

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

ЛАЗЕРНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Рассмотрена задача оперативного лазерного контроля нефтяных загрязнений на водной поверхности. Показано, что использование лазерного метода, основанного на регистрации флуоресцентного излучения в четырех узких спектральных диапазонах, позволяет классифицировать нефтяные загрязнения с вероятностью правильной классификации, близкой к единице.

E-mail: ekomonit@bmstu.ru

Ключевые слова: лазерное зондирование, флуоресценция, нефтяные загрязнения, классификация.

Быстрый рост загрязнения окружающей среды нефтепродуктами обуславливает необходимость развития методик и аппаратуры для оперативного контроля этих загрязнений. Наиболее перспективными оперативными методами контроля являются лазерные методы активного дистанционного зондирования, к которым относится метод флуоресценции.

Данный метод позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения и проводить их идентификацию или по крайней мере классификацию по трем группам: легкие очищенные нефтепродукты, сырая нефть и тяжелые нефтепродукты [1]. Основным признаком при этом является регистрируемый приемником лазерного измерителя спектр флуоресценции.

Недостатком данного метода является необходимость измерения полного спектра флуоресценции, что требует дорогостоящего многоканального приемного устройства. Уменьшить необходимое число приемных спектральных каналов можно за счет удаления из спектра флуоресценции неинформативных признаков.

Поэтому обязательным этапом в разработке методов обнаружения и классификации нефтяных загрязнений по спектрам флуоресценции является получение оптимального набора спектральных каналов измерения. Он позволит не только исключить затраты на сбор мало- и неинформативных признаков, но и повысить эффективность классификации.

Выбор спектральных каналов — это сложная задача. Для ее решения могут применяться различные методы [2], в частности эвристические алгоритмы, использующие различные факторы, или выбор спектральных каналов на основе экспертных заключений.

Вопрос о выборе некоторого числа регистрируемых узких спектральных диапазонов из широкого спектра флуоресценции решается при использовании экспериментально полученных авторами ряда работ, например [1–7], спектров флуоресценции различных нефтепродуктов и воды с разными характеристиками. Для этого была создана база данных экспериментальных спектров флуоресценции нефтепродуктов и воды с разными характеристиками.

Спектры флуоресценции оцифровывались, математически обрабатывались и заносились в специально разработанную в СУБД MySQL реляционную базу данных. Наибольшее число спектров соответствует длинам волн возбуждения 266, 308 и 337 нм [2]. Поэтому в работе в качестве длин волн возбуждения флуоресценции были выбраны 266 и 337 нм. Вещества, спектры флуоресценции которых имеются в базе данных, приведены в табл. 1 и 2 (для длин волн возбуждения 266 и 337 нм).

В качестве классифицирующего признака было выбрано значение контраста, которое определяется следующим образом:

$$K = \frac{I(\lambda_1) - I(\lambda_2)}{I(\lambda_1) + I(\lambda_2)}, \quad (1)$$

где $I(\lambda)$ — интенсивность флуоресценции на длине волны λ .

Для упрощения приемной системы желательно иметь минимальное число приемных каналов. Поскольку по одному классифицирующему признаку решить задачу классификации не удастся, то для решения поставленной задачи использовались два классифицирующих признака, т.е. излучение флуоресценции должно регистрироваться в четырех узких спектральных диапазонах.

Таблица 1

Исследуемые вещества для длины волны возбуждения 266 нм

| Класс I (вода) | Класс II (сырая нефть) | Класс III (тяжелые нефтепродукты) | Класс IV (Легкие нефтепродукты) |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|---|
| Модельная проба воды [3] | Нефть ливийская в воде № 1 [6] | Мазут в воде [3] | Топливо для реактивных самолетов в воде [3] Керосин в воде [7] |
| Вода Черного моря [4] | Нефть шаимская в воде [3] | Дизельное топливо в воде [7] | |
| Белок, растворенный в воде [3] | Нефть в воде [3] | | |
| Водоросль хлорелла в воде [5] | Нефть ливийская в воде № 2 [7] | | |
| Водоросль хлорококкум в воде [5] | | | |
| Галливая и гуминовые кислоты в воде [5] | | | |
| | | | |

Исследуемые вещества для длины волны возбуждения 337 нм

| Класс I (вода) | Класс II (сырая нефть) | Класс III (тяжелые нефтепродукты) | Класс IV (легкие нефтепродукты) |
|---|---|--|---------------------------------|
| РОВ (растворенное органическое вещество) [6] Вода р. Дон (Канада) [1] Вода ручья Оуквилл [1] Вода ручья Твелф-майл [1] | Нефть ливийская [6] Нефть фирмы Esso (высший сорт) [1] Нефть фирмы Esso [1] | Соляное масло [1] Дизельное топливо [7] | Керосин [1] |

