

Иерархический метод классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в четырех узких спектральных диапазонах

77-30569/326277

02, февраль 2012

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

УДК 535.338.41

НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана

fed@bmstu.ru

ekomonit@bmstu.ru

belov@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных экологических задач является контроль загрязнения окружающей среды нефтепродуктами.

Загрязнения нефтепродуктами наиболее оперативно обнаруживаются дистанционными методами, позволяющими инспектировать большие территории за сравнительно малый промежуток времени. Одним из наиболее перспективных дистанционных методов является лазерный флуоресцентный метод [1-15].

Данный метод позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения и проводить их идентификацию или, по крайней мере, классификацию по трем остаточным продуктам [1]. Основным признаком, при этом, является спектр флуоресценции.

Недостатком данного метода является необходимость измерения полного спектра флуоресценции, что требует дорогостоящего многоканального приемного оборудования. Уменьшение необходимого числа приемных спектральных каналов может быть достигнуто за счет удаления из спектра флуоресценции неинформативных признаков.

Поэтому необходимым этапом в разработке алгоритмов обнаружения и классификации нефтяных загрязнений, основанных на регистрации флуоресцентного излучения, является выбор спектральных каналов. Этот этап позволяет не только исключить затраты на сбор мало- и неинформативных признаков, но и повысить эффективность классификации.

Ниже описан разработанный авторами алгоритм классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности с использованием четырех спектральных каналов.

Алгоритм позволяет проводить классификацию по четырем группам: земная поверхность (незагрязненная нефтепродуктами); разлив на земной поверхности легких очищенных нефтепродуктов; разлив сырой нефти; разлив тяжелые нефтепродуктов.

В качестве исходных спектров флуоресценции нефтепродуктов и земных поверхностей использовались спектры из созданной нами базы данных, включающей данные, полученные нами в результате лабораторных исследований, и данные взятые из различных литературных источников. Длина волны лазера для возбуждения флуоресценции – 266 нм (четвертая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима).

Для решения задачи классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности необходимо определить набор классов, классифицирующие признаки и ввести расстояние между классами.

В один класс были объединены все подстилающие поверхности (незагрязненные нефтепродуктами).

Все разливы нефтепродуктов на земной поверхности были разбиты на 3 остальных класса:

- 1). разлив сырой нефти;
- 2). разлив тяжелых нефтепродуктов (дизельное топливо, масло);
- 3). разлив легких нефтепродуктов (керосин, бензин).

Для задачи классификации в качестве классифицирующего признака было выбрано значение контраста K на двух длинах волн:

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

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, для решения поставленной задачи использовались два классифицирующих признака, т.е. излучение флуоресценции должно регистрироваться в четырех узких спектральных диапазонах.

Спектральные диапазоны выбирались по максимуму расстояний между классами в двумерном пространстве классифицирующих признаков.

Результаты математического моделирования показывают, что задача классификации нефтяных загрязнений земной подстилающей поверхности может быть решена, используя

следующие спектральные диапазоны (для длины волны возбуждения 266 нм): 321; 349; 357; 547 нм.

Таким образом, классифицирующими признаками являются контрасты:

$$K_1 = \frac{I(547 \text{ нм}) - I(357 \text{ нм})}{I(547 \text{ нм}) + I(357 \text{ нм})},$$

$$K_2 = \frac{I(349 \text{ нм}) - I(321 \text{ нм})}{I(349 \text{ нм}) + I(321 \text{ нм})}.$$

