

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОЕМОВ ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Вытовтов К. А.¹, Гладких Т. Я.²
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Рассматривается актуальная проблема обнаружения нефти и нефтепродуктов на поверхности воды, имеющая решающее значение для экологического мониторинга водных ресурсов. Рост загрязнения водных объектов нефтепродуктами обуславливает необходимость разработки эффективных методов их обнаружения и оценки состояния экосистем. В данной работе представлена методика, основанная на исследовании спектров отраженного солнечного света, которая позволяет с высокой точностью обнаруживать нефтяные загрязнения. Авторами получены аналитические выражения для индексов коэффициентов спектральной яркости, которые в дальнейшем использованы в геоинформационных системах (ГИС). Эти показатели помогают в обработке и интерпретации данных, полученных с помощью дистанционного зондирования, значительно упрощая процесс мониторинга и анализа состояния водных объектов. Методика показала свою эффективность в различных условиях и может быть адаптирована для использования в режиме реального времени. Результаты исследования способствуют совершенствованию методов экологического контроля и обеспечивают более надежную защиту водных ресурсов от загрязнения. Кроме того, в исследовании рассматривается потенциальная интеграция этого метода с другими системами экологического мониторинга для повышения точности и эффективности обнаружения загрязнения. Благодаря этим усовершенствованиям, предлагаемая методика позволяет не только выявлять разливы нефти, но и помогает в управлении ими и снижении негативных последствий, связанных с разливами нефти.

Ключевые слова: нефтепродукты, экологический мониторинг, мультиспектральные изображения, спектрометрия, обработка информации, геоинформационная система.

1. Введение

В последние годы актуальность проблемы загрязнения водных ресурсов нефтью и нефтепродуктами значительно возросла

¹ Константин Анатольевич Вытовтов, д.т.н., в.н.с. (vytovtov_konstan@mail.ru).

² Татьяна Яновна Гладких, н.с. (golnik@yandex.ru).

в связи с увеличением объемов добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья [7, 18, 26]. По критериям экологической опасности, таких как токсичность, канцерогенность, распространенность и частота встречаемости, нефтепродукты относятся к приоритетным загрязняющим веществам [2]. Все эти факторы увеличивают риски возникновения чрезвычайных ситуаций, в частности аварий [3], где эффективные методы обнаружения загрязнений играют ключевую роль. В связи со сложившейся ситуацией быстрое и точное обнаружение и идентификация нефтяных пятен на водной поверхности становится важнейшей задачей, требующей разработки и применения эффективных методов мониторинга.

В имеющихся публикациях, посвященных способам идентификации нефти на воде, рассматриваются разнообразные подходы к выбору метода и средств мониторинга. Так, авторами статьи [1] были проанализированы преимущества и недостатки дистанционного, а конкретно спутникового и авиационного мониторинга загрязнений, и был описан комплексный, многоуровневый мониторинг, где немаловажную роль играет обработка и анализ поступившей информации с помощью геоинформационных систем. Использование ГИС-технологий становится ключевым инструментом, который обеспечивает экологическую безопасность [5]. Данная технология позволяет извлекать ключевую информацию, такую как прогнозирование распространения разливов нефти, зависимость от внешних факторов, оценку интенсивности и определение источника загрязнений [16]. Возможность картирования нефтяных разливов [11, 14] позволяет оценить их пространственное распределение по водной поверхности и тенденции распространения. На основе ГИС возможно создание систем поддержки принятия решений, обеспечивающих ввод, хранение и обработку данных для решения проблем планирования и управления [8]. При этом авторы [10] полагают, что ГИС-технологии целесообразно рассматривать как средство создания комплексной платформы, применимой в экологическом мониторинге для идентификации нефтяных разливов и прогнозирования их распространения. Все это требует соответствующего совершенствования существующих методов [13, 23] и создания новых под-