Спектральные диапазоны выбирались по максимуму расстояний между классами в двумерном пространстве классифицирующего признака. Результаты математического моделирования показывают, что задача классификации может быть решена при использовании следующих спектральных диапазонов:

296, 306, 350, 367 нм — для длины волны возбуждения 266 нм; т.е. классифицирующими признаками являются контрасты

$$K_1 = \frac{I(306 \text{ нм}) - I(296 \text{ нм})}{I(306 \text{ нм}) + I(296 \text{ нм})};$$

$$K_2 = \frac{I(367 \text{ нм}) - I(350 \text{ нм})}{I(367 \text{ нм}) + I(350 \text{ нм})};$$

395, 402, 408, 411 нм — для длины волны возбуждения 337 нм; т.е. классифицирующими признаками являются контрасты

$$K_1 = \frac{I(402 \text{ нм}) - I(395 \text{ нм})}{I(402 \text{ нм}) + I(395 \text{ нм})};$$

$$K_2 = \frac{I(411 \text{ нм}) - I(408 \text{ нм})}{I(411 \text{ нм}) + I(408 \text{ нм})}.$$

Исследуемые вещества в пространстве выбранных классифицирующих признаков представлены на рис. 1.

На рис. 1, а введены следующие обозначения: 1 — модельная проба воды; 2 — вода Черного моря; 3 — белок, растворенный в воде; 4 и 5 — водоросли хлорелла и хлорококкум в воде; 6 — галлиевая и гуминовые кислоты в воде; 7 и 10 — ливийская нефть № 1 и 2 в воде; 8 — шаимская нефть в воде; 9, 11, 12, и 14 — нефть, мазут, дизельное топливо и керосин в воде соответственно; 13 — топливо для реактивных самолетов в воде.

На рис. 1, б обозначено: 1, 2, 3 и 4 — РОВ, вода р. Дон (Канада), ручья Оуквилл и ручья Твелф-майл; 5, 6 и 7 — нефть ливийская,

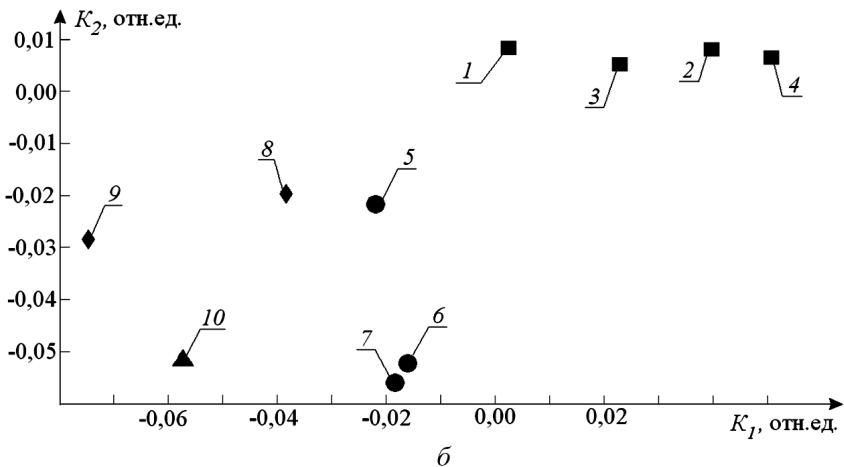
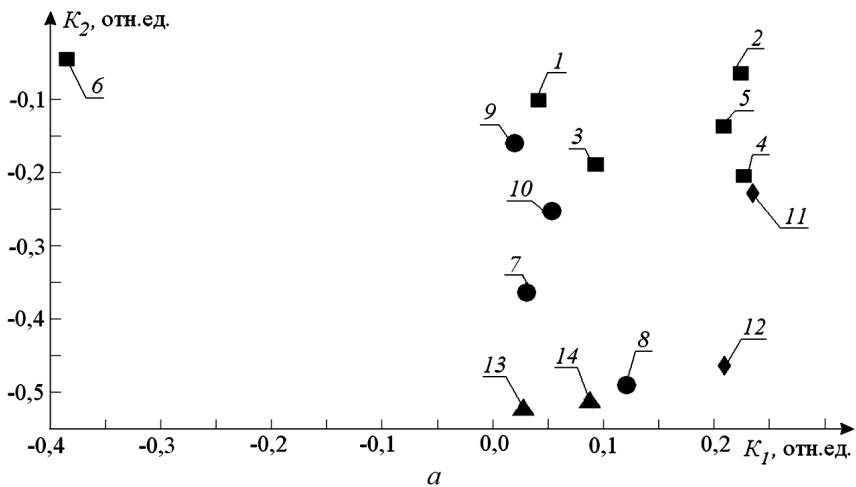


