на водной поверхности.

Возможны и другие варианты неравенств, определяющих пороговый алгоритм обнаружения нефтяных загрязнений (математическое моделирование показывает, что вид пороговых неравенств зависит от длины волны возбуждения):

$$\left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор1}} \geq \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \geq \left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор2}}$$

или

$$\left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор1}} \leq \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \leq \left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор2}},$$

где

$$\left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор1}} < \left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор2}}.$$

Пороговое значение  $[I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор}}$  (в общем случае  $[I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор1}}$  и  $[I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор2}}$ ) определяется для каждой длины волны возбуждения по результатам предварительного математического моделирования из условия максимизации вероятности правильного обнаружения при заданном (приемлемом) значении вероятности ложных тревог.

Результаты математического моделирования приведены в табл. 2 и 3 для волн возбуждения длиной 266 нм и 337 нм и разных относительных среднеквадратических значений шума измерения. В таблицах приведены вероятности правильного обнаружения нефтяных загрязнений (вероятности принятия решения о наличии нефтяных загрязнений, когда они действительно присутствуют на акватории) и ложных тревог (вероятности принятия решения о наличии нефтяных загрязнений, когда их в действительности нет).

В результате математического моделирования выявили, что для волны возбуждения длиной 266 нм пороговый алгоритм обнаружения нефтяных загрязнений имеет вид

$$\left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор1}} \geq \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \geq \left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор2}},$$

**Вероятности правильного обнаружения нефтяных загрязнений и ложных тревог для длины волны возбуждения 266 нм**

Вещество	Относительное среднееквадратическое значение шума измерения, %					
	2	4	6	8	10	12
Топливо	<i>Вероятности правильного обнаружения нефтяных загрязнений</i>					
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,000
Нефть Шаимская	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9986	0,9946
Нефть Ливийская	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Мазут	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999
Вода	<i>Вероятности ложных тревог</i>					
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0007	0,0025

**Вероятности правильного обнаружения нефтяных загрязнений и ложных тревог для длины волны возбуждения 337 нм**

Вещество	Относительное среднееквадратическое значение шума измерения, %						
	3	4	5	6	7	8	
Дизельное топливо	<i>Вероятности правильного обнаружения нефтяных загрязнений</i>						
	1,0000	1,0000	1,0000	0,9996	0,9984	0,9954	
	Керосин	1,0000	1,0000	1,0000	0,9996	0,9976	0,9914
	Нефть	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9994
	Нефть	1,0000	1,0000	0,9998	0,9992	0,9951	0,9878
	Соляное масло	1,0000	1,0000	1,0000	0,9994	0,9974	0,9945
	<i>Вероятности ложных тревог</i>						
Вода из р. Дон	0,0000	0,0005	0,0001	0,0004	0,0028	0,0068	
Вода из ручья Оуквилл	0,0000	0,0005	0,0000	0,0000	$5 \cdot 10^{-5}$	0,0006	
Вода ручья Твелв-майл	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	
РОВ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	

где  $[I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор1}} = 1,0$ ;  $[I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор2}} = 1,8$ .

Для волны возбуждения длиной 337 нм пороговый алгоритм обнаружении нефтяных загрязнений имеет более простой вид

$$\frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \geq \left[ \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \right]_{\text{пор}}$$

где  $[I(\lambda_2)/I(\lambda_1)]_{\text{пор}} = 13,0$ .

Из табл. 2 и 3 следует, что описанный метод позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения на водной поверхности с вероятностью правильного обнаружения, близкой к единице, при очень небольшой вероятности ложных тревог даже при довольно больших шумах измерения (относительное среднеквадратическое значение шума измерения составляет  $\sim 8 \dots 10\%$  и  $\sim 5 \dots 7\%$  для длин волн возбуждения 266 нм и 337 нм соответственно).

Таким образом, метод обнаружения нефтяных загрязнений, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах, позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения на водной поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
2. Клишкин В. М., Соколов В. Г., Федоричев В. Н. Новые возможности дистанционного анализа нефтепродуктов на поверхности вод // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6, № 2. – С. 189–204.
3. Жевлаков А. П., Лещенко Д. О., Пакконен С. А., Сидоренко В. М. Дистанционное измерение толщины пленки нефтепродуктов на поверхности воды с использованием эксимерного лазера // Изв. АН. Сер. Физическая. – 1994. – Т. 58, № 2. – С. 175–179.
4. Таер Абд Дейдан, Пацаева С. В., Фадеев В. В., Южаков В. И. Флуоресцентные исследования нефтепродуктов в тонких пленках // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. – 1994. – Т. 35, № 2. – С. 51–55.
5. Таер Абд Дейдан, Пацаева С. В., Фадеев В. В., Южаков В. И. Спектральные особенности флуоресценции нефтепродуктов в пленках и в объеме воды // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – Т. 7, № 4. – С. 455–463.
6. Исследование возможности применения эксимерного Кг-Ф лазера в лидарных экспериментах по детектированию нефтяных пленок на поверхности воды / Д.В. Власов, Д.Ю. Ципенюк, С.К. Вартапетов и др. // Оптика атмосферы. – 1990. – Т. 3, № 11. – С. 1224–1225.
7. Дистанционный контроль верхнего слоя океана / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, М.Л. Белов и др. – Новосибирск: Наука, СО, 1991. – 149 с.
8. Oil spill detection system // International Publication Number WO 93/25891. International Publication Date 23.12.1993.
9. Способ дистанционного обнаружения и идентификации объектов органического происхождения // Патент RU 2233438 от 26.08.2003.
10. System and method for optical detection of petroleum and other products in an environment // Patent US 7227139. Date of Patent Jun. 5, 2007.
11. Глушков С. М., Фадеев В. В., Филиппова Е. М., Чубаров В. В. Проблемы лазерной флуориметрии органических примесей в природных водах // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – Т. 7, № 4. – С. 464–473.
12. Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика. 1989. – 607 с.

Статья поступила в редакцию 18.11.2009



Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области лазерной техники.

Yu. V. Fedotov (b.1974), graduated from Moscow Higher Technical University n.a. Bauman in 1998. Ph. D. (Eng), researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 40 publications in the field of laser technology.

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р. техн. наук, вед. науч. сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L.Belov (b.1950), graduated from Moscow Energy Institute in 1973. D. Sc. (Eng), head researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optics of atmosphere.

Ольга Александровна Матросова родилась в 1987 г. Инженер НИИ радиоэлектронной и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы в области лазерной техники.

O.A. Matrosova (b. 1987) — engineer of the Research Institute for Radio Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 1 publication in the field of laser technology.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.A.Gorodnichev (b.1952), graduated from Moscow State University n.a. Lomonosov in 1976. Ph. D. (Eng), head of department of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р. техн. наук, зам. директора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b.1945), graduated from Moscow Higher Technical School n.a. Bauman in 1969. D. Sc. (Eng), Deputy director of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.