

УДК 504.064

## Автоматизация процедур обнаружения нефтяных разливов на водной поверхности

### Automating procedures of oil spills on the water surface

#### Дворников / Dvornikov S.

Сергей Викторович

(practicdsv@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

(ГУАП), профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.

г. Санкт-Петербург

#### Дворников / Dvornikov S.

Сергей Сергеевич

(dvornik92@mail.com)

кандидат технических наук, доцент.

ГУАП, научный сотрудник научно-исследовательского отдела.

г. Санкт-Петербург

#### Васильева / Vasilyeva D.

Дина Владимировна

(dolli.dina@mail.ru)

ГУАП, старший преподаватель кафедры радиотехнических систем.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: контроль окружающей среды – environmental control; контрастность признаков – feature contrast; признаки распознавания – recognition features; обработка фотоизображений – photo image processing.

В статье представлены результаты разработки предложений по автоматизации процедур обнаружения мест разлива нефтепродуктов в водной среде. Предложено в качестве векторов признаков выбирать гистограммы распределений битов яркости фотоизображений. Обоснован дуальный алгоритм классификации. Представлены результаты эксперимента, подтверждающие правомерность теоретических выводов. Демонстрируется работа классификатора по представленным фотоснимкам.

The article presents the results of developing proposals for automating procedures for detecting oil spills in the aquatic environment. It is proposed to select histograms of distributions of brightness bits of photographic images as feature vectors. A dual classification algorithm is justified. Experimental results are presented that confirm the validity of the theoretical conclusions. The work of the classifier using the presented photographs is demonstrated.

### Введение

Активная деятельность человека по освоению земных недр не всегда благоприятно сказывается на экологии [1]. Стремление получить ежеминутную прибыль стимулирует отдельные корпорации на нарушение правил природопользования и получение выгоды, не считаясь с последствиями [2, 3]. Яркими примерами такой деятельности является нефтедобыча и транспортировка добытого ресурса.

В современной экономике морские нефтеперевозки являются одним из самых востребованных видов бизнеса. Вместе с тем состояние танкерного флота оставляет желать лучшего. Поэтому разлив нефти в морской акватории является наиболее распространенным видом экологических катастроф [4, 5].

Учитывая громадные водные просторы Земли, возникает объективная проблема своевременного выявления нефтяных разливов и контроля их устранения.

В настоящее время для решения этой проблемы активно используют беспилотные летательные аппараты (БЛА) с камерами наблюдения [6]. Но полученный видеоматериал требует соответствующей

обработки. Очевидно, что визуальный мониторинг с привлечением операторов на всей сессии видеоконтроля является неэффективным решением.

Поэтому с учетом рассмотренных обстоятельств предлагаются решения по автоматизации процедур выявления мест нефтяных разливов по результатам обработки фотоматериала и фрагментов видеозаписей.

### Обоснование подхода к автоматизации процедур контроля

Мониторинг с использованием БЛА, как правило, организуется посредством фото- или видеофиксации подстилающей поверхности с последующей передачей рабочих материалов на диспетчерский пункт [7]. Обработка полученного материала может осуществляться различным образом, в том числе и с привлечением нейронных сетей [8]. Однако любая электронная обработка материала предполагает его формализацию до уровня решающих алгоритмов.

Учитывая, что графический материал представлен в цифровом виде, предлагается для его обработки использовать элементы теории распознавания образов [9, 10]. Указанная теория базируется на соотношении распознаваемых объектов к одному из детерминированных классов по результатам сравнения сформированных векторов признаков [11] с заранее подготовленными эталонными описаниями, характеризующими классы [12].

В самом простом случае формализацию задачи распознавания можно интерпретировать как сравнение вектора признаков сформированного объекта  ${}^0V_m$ , с векторами признаков двух классов. Вектором  ${}^1V_m$ , характеризующим класс  $A$ , и вектором  ${}^2V_m$ , характеризующим класс  $B$ . Здесь  $m=1, \dots, M$  – параметр вектора признаков размерностью  $M$ .

Применительно к рассматриваемому случаю класс  $A$  соответствует условию того, что разлив нефти не обнаружен, а класс  $B$  – обнаружен.