Рис. 1. Исследуемые вещества в пространстве классифицирующих признаков для длин волн возбуждения флуоресценции 266 (а) и 337 нм (б)

фирмы Esso высшего сорта и стандартная; 8 — соляное масло, 9 — дизельное топливо, 10 — керосин.

При математическом моделировании работы метода классификации нефтяных загрязнений считалось, что из-за шумов и погрешностей измерения интенсивности в спектрах флуоресценции распределены по нормальному закону. В этом случае классифицирующий признак имеет сложный закон распределения вероятности [2, 8], который в настоящей работе аппроксимирован нормальным законом. Таким образом, полагалось, что: каждый класс состоит из множества веществ; каждое вещество определяется нормально распределенными классифицирующими признаками; параметры распределений вычисляются для каждого вещества отдельно.

Полученные классы разделяются отрезками гиперплоскостей, которые находятся следующим образом [9]: между разделяемыми классами определяются пары ближайших соседей; полученные пары разде-

ляются при помощи гиперплоскостей; общая граница между классами формируется из полученных гиперплоскостей.

Таким образом, были определены следующие кусочно-линейные границы разделения классов:

$$h^{I-II}(K_1, K_2), \quad h^{I-III}(K_1, K_2), \quad h^{II-III}(K_1, K_2), \quad h^{II-IV}(K_1, K_2)$$

— четыре кусочно-линейные границы для длины волны возбуждения 266 нм;

$$h^{I-II}(K_1, K_2), \quad h^{II-III}(K_1, K_2), \quad h^{III-IV}(K_1, K_2)$$

— три кусочно-линейные границы для длины волны возбуждения 337 нм.

Индексы I, II, III, IV указывают на пары разделяемых классов. Разделение классов с помощью кусочно-линейных границ показано на рис. 2 для длин волн возбуждения 226 и 337 нм.

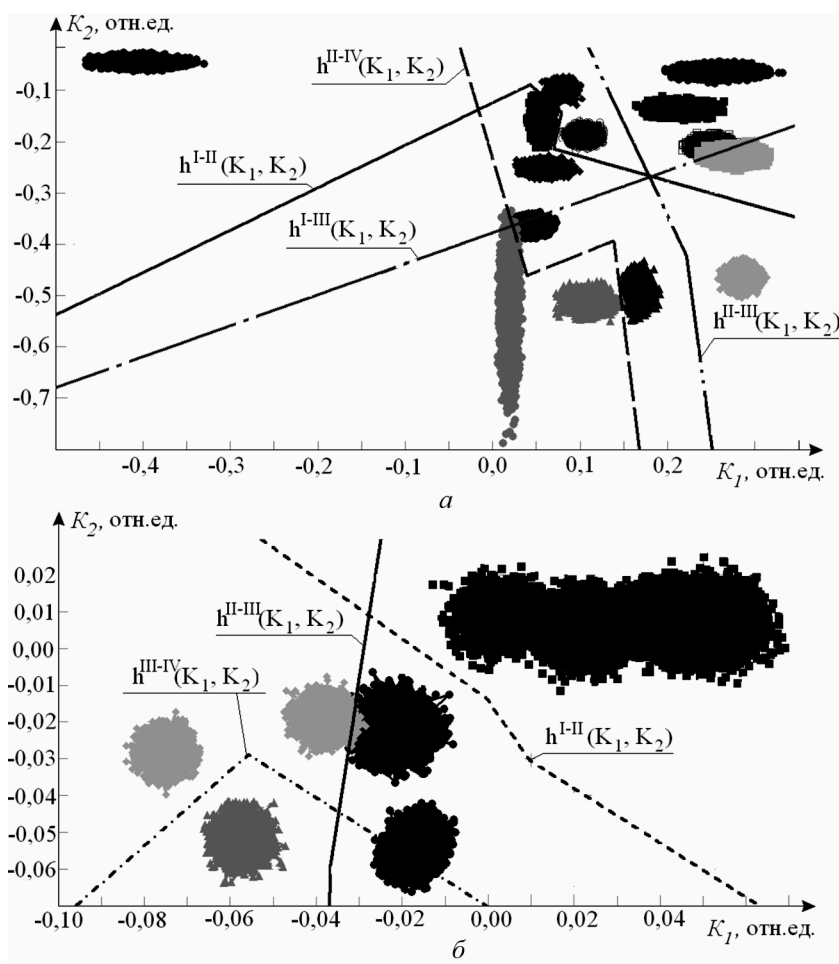


Рис. 2. Разделение классов с помощью кусочно-линейных границ для длин волн возбуждения 266 (а) и 337 нм (б)