ходов спектрального анализа, спутниковой [19] и воздушной разведки с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [15, 21, 25], а также лабораторных исследований, которые должны быть как можно более точными и оперативными для эффективного принятия мер по предотвращению экологических последствий нефтяных аварий. Проблема использования ГИС в области идентификации загрязнений водной поверхности нефтяными веществами заключается в необходимости точного и быстрого обнаружения и мониторинга таких загрязнений с использованием геопространственных данных. Недостаточная точность данных, а также несовершенство методов их анализа может затруднять эффективное применение геоинформационных систем для решения данной проблемы. Дополнительной сложностью является интеграция разнообразных исходных данных из многочисленных источников, включая спутниковые снимки, данные от БПЛА и наземные измерения. Важной задачей становится не только сбор данных, но и их стандартизация и нормализация для создания обобщенной и эффективной модели мониторинга. По этой причине разработка универсальных протоколов для обработки и анализа экологических данных, совместимых с ГИС, становится критически важной для обеспечения оперативности реагирования на инциденты. В этом контексте ученые и разработчики [6, 9, 20] стремятся к созданию мощных алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта, способных автоматически анализировать и интерпретировать данные о загрязнениях, что является следующим шагом к повышению эффективности экологического мониторинга.

В настоящей работе предлагаются математическая модель и алгоритм обработки мультиспектральных изображений для идентификации нефтяных загрязнений на водных поверхностях для решения задач экологического мониторинга.

2. Формулировка проблемы

Рассматривается система экологического мониторинга, основанная на анализе мультиспектральных изображений нефтяных загрязнений водной поверхности, полученных с использова-

нием БПЛА. Основная сложность поставленной задачи заключается в вариабельности условий распространения нефтяных пятен, которые зависят от множества факторов, включая тип нефти, погодные условия, течения и температуру воды [22].

Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели и алгоритма идентификации нефтяных загрязнений на водной поверхности с использованием мультиспектральной съемки, учитывающих спектры отраженных от нефтяных пленок сигналов при их разной толщине, добавлении лодочного масла. Для проверки корректности математической модели и соответствующего алгоритма анализируются данные натурных экспериментов, которые позволят в реальных условиях оценить эффективность полученных результатов.

3. Математическая модель и алгоритм идентификации загрязнений

В данном разделе предложены математическая модель и алгоритм идентификации нефтяных и масляных загрязнений водной поверхности с использованием типовых мультиспектральных камер БПЛА. Использовался квадрокоптер с мультиспектральной камерой DJI Phantom 4. Параметры каналов камеры: центральная длина волны «синего канала» равна $450 \text{ нм} \pm 16 \text{ нм}$, центральная длина волны «зеленого канала» равна $560 \text{ нм} \pm 16 \text{ нм}$, центральная длина волны «красного канала» равна $650 \text{ нм} \pm 16 \text{ нм}$, центральная длина волны канала «красный край» равна $730 \text{ нм} \pm 16 \text{ нм}$, центральная длина волны «инфракрасного канала» равна $840 \text{ нм} \pm 16 \text{ нм}$. Число эффективных пикселей каждой матрицы: 2,08 млн. Угол обзора: $62,7^\circ$. Фокусное расстояние: 5,74мм. Кроме того, в экспериментах использовалась камера MicaSense RedEdge-MX с аналогичными параметрами. Особенностью предлагаемой модели является учет интенсивности солнечного излучения в различное время суток и время года, коэффициентов отражения от воды и нефтяной пленки и состояния атмосферы. В результате производится сравнение интенсивностей отраженного солнечного света от воды и нефти по каналам мультиспектральной камеры.

Коэффициент отражения от полубесконечной водной среды вычисляется на основе классических законов электродинамики и равен [4]

$$(1) \quad R_{\text{вода}}(\lambda) = (\rho_{\text{воздух}} \cos \alpha_{\text{пад}} - \rho_{\text{вода}} \cos \alpha_{\text{прел}}) / (\rho_{\text{воздух}} \cos \alpha_{\text{пад}} + \rho_{\text{вода}} \cos \alpha_{\text{прел}}),$$

где $\rho_{\text{воздух}}$ – волновое сопротивление воздуха; $\rho_{\text{вода}}$ – волновое сопротивление воды; $\alpha_{\text{пад}}$ – угол падения; $\alpha_{\text{прел}}$ – угол преломления.