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

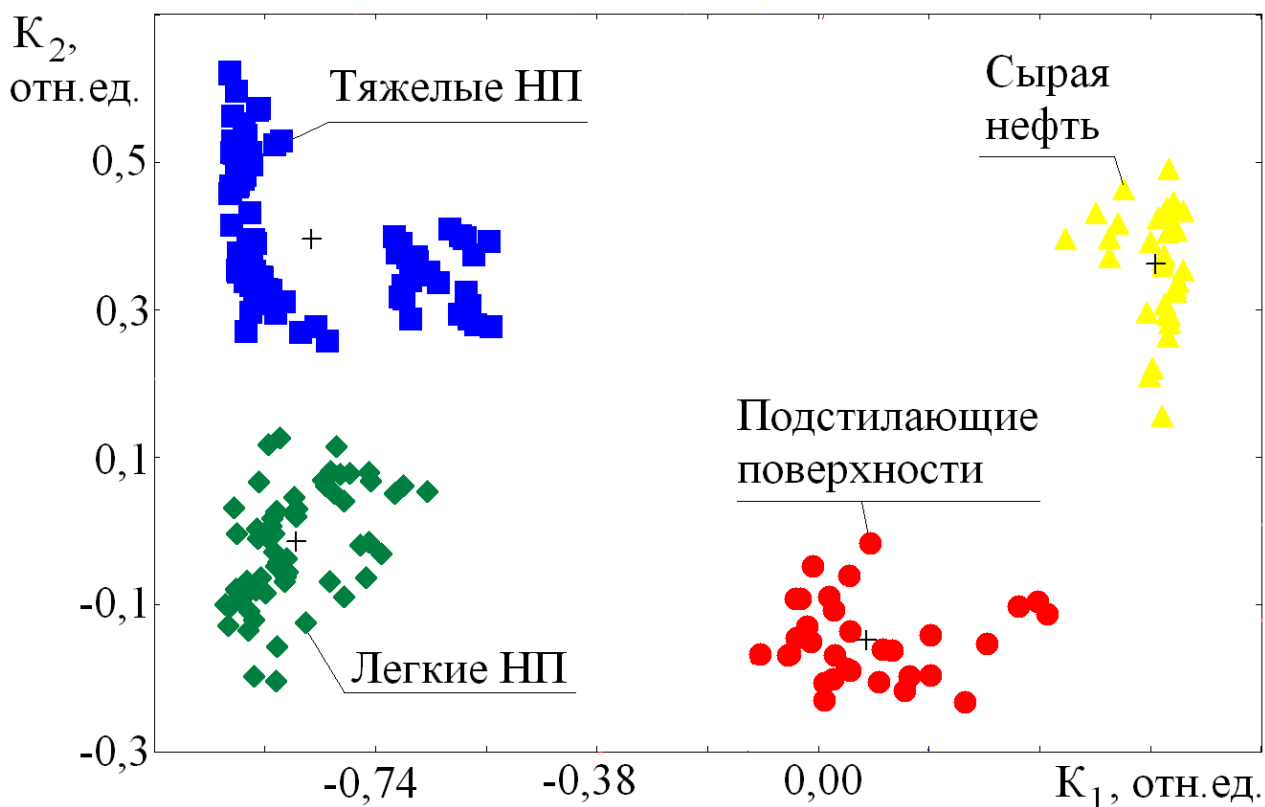


Рис. 1. Исследуемые вещества в пространстве классифицирующего признака

При математическом моделировании работы метода классификации нефтяных загрязнений считалось, что из-за шумов и погрешностей измерения интенсивности в спектрах флуоресценции распределены по нормальному закону. Кроме того, были сделаны следующие предположения: каждый класс состоит из множества веществ; каждое вещество

определяется нормально распределенными классифицирующими признаками; параметры распределений определяются для каждого вещества отдельно.

Классы разделяются при помощи отрезков гиперплоскостей, которые находятся следующим образом [16]:

- 1). между разделяемыми классами находятся пары ближайших соседей;
- 2). полученные пары разделяются при помощи гиперплоскостей;
- 3). общая граница между классами формируется из полученных в пункте 2 гиперплоскостей.

Полученные результаты показывают, что в задаче классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности классы в разделяются при помощи трех кусочно-линейных границ

$$h_I(K_1, K_2), h_{II}(K_1, K_2), h_{III}(K_1, K_2).$$

Разделение классов с помощью линейно-кусочных границ представлено на рисунке 2.