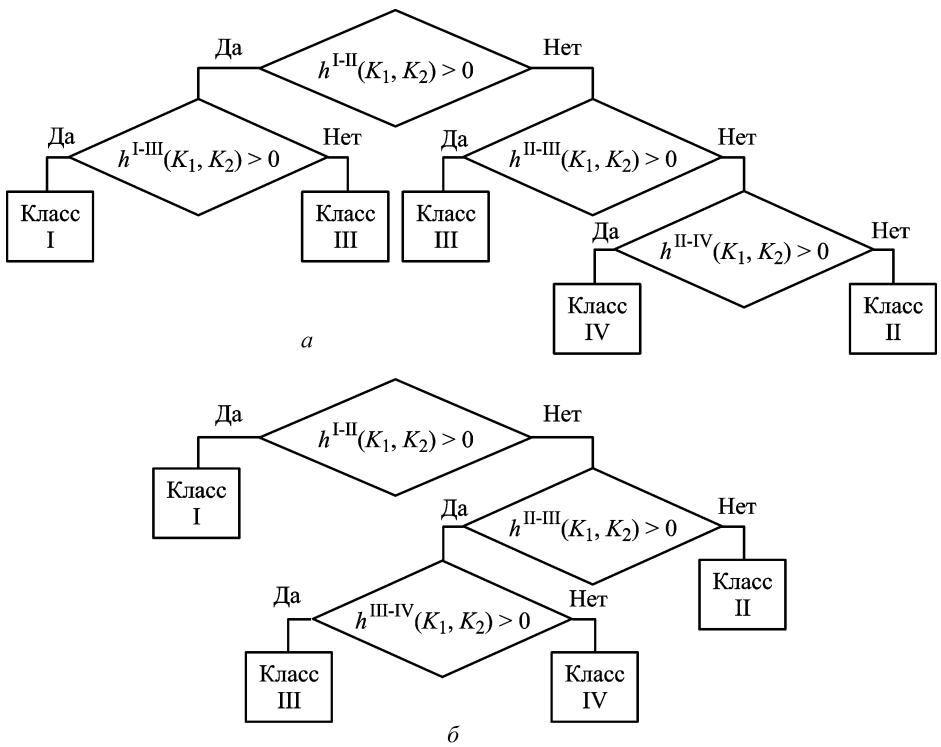


Рис. 3. Алгоритм иерархической классификации для длин волн возбуждения флуоресценции 266 (а) и 337 нм (б)

Испытуемое вещество относят к определенному классу на основе иерархического принципа. Алгоритм иерархической классификации для длин волн возбуждения 266 и 337 нм приведен на рис. 3.

Для проверки эффективности разработанного алгоритма было проведено математическое моделирование. Полагалось, что спектры флуоресценции регистрируются приемником лазерного измерителя на фоне аддитивного шума измерения с нормальным законом распределения. Относительное среднеквадратическое отклонение шума измерения σ задавалось в диапазоне от 1 до 5 %.

Для длин волн возбуждения 266 и 337 нм спектральные диапазоны регистрации флуоресцентного излучения выбирались как описано ранее. Находилась вероятность правильной классификации нефтяных загрязнений по четырем группам: вода, белок или водоросли в воде; сырая нефть; легкие очищенные нефтепродукты; тяжелые нефтепродукты.

Полученные вероятности правильной классификации для длин возбуждения 266 и 337 нм приведены в табл. 3 и 4.

Результаты математического моделирования показывают, что разработанный метод классификации позволяет надежно классифицировать нефтяные загрязнения на водной поверхности.