Соответственно, принятие решения в рассматриваемом случае может быть реализовано по результатам оценки знаковой функции

$$\text{sign}(d_{01} - d_{02}) = \begin{cases} 0 > \text{нет загрязнений;} \\ 0 \leq \text{обнаружено загрязнение,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $d_{01}$  – разность векторов  ${}^0V_m$  и  ${}^1V_m$ ;  $d_{02}$  – разность векторов  ${}^0V_m$  и  ${}^2V_m$ .

Аналитически значение разности векторов может быть рассчитано по следующей формуле [13]:

$$d_{01(02)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |{}^0V_m - {}^{1(2)}V_m|. \quad (2)$$

Тогда общий алгоритм запишем как

$$d_{01(02)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |{}^0V_m - {}^{1(2)}V_m| \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} \begin{matrix} {}^0V_m \Rightarrow B \\ {}^0V_m \Rightarrow A \end{matrix} \quad (3)$$

Для практической реализации алгоритма остается только формализовать вектор признаков.

В общем случае в теории распознавания образов под вектором признаков понимают совокупность измеряемых параметров объекта [9], позволяющих его классифицировать с требуемой точностью (достоверностью).

Именно выбор параметров для формирования векторов признаков является основополагающим моментом, определяющим качество работы системы распознавания (классификации) объектов.

Основные требования, предъявляемые к вектору признаков, должны исходить из того, что, во-первых, он должен достаточно просто реализоваться. А во-вторых, обладать контрастностью, обеспечивающей его отнесение к одному из классов в соответствии с изменением состояния объекта.

Другими словами – вектор признаков должен быть чувствительным к изменениям состояния объекта. Но при этом формируемый вектор признаков должен адекватно относить его к тому классу, к которому он относится.

В [11, 14–16] представлен подход к распознаванию сигналов по видам модуляции, предполагающий формирование спектра непосредственно из декоррелированных сигнальных отчетов.

В качестве инструмента декорреляции могут выступать различные преобразования [17, 18]. Но учитывая, что для обработки поступают фото- и видеоизображения, простейшим декоррелирующим преобразованием может рассматриваться вектор в виде гистограмм распределения битов яркости [13].

В результате такой декорреляции формируемая гистограмма становится зависимой не от изображаемого сюжета, а от соотношения содержащихся в нем битов яркости. Следовательно, любое изменение изображения теперь будет отображаться в изменении соотношения между собой компонентов гистограммы.

Поэтому наличие нефтяного пятна на фоне моря приведет к изменению яркости изображения, которое отразится в перераспределении битовых значений гистограмм.

То есть можно предполагать, что вектор признаков, сформированный указанным образом, будет обладать достаточной контрастностью для реакции на изменившийся фон.

### Результаты эксперимента

Для проведения эксперимента были отобраны фрагменты акватории поверхности океана, полученные в результате фотосъемки с БЛА. Всего было отобрано порядка 220 снимков. Затем все снимки были разде-

лены на два класса: с чистой поверхностью океана ( $N$  снимков) и с разливами нефти ( $K$  снимков). При этом из числа снимков с разливами нефти были отобраны те, в пределах которых нефтяные пятна занимали от 5% до 10% общей площади ( $T$  снимков). Здесь  $N+K+T=200$ .

Затем для каждого снимка был построен его вектор признаков. Из совокупности векторов признаков, характеризующих поверхность океана без разлива нефти  $\{^1V_m\}_N$  путем их усреднения был получен вектор признаков эталонного описания, характеризующего класс  $A$ , в соответствии с формулой

$${}^AV_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N ({}^1V_m)_n. \quad (4)$$

И аналогичным образом был получен вектор признаков эталонного описания, характеризующего класс  $B$ , в соответствии с формулой

$${}^BV_m = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K ({}^2V_m)_k. \quad (5)$$

А векторы признаков фотографий, в пределах которых нефтяные пятна занимали от 5% до 10% общей площади ( $T$  снимков), выступали в качестве векторов  ${}^0V_m$  при реализации алгоритма распознавания (3).

Из 33 снимков ( $T=33$ ) только при классификации двух снимков была допущена ошибка, что составляет 6%.

Для лучшего понимания сущности эксперимента на рис. 1 представлено фото с чистой акваторией  $F_A$ , а на рис. 2 – с разлитыми нефтепродуктами  $F_B$ .

Соответственно, на рис. 3 и 4 представлены векторы признаков указанных фотоизображений.