Коэффициент отражения от нефтяной пленки на водной поверхности рассчитывается с использованием так называемой матрицы преобразования [4, 23] как

$$(2) \quad R_{\text{нефть}}(\lambda) = [(m_{11} + m_{12}p_{\text{вода}})p_{\text{воздух}} - (m_{21} + m_{22}p_{\text{вода}})] / [(m_{11} + m_{12}p_{\text{вода}})p_{\text{воздух}} + (m_{21} + m_{22}p_{\text{вода}})],$$

где m_{ij} – элементы матрицы преобразования для изотропной среды:

$$(3) \quad M(\lambda) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi(\lambda, \theta, d)) & -(j/p) \sin(\varphi(\lambda, \theta, d)) \\ -jp \sin(\varphi(\lambda, \theta, d)) & \cos(\varphi(\lambda, \theta, d)) \end{pmatrix}.$$

Здесь $\varphi(\lambda, \theta, d) = k_0 n(\lambda) d \cos(\theta)$; $p_{\text{воздух}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{воздух}}(\lambda) / \mu \cos \theta}$ для случая, когда вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости падения (ТЕ-волна); $p_{\text{воздух}} = \sqrt{\mu / \varepsilon_{\text{воздух}}(\lambda) \cos \theta}$ – когда вектор напряженности электрического поля перпендикулярен плоскости падения (ТМ-волна); $p_{\text{вода}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{вода}}(\lambda) / \mu \cos \theta}$ для ТЕ-волны; $p_{\text{вода}} = \sqrt{\mu / \varepsilon_{\text{вода}}(\lambda) \cos \theta}$ – для ТМ-волны; θ – угол падения, зависящий от времени суток и времени года; d – толщина слоя нефти; λ – длина волны в свободном пространстве; $k_0 = 2\pi / \lambda$ – волновое число в свободном пространстве.

Тогда распределение интенсивности в спектре отраженного света может быть найдено как

$$(4) \quad S(\lambda) = S_{\text{солнца}}(\lambda) R(\lambda),$$

где $S_{\text{солнца}}(\lambda)$ – распределение поля в видимом спектре излучения Солнца, определяемое экспериментально (рис.1).

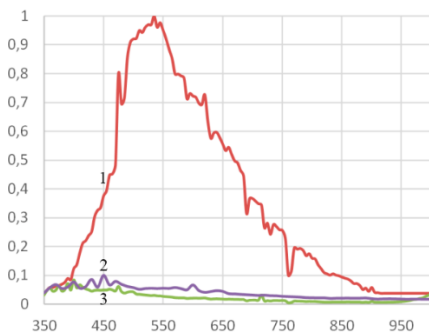


Рис. 1. Приведенные нормированные спектры: 1 – спектр солнечного света; 2 – спектр пленки толщиной 100мкм; 3 – спектр пленки толщиной 1мм

В предлагаемой математической модели также учитываются центральная длина волны λ_0 и ширина полосы пропускания $\Delta\lambda$ каждого канала соответствующей мультиспектральной камеры. Тогда суммарная интенсивность в i -м канале камеры может быть найдена следующим образом:

$$(5) \quad S_i = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} S_{\text{солнца}}(\lambda) R(\lambda) d\lambda.$$

Индексы коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) для N -канальной камеры в простейшей форме рассчитываются по формуле

$$(6) \quad K_i = (S_i - S_N) / (S_i + S_N), i = \overline{1, 4}.$$

С учетом этого результирующий индекс КСЯ:

$$(7) \quad K = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij} (s_i - s_j) / (s_i + s_j)], i \neq j,$$

и проверяется соответствие его значения заданному диапазону. Здесь α_{ij} ($0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$, $\sum_i \alpha_{ij} = 1$) – весовые коэффициенты, которые находятся экспериментально.

На основании анализа выражения (7) принимается решение о наличии или отсутствии загрязнения.

Таким образом, в соответствии с математической моделью алгоритм включает в себя следующие этапы (рис. 2):

– Расчет коэффициентов отражения от воды и нефтяной пленки по формулам (1) и (2).