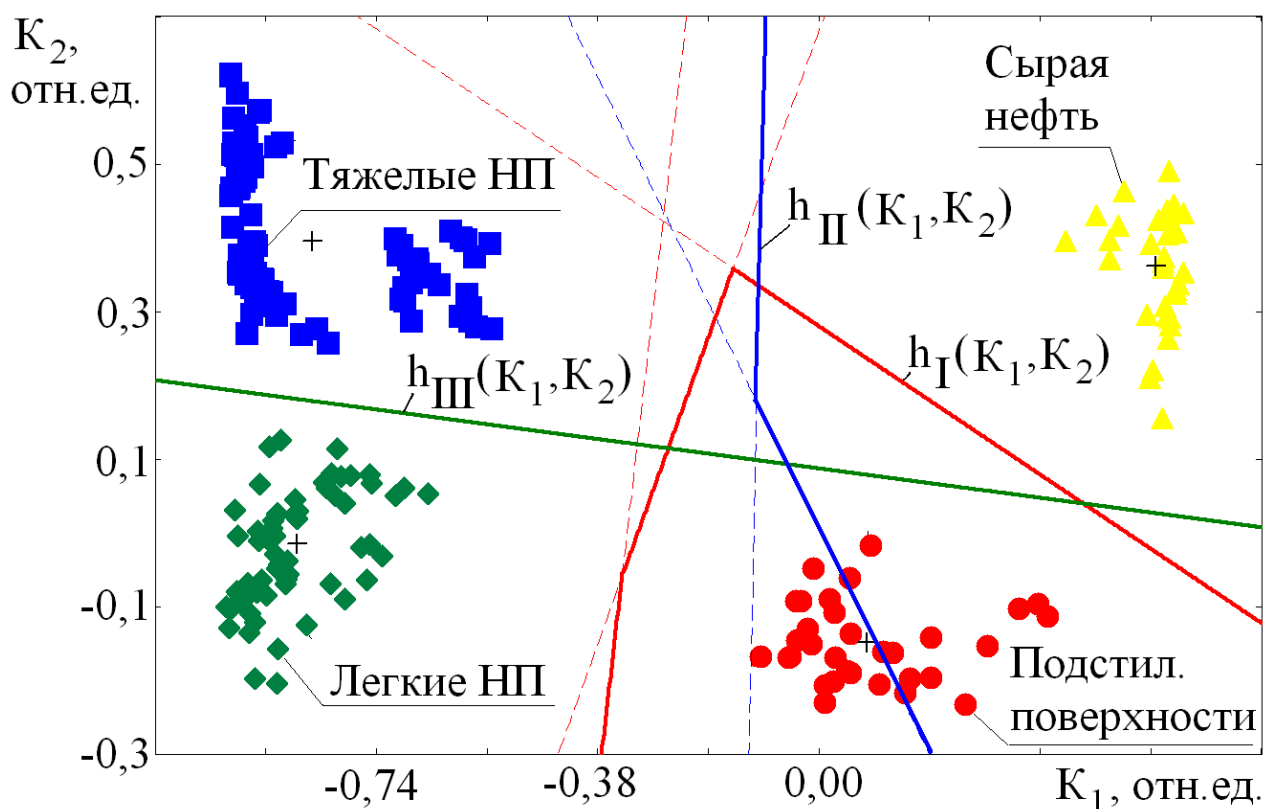


Рис.2. Разделение классов с помощью линейно-кусочных границ для земной подстилающей поверхности и длины волны возбуждения 226 нм

Отнесение испытуемого вещества к определенному классу осуществляется на основе иерархического метода [16].

Алгоритм иерархической классификации для земной подстилающей поверхности и длины волны возбуждения 266 нм представлен на рисунке 3.

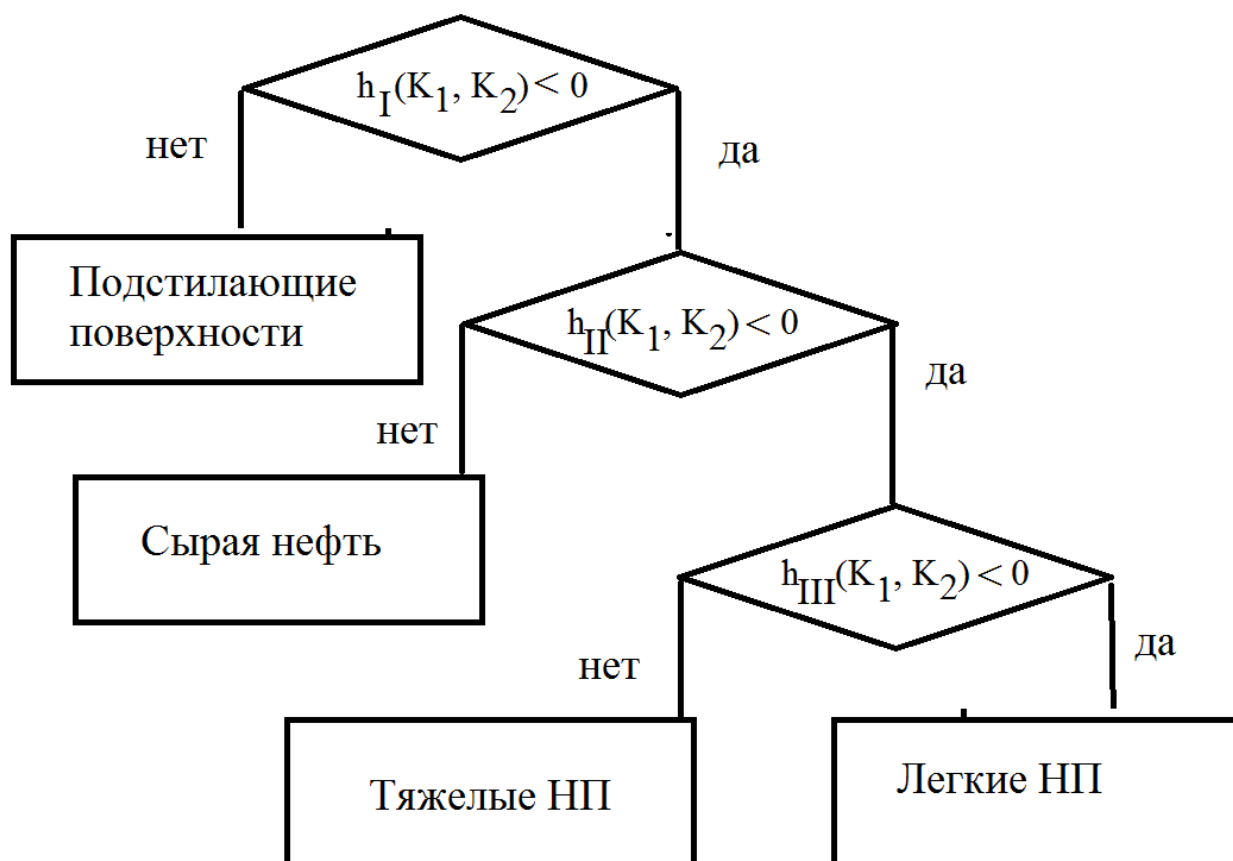


Рис. 3. Алгоритм иерархической классификации для земной подстилающей поверхности и длины волны возбуждения 266 нм

Для проверки эффективности разработанного алгоритма было проведено математическое моделирование.

При проведении математического моделирования полагалось, что спектры флуоресценции регистрируются приемником лазерного измерителя на фоне аддитивного шума измерения с нормальным законом распределения. Относительное среднеквадратичное отклонение шума измерения σ задавалось в диапазоне от 1 до 10 %.

Находилась вероятность правильной классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности по четырем классам:

1). незагрязненная нефтепродуктами подстилающая поверхность (различные типы поверхностей - чернозём; глина; чернозем 75 % глина 25 %; глина 75 % чернозем 25 %; торф; песок; песчаная почва; известняк; почва из соснового бора; почва из березовой рощи; почва из дубравы);

2). разлив сырой нефти (нефть Альметьевская);

3). разлив легких очищенных нефтепродуктов (керосин; бензин А-80; бензин А-95);

4). разлив тяжелых нефтепродуктов (дизельное топливо; масло машинное отработанное; масло машинное Castrol 10w40).