Таблица 3

**Вероятности правильной классификации для длины волны возбуждения
266 нм**

| Вещество | $\sigma, \%$ | | | | |
|---|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Модельная проба воды | 1,000 | 0,958 | 0,888 | 0,841 | 0,821 |
| Вода Черного моря | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,992 |
| Белок, растворенный в воде | 1,000 | 0,988 | 0,912 | 0,821 | 0,746 |
| Водоросль хлорелла в воде | 0,985 | 0,856 | 0,759 | 0,700 | 0,657 |
| Водоросль хлорококкум в воде | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,994 | 0,976 |
| Галлиевая и гуминовые кислоты в воде | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Нефть ливийская (№ 1) в воде | 0,999 | 0,913 | 0,821 | 0,752 | 0,695 |
| Нефть шаимская в воде | 1,000 | 0,963 | 0,889 | 0,815 | 0,758 |
| Нефть в воде | 1,000 | 0,956 | 0,861 | 0,767 | 0,698 |
| Нефть ливийская (№ 2) в воде | 1,000 | 0,996 | 0,951 | 0,867 | 0,779 |
| Мазут в воде | 0,987 | 0,872 | 0,771 | 0,721 | 0,674 |
| Дизельное топливо в воде | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,988 | 0,961 |
| Топливо для реактивных самолетов в воде | 0,998 | 0,925 | 0,833 | 0,772 | 0,729 |
| Керосин в воде | 1,000 | 0,67 | 0,887 | 0,809 | 0,737 |

Таблица 4

**Вероятности правильной классификации для длины волны возбуждения
377 нм**

| Вещество | $\sigma, \%$ | | | | |
|--------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| POB | 1,000 | 0,987 | 0,935 | 0,868 | 0,819 |
| Вода р. Дон (Канада) | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,994 |
| Вода ручья Оуквилл | 1,000 | 1,000 | 0,994 | 0,974 | 0,944 |
| Вода ручья Твелф-майл | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,998 | 0,988 |
| Нефть ливийская | 0,998 | 0,924 | 0,794 | 0,674 | 0,578 |
| Нефть фирмы Esso (высший сорт) | 1,000 | 1,000 | 0,996 | 0,979 | 0,942 |
| Нефть фирмы Esso (стандартная) | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,983 | 0,955 |
| Соляное масло | 1,000 | 0,996 | 0,956 | 0,875 | 0,778 |
| Дизельное топливо | 1,000 | 0,997 | 0,970 | 0,924 | 0,890 |
| Керосин | 0,997 | 0,919 | 0,811 | 0,726 | 0,643 |

Для длин волн возбуждения 266 нм и 337 нм при шуме измерения $\sigma = 1\%$ вероятность правильной классификации оказывается не хуже 0,985 и 0,997, а в большинстве случаев практически равна единице (с точностью до трех знаков после запятой).

Таким образом, использование метода, основанного на регистрации флуоресцентного излучения в четырех узких спектральных диапазонах, позволяет классифицировать нефтяные загрязнения с вероятностью правильной классификации, близкой к единице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
2. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах / Ю.В. Федотов, М.Л. Белов, О.А. Матросова и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2010. – № 2. – С. 39–47.
3. 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.
4. Ramam Scattering and Fluorescence Spectra of Water from the Sea Surface Microlayer / V.V. Fadeev, S.A. Burikov, P.A. Volkov, V.B. Lapshin, and A.V. Syroeshkin // Oceanology. – 2009. – Vol. 49. No. 2. – P. 205–210.
5. Variation of the UV-to-blue fluorescence ratio for organic matter in water under conditions of fluorescence saturation / S. Patsayeva, V. Yuzhakov, M. Lamotte, R. Fantoni, A. Lai, and A. Palucci // Proceedings of EARSeL–SIG–Workshop LIDAR, Dresden/FRG. June 16–17, 2000.
6. Гаерабдейдан, Пачаева 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.
7. Patsayeva S., Yuzhakov V., Fadeev V. Fluorescent remote diagnostics of oil pollutions: oil in films and oil dispersed in the water body // EARSeL Advances in Remote Sensing. 3(3). – 1995. – P. 170–178.
8. Sedilnik A., Kosmelj K., Blejes A. The distribution of the ratio of jointly normal variables // Metodoloski zvezki. – 2004. – Vol. 1, № 1. – P. 99–108.
9. 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 2.12.2010

Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научн. сотр. НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области лазерной техники.

Yu. V. Fedotov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), researcher of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of laser technology.

Ольга Александровна Матророва родилась в 1987 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирантка кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных работ в области лазерной техники.

O.A. Matrosova (b. 1987) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2010. Post-graduate of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 2 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. сотр. 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 the Moscow Energy Institute in 1973. D. Sc. (Eng.), leading researcher of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optics of atmosphere.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р 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 the Lomonosov Moscow State University in 1976. D. Sc. (Eng.), head of department of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. 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 the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), deputy director of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.