Следует отметить, что даже визуальный анализ векторов признаков изображений  $F_A$  и  $F_B$  указывает

на их существенные различия. Это объясняется тем, что чистая поверхность океана характеризуется однородным фоном воды, который описывается битами в пределах диапазона их значений [64; 140], что отчетливо видно на рис. 3.

Разлив нефтепродуктов вносит существенное изменение в фоновую структуру изображения. Прежде всего происходит перераспределение битовых значений, характеризующих рассматриваемый объект [19]. Диапазон значений отображаемых битов смещается в сторону увеличения их разрядности [70; 200]. При этом сам диапазон расширяется, а абсолютные значения гистограмм уменьшаются.

В качестве распознаваемого было отобрано фото  $F_C$  с изображением акватории океана, на котором 7% его площади занимает разлив нефтепродуктов. На рис. 5 и 6 представлено фото акватории  $F_C$  и его вектор признаков  ${}^0V_m$ .

Следует отметить, что на рис. 3, 4 и 6 значения гистограмм нормированы к абсолютной величине максимального значения, соответствующего элементу вектора  ${}^AV_{86}$ . Так, на рис. 7 представлено совместное размещение векторов  ${}^AV_m$ ,  ${}^BV_m$  и  ${}^0V_m$ . Здесь элемент гистограммы  ${}^AV_{86}$  выделен тоновым цветом.

Реализация алгоритма (3) позволяет однозначно отнести фото  $F_C$  к классу  $B$ , т. е. указывает на наличие загрязнения на поверхности океана.

В интересах детализации особенностей реализации алгоритма (3) на рис. 8 показаны векторы разности  ${}^{0A}d_m$  и  ${}^{0B}d_m$ , рассчитанные в соответствии с выражением (6):

$${}^{0A(0B)}d_m = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |{}^0V_m - {}^{A(B)}V_m|. \quad (6)$$

Анализ векторов разности на рис. 8 позволяет сделать следующий вывод. Нефтяные пятна на контролируемой водной поверхности, возникающие при