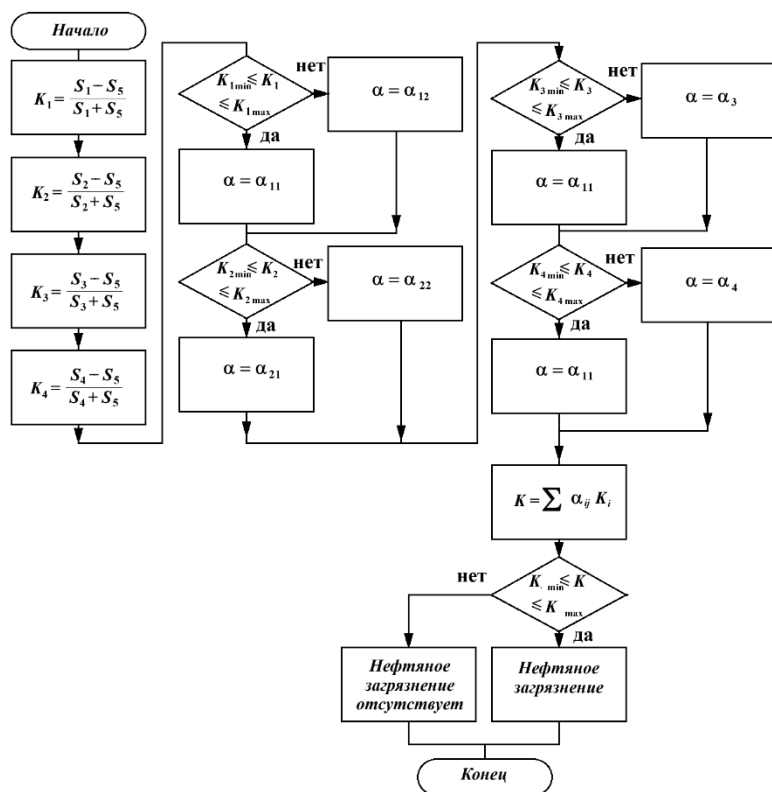


Рис.2. Блок-схема алгоритма определения загрязнений водной поверхности

- Расчет суммарной интенсивности в i -м канале камеры по формуле (5).
- Расчет простейших индексов коэффициентов спектральной яркости для чистой водной поверхности и нефтяной пленки на поверхности воды по формуле (6).
- Для каждого индекса проверяется нахождение значений в пределах соответствующих диапазонов: $K_{i\min} \leq K_i \leq K_{i\max}$ и в зависимости от этого весовым коэффициентам α присваиваются определенные значения α_{ij} ($0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$, $\sum_i \alpha_{ij} = 1$).

- Расчет результирующего индекса коэффициента спектральной яркости по формуле (7).

- Принятие решения о наличии или отсутствии загрязнения.

Блок-схема алгоритма идентификации нефтяных загрязнений с использованием построенной математической модели представлена на рис. 2.

4. Лабораторный эксперимент

Для идентификации нефтяных загрязнений на водной поверхности необходимо исследовать как спектр отраженного света от нефтяной пленки, так и спектр отраженного света от самой воды, поскольку именно различия в интенсивности отраженного света по каналам мультиспектральной камеры позволяют проводить эффективный мониторинг загрязнений.

Измерение спектров отраженного солнечного света от пресной воды и нефтяной пленки проводилось в лабораторных условиях. Схема эксперимента представлена на рис.3.

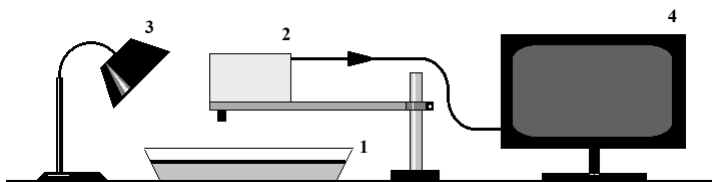


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 – кювета с исследуемой жидкостью; 2 – оптический спектрометр «Flame» Ocean Insight; 3 – галогенная лампа; 4 – компьютер

На первом этапе были проведены измерения оптическим спектрометром «Flame» Ocean Insight спектра чистой воды в кюветах без нефтяных пленок для получения фоновых данных. Затем была проведена серия измерений спектральных характеристик нефтяных пленок марки Urals и пленок двухтактного лодочного масла на воде с фиксацией полученных спектральных данных.