Полученные вероятности правильной классификации нефтяных загрязнений для земной подстилающей поверхности и длины лазерного возбуждения 266 нм приведены в таблице для разных относительных среднеквадратических значений шума.

Вероятности правильной классификации нефтяных загрязнений для земной подстилающей поверхности и длины волны лазерного возбуждения 266 нм

Класс	Среднеквадратическое значение шума, %				
	5	6	7	8	9
Незагрязненные нефтепродуктами подстилающие поверхности	1,000	0,992	0,982	0,977	0,972
Разлив тяжелых нефтепродуктов	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Разлив легких нефтепродуктов	1,000	1,000	1,000	0,999	0,996
Разлив сырой нефти	1,000	1,000	0,997	0,915	0,872

Результаты математического моделирования показывают, что разработанный метод классификации позволяет надежно классифицировать нефтяные загрязнения (подстилающая незагрязненная нефтепродуктами земная поверхности; сырая нефть; тяжелые нефтепродукты - дизельное топливо, машинное масло; легкие нефтепродукты - керосин, бензин) на земной поверхности в широком диапазоне среднеквадратических значений шума (до значений $\sigma=9\%$).

Для длины волны возбуждения флуоресценции 266 нм при шуме измерения $\sigma=5\%$ вероятность правильной классификации оказывается практически равной 1 (с точностью до трех знаков после запятой – т.е. по результатам 1000 статистических испытаний). При шуме измерения $\sigma=9\%$ вероятность правильной классификации оказывается большей или равной 0,872.

Таким образом, разработан иерархический метод, позволяющий (с использованием регистрации флуоресцентного излучения в четырех узких спектральных диапазонах) проводить классификацию нефтяных загрязнений на земной поверхности с вероятностью правильной классификации близкой к единице. Данный метод позволяет упростить приемную систему за счет замены полихроматора и усилителя яркости набором из четырех узкополосных фильтров и ФЭУ, при этом обеспечиваются надлежащие качества классификации.

Литература

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. Климкин В.М., Соколов В.Г., Федорищев В.Н. Новые возможности дистанционного анализа нефтепродуктов на поверхности вод // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 189 – 204.
3. Спектральные особенности флуоресценции нефтепродуктов в пленках и в объеме воды / Таер Абд Дейдан [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 4. С. 455 – 463.
4. Дистанционный контроль верхнего слоя океана / В.М. Орлов [и др.] Новосибирск: Наука. Сибирское Отделение, 1991. 149 с.
5. Проблемы лазерной флуориметрии органических примесей в природных водах / С.М. Глушков [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №4. С. 464 – 473.
6. Флуоресцентные исследования нефтепродуктов в тонких пленках / Таер Абд Дейдан [и др.] // Вестник МГУ. Серия 3. Физика, астрономия. 1994. Т. 35. № 2. С. 51 – 55.
7. Performance evaluation of UV sources for lidar fluorescing of oil films / P. Burlamacchi [et al.] // Applied Optics. 1983. V. 22. N 1. P. 48-53.
8. Knoll J.S. Visible fluorescence from ultraviolet excited crude oil // Applied Optics. 1985. V. 24. N 14. P. 2121-2123.
9. Hengsternann T., Reuter R. Lidar fluorosensing of mineral oil spills on sea surface // Applied Optics. 1990. V. 29. N 22. P.3218-3227.
10. Laser radar for remote detection of oil spills / T. Sato [et al.] // Applied Optics. 1978. V. 17. N 23. P. 3798-3803.
11. O'Neil R.A., Buja-Bijunas L., Rayner D.M. Field performance of a laser fluorosensor for the detection of oil spills // Applied Optics. 1980. V. 19. N 6. P. 863-870.
12. Raman Scattering and Fluorescence Spectra of Water from the Sea Surface Microlayer / V. V. Fadeev [et al.] // Oceanology. 2009. V. 49, N. 2. P. 205 – 210.

13. Patsayeva S., Yuzhakov V., Fadeev V. 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.
14. Cedilnik A., Kosmelj K., Blejec A.. The Distribution of the Ratio of Jointly Normal Variables // Metodoloski zvezki. 2004. Vol. 1, №1. P. 99–108.
15. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах / Ю.В. Федотов [и др.] // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 2. С. 39 – 47.
16. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян [и др.] М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

Hierarchical method of classification of oil pollution at earth's surface based on detection of fluorescence radiation within four narrow spectral bands

77-30569/326277

02, February 2012

Fedotov Yu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A.

Bauman Moscow State Technical University

fed@bmstu.ru

ekomonit@bmstu.ru

belov@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

Laser monitoring problem of oil pollution at earth's surfaces was considered in this paper. It was shown that use of laser method based on detection of fluorescence radiation within four narrow spectral bands and hierarchical method of classification, allowed to classify oil pollution at earth's surfaces with a probability of correct classification close to one.

Publications with keywords: [oil pollution](#), [earth's surface](#), [laser sounding](#), [fluorescence](#), [classification](#)

Publications with words: [oil pollution](#), [earth's surface](#), [laser sounding](#), [fluorescence](#), [classification](#)

Reference

1. Mezheris R., Laser remote sensing, Moscow, Mir, 1987, 550 p.
2. Klimkin V.M., Sokovikov V.G., Fedorishchev V.N., New possibilities of remote analysis of petroleum products on the surface of water, Optika atmosfery i okeana 6 (2) (1993) 189-204.
3. Taer Abd Deidan, et al., The spectral peculiarities of the fluorescence of oil products in the films and in the volume of water, Optika atmosfery i okeana 7 (4) (1994) 455-463.
4. V.M. Orlov, et al., Remote control the upper ocean layer, Novosibirsk, Nauka. Sibirskoe Otdelenie, 1991, 149 p.
5. S.M. Glushkov, et al., Problems of laser fluorimetry of organic impurities in natural waters, Optika atmosfery i okeana 7 (4) (1994) 464-473.
6. Taer Abd Deidan, et al., Fluorescence studies of oil products in thin films, Vestnik MGU. Ser. 3. Fizika, astronomiia - Bulletin of Moscow State University. Ser. 3. Physics. Astronomy 35 (2) (1994) 51-55.

7. P. Burlamacchi, et al., Performance evaluation of UV sources for lidar fluorescing of oil films, *Applied Optics* 22 (1) (1983) 48-53.
8. Knoll J.S., Visible fluorescence from ultraviolet excited crude oil, *Applied Optics* 24 (14) (1985) 2121-2123.
9. Hengstermann T., Reuter R., Lidar fluorosensing of mineral oil spills on sea surface, *Applied Optics* 29 (22) (1990) 3218-3227.
10. T. Sato, et al., Laser radar for remote detection of oil spills, *Applied Optics* 17 (23) (1978) 3798-3803.
11. O'Neil R.A., Buja-Bijunas L., Rayner D.M., Field performance of a laser fluorosensor for the detection of oil spills, *Applied Optics* 19 (6) (1980) 863-870.
12. V. V. Fadeev, et al., Raman Scattering and Fluorescence Spectra of Water from the Sea Surface Microlayer, *Oceanology* 49 (2) (2009) 205 – 210.
13. Patsayeva S., Yuzhakov V., Fadeev V. 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) 170–178.
14. Cedilnik A., Kosmelj K., Blejec A., The Distribution of the Ratio of Jointly Normal Variables, *Metodoloski zvezki* 1 (1) (2004) 99–108.
15. Iu.V. Fedotov, et al., The method of detection of oil pollution on the water surface, based on the registration of fluorescent radiation in two narrow spectral bands, *Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Priborostroenie - Bulletin of BMSTU. Ser. Instrument making* 2 (2010) 39-47.
16. S.A. Aivazian, et al., *Applied Statistics: Classification and reduction of dimension*, Moscow, Finansy i statistika, 1989, 607 p.