Рис. 1. Акватория океана без разлива нефти



Рис. 2. Разлив нефтепродуктов на акватории океана

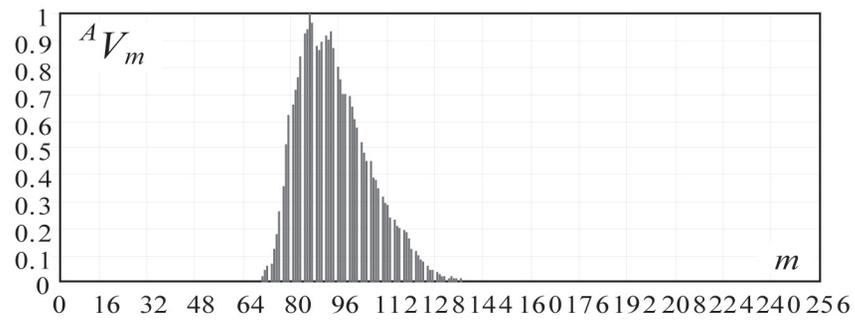


Рис. 3. Вектор признаков фото  $F_A$

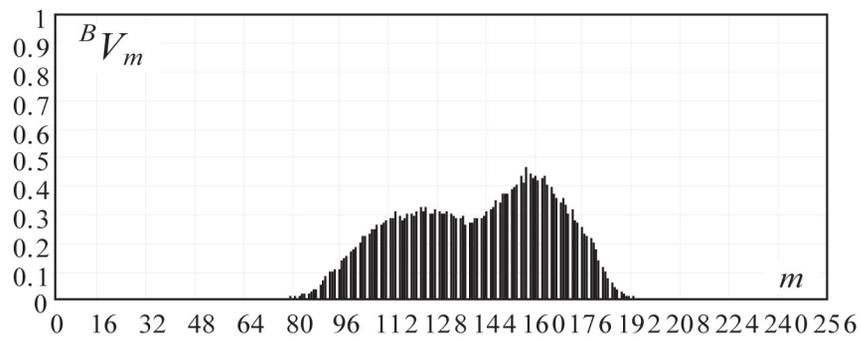


Рис. 4. Вектор признаков фото  $F_B$



Рис. 5. Изображение акватории океана на фото  $F_C$

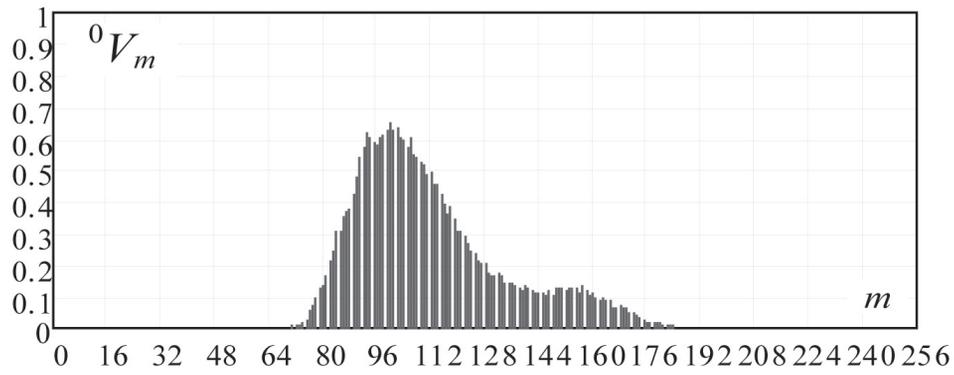


Рис. 6. Вектор признаков фото  $F_c$

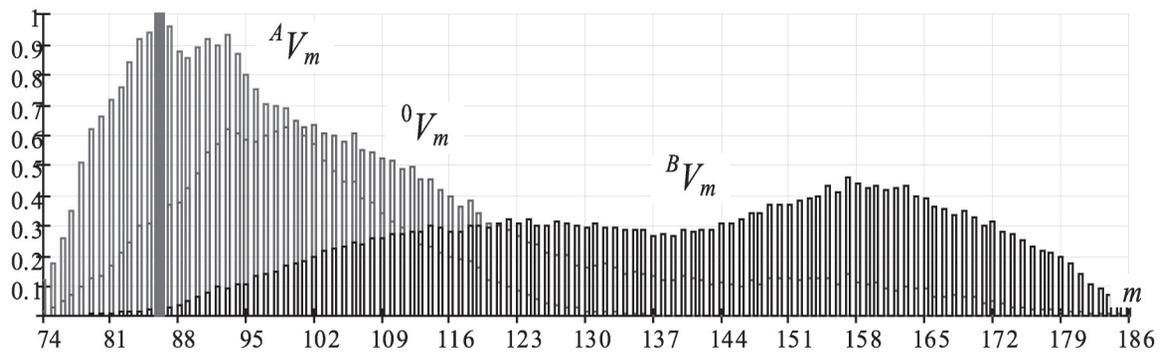


Рис. 7. Совместное представление векторов признаков  ${}^AV_m$ ,  ${}^BV_m$  и  ${}^0V_m$

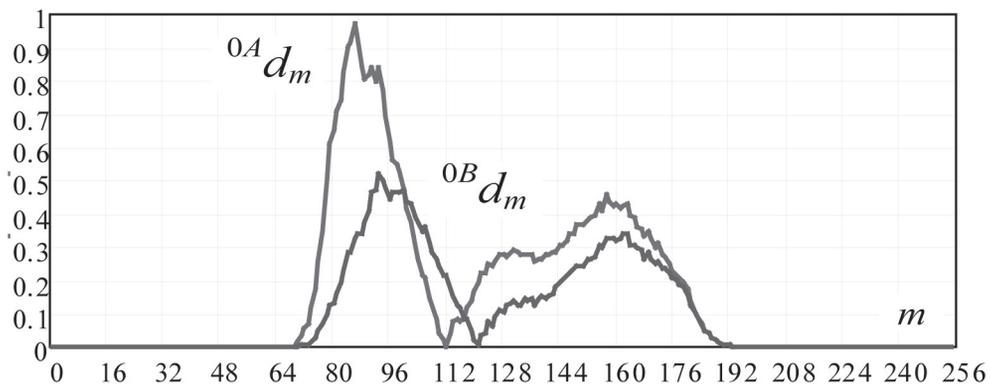


Рис. 8. Вектор разности

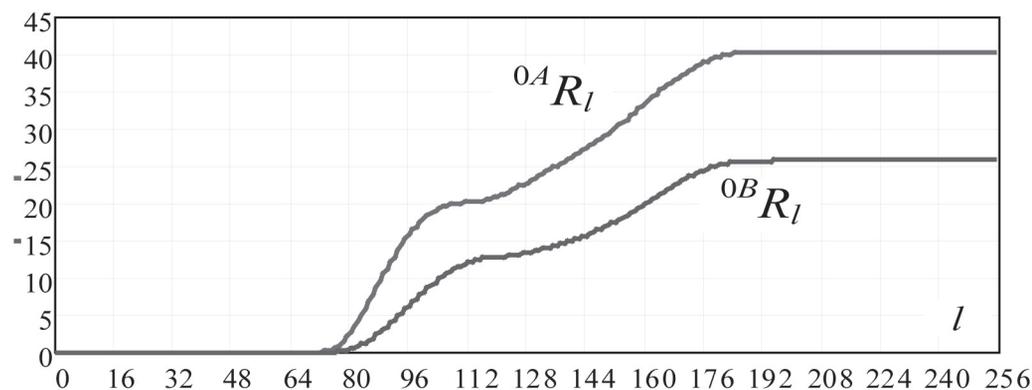


Рис. 9. Вектор мощности различий

техногенных авариях, приводят к существенному изменению цветового баланса на фото- и видеоизображениях. Влияние указанных изменений проявляется в перераспределении векторов яркости по гистограммам вектора признаков в сторону увеличения их значений. То есть чем больше нефтяное пятно на контролируемом снимке, тем контрастнее вектор признаков такого изображения по отношению к снимку с чистой водной поверхностью.

Проявление данных свойств отчетливо прослеживается на векторах разности  ${}^{0A}d_m$  и  ${}^{0B}d_m$ , что отчетливо видно на рис. 8. Максимальные значения вектора  ${}^{0V}_m$  распознаваемого изображения явно смещены в сторону высоких значений гистограммы по отношению к максимумам вектора  ${}^AV_m$ . Поэтому значения  ${}^{0B}d_m$  меньше значений  ${}^{0A}d_m$  во всей области допустимых значений. Следовательно, по своей структуре вектор признаков  ${}^{0V}_m$  гораздо ближе к вектору  ${}^BV_m$  на протяжении всего диапазона значений [64; 200], что позволяет отнести фото  $F_C$  к классу  $B$ , о чем ранее и был сделан вывод.

На рис. 9 изображены векторы мощности различий, рассчитанные по формуле (7).

$${}^{0A(0B)}R_l = \sum_{m=1}^l {}^{0A(0B)}d_m, \text{ где } l = 0 \dots 255 \quad (7)$$

Векторы мощности различий  ${}^{0A}R_l$  и  ${}^{0B}R_l$  позволяют четко выделить область гистограммы векторов признаков, в пределах имеет смысл проводить оценку различий. Применительно к рассматриваемому случаю  ${}^{0B}R_l$  уступает вектору  ${}^{0A}R_l$  во всем диапазоне значений [76; 176], что подтверждает гипотезу об отнесении изображения на фото  $F_C$  к классу  $B$ . При этом для векторов  ${}^{0A}d_m$  и  ${}^{0B}d_m$  такие условия выполняются не во всем диапазоне. Так на участке [100; 116]  ${}^{0A}d_m < {}^{0B}d_m$ .

Следует отметить, что в задачах распознавания в качестве инструмента принятия решения могут рассматриваться как векторы разности, так и векторы мощности различий.

## Заключение

Полученные результаты позволяют судить о достижении целевой установки, связанной с разработкой предложений по автоматизации процедур выявления мест нефтяных разливов на основе обработки данных фотоматериалов.

Предложенный подход позволяет синтезировать достаточно чувствительные вектора, обеспечивающие высокую контрастность формируемых признаков пространств. Расчетное значение вероятности ошибки, равное 0,06, для распознавания фотографий, в пределах которых нефтяные пятна занимали от 5% до 10% общей площади — вполне приемлемый результат. При этом следует учитывать, что выборка контрольных значений составила всего 33 единицы.

Дальнейшее исследование авторы связывают с применением методов совместного частотно-временного анализа, представленных в [20–22].

## Литература

- Елинский, В. И. Проблема загрязнения окружающей среды при нефтедобыче: актуальные вопросы / В.И. Елинский, Р.М. Ахмедов, Ю.А. Иванова // Вестник Московского университета МВД России. — 2020. — № 7. — С. 118–122.
- Васильева, В. В. Экологические риски процессов нефтедобычи и их влияние на здоровье населения / В.В. Васильева, Е.А. Хамидуллина // Техносферная безопасность в XXI веке : научные труды XII Всероссийской научно-практической конференции магистрантов, аспирантов и молодых ученых (Иркутск, 01–03 декабря 2022 г.) — Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. — С. 328–332.
- Медведев, Н. В. Нефтедобыча в Арктике: Есть ли в России необходимое оборудование для развития нефтегазовых проектов на арктическом шельфе? / Н.В. Медведев // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2015. — № 7–8. — С. 52–55.
- Соромотин, А. В. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов. Ликвидация последствий разливов / А.В. Соро-

мотин // International Agricultural Journal. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 9.

5. Даминев, Р. Р. Метод локализации аварийных разливов нефти / Р.Р. Даминев, Л.Р. Асфандиярова, Р.Н. Асфандияров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 5 (103). – С. 60–63.

6. Николаев, А. Д. Автоматизированная идентификация разливов нефти при помощи группы беспилотных летательных аппаратов / А.Д. Николаев, А.С. Петруничева // Главный механик. – 2023. – № 1. – С. 24–28.

7. Актуальность использования беспилотных летательных аппаратов в интересах предупреждения чрезвычайных ситуаций / Н.С. Шимон, Е.В. Калач, А.В. Калач, Н.В. Мартинович // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2021. – № 3 (22). – С. 92–98.

8. Разработка программного комплекса по автоматизированной обработке результатов геотехнического мониторинга для зон вечной мерзлоты / Л. Шилова, Д. Соловьев, Е. Мефедов, А. Алексеев // Информационные ресурсы России. – 2023. – № 1 (190). – С. 20–35.

9. Фукунага, К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / К. Фукунага. – Москва : Наука, 1979. – 368 с.

10. Ту, Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес. – Москва : Мир, 1978. – 412 с.

11. Дворников, С. В. Алгоритм распознавания сигналов радиосвязи на основе симметрических матриц / С.В. Дворников, С.С. Дворников, М.А. Коноплев // Информационные технологии. – 2010. – № 9. – С. 75–77.

12. Формирование векторов признаков сигналов из вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований / С.В. Дворников, Д.В. Степнянин, А.С. Дворников, А.П. Букарева // Информационные технологии. – 2013. – № 5. – С. 46–49.

13. Формирование векторов признаков для систем видеонаблюдения / Д.В. Васильева, С.С. Дворников, Ю.Е. Толстуха [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2023. – № 4. – С. 62–68.

14. Парамонов, А. А. Распознавание видов цифровой модуляции радиосигналов с использованием многослойной нейронной сети по кумулянтным признакам / А.А. Парамонов, О.В. Тихонова, В.М. Нгуен // Системы компьютерной математики и их приложения. – 2022. – № 23. – С. 23–28.

15. Чиров, Д. С. Применение математического аппарата деревьев решений для распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов в когнитивных системах ВЧ-связи / Д.С. Чиров, А.Н. Виноградов, Е.О. Воробьева // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 140–148.

16. Злобин, В. А. Необходимый и достаточный набор информативных признаков для классификации манипулированных сигналов / В.А. Злобин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10, № 4. – С. 21–25.

17. Дворников, С. В. Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов / С.В. Дворников, А.М. Сауков // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14, № 1. – С. 85–93.

18. Дворников, С. В. Корреляционные свойства коэффициентов кратномасштабного преобразования типовых изображений / С.В. Дворников, С.С. Дворников, А.А. Устинов // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21, № 5. – С. 983–1015.

19. Лисичкин, Г. В. Ликвидация аварийных разливов нефти: состояние и проблемы (обзор) / Г.В. Лисичкин, И.И. Кулакова // Журнал прикладной химии. – 2022. – Т. 95, № 9. – С. 1082–1110.

20. Дворников, С. В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений энергии нестационарных процессов в частотно-временном пространстве (обзор) / С.В. Дворников // Труды учебных заведений связи. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 47–60.

21. Метод обнаружения радиоизлучений на основе частотно-временного распределения Алексеева / С.В. Дворников, В.К. Железняк, Р.Н. Храмов [и др.] // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16, № 1. – С. 107–115.

22. Дворников, С. В. Теоретические основы частотно-временного анализа кратковременных сигналов : монография / С.В. Дворников, А.М. Кудрявцев. – Санкт-Петербург : ВАС, 2010. – 240 с.