Результаты измерений отраженного спектра тонкой нефтяной пленки различной толщины представлены на рис. 4. Здесь

кривая 1 соответствует толщине слоя 10 мкм; кривая 2 – толщине слоя 20 мкм; кривая 3 – толщине слоя 25 мкм; кривая 4 – толщине слоя 40 мкм; кривая 5 – толщине слоя 50 мкм. Из результатов измерений видно, что увеличение толщины нефтяной пленки приводит к изменению интенсивности отраженного света, но не изменяет форму спектра.

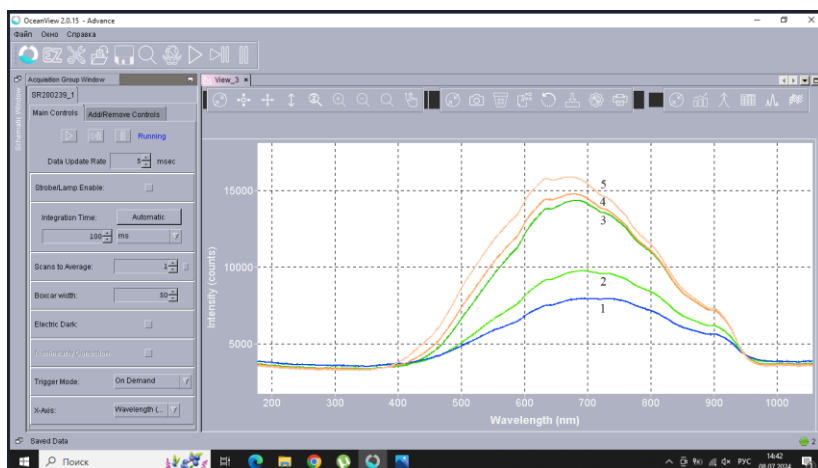


Рис. 4. Спектры отраженного нефтяной пленкой света от галогенной лампы: 1 – толщина слоя 10 мкм; 2 – толщина слоя 20 мкм; 3 – толщина слоя 25 мкм; 4 – толщина слоя 40 мкм; 5 – толщина слоя 50 мкм

В данном случае учитывается, что в полевом эксперименте будет использоваться пятиканальная камера с параметрами: для «синего канала» $\lambda_0 = 475$ нм и $\Delta\lambda = 20$ нм, для «зеленого канала» $\lambda_0 = 560$ нм и $\Delta\lambda = 20$ нм, для «красного канала» $\lambda_0 = 668$ нм и $\Delta\lambda = 20$ нм, для канала «красный край» $\lambda_0 = 717$ нм и $\Delta\lambda = 10$ нм, центральная длина волны «инфракрасного канала» равна 840 нм и $\Delta\lambda = 10$ нм.

Например, для нефтяной пленки толщиной 50 мкм (рис.4) имеем $K_1 \approx 0,600$, $K_2 \approx 0,487$, $K_3 \approx 0,298$, $K_4 \approx 0,2$. Тогда $K = \alpha_1 0,6 + \alpha_2 0,487 + \alpha_3 0,298 + \alpha_4 0,2$. При $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$ и $\alpha_3 = \alpha_4 = 0$ имеем $K = 0,5435$.

Для корректного выбора весовых коэффициентов α_i в дальнейшем необходимо провести аналогичные вычисления для водной поверхности, на которой исследуется загрязнение. Коэффициенты выбираются таким образом, чтобы разница между индексами коэффициентов спектральной яркости загрязнения и поверхности была максимальна.

5. Верификация алгоритма. Полевой эксперимент

После успешного завершения лабораторных испытаний и разработки алгоритма идентификации нефти авторами статьи были проведены полевые эксперименты, чтобы проверить эффективность своего решения в реальных условиях. В первую очередь была определена цель эксперимента – оценить точность и надежность алгоритма, а также его способность выявлять нефтяные загрязнения на мультиспектральных изображениях, полученных с камер, установленных на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Применение БПЛА для получения мультиспектральных снимков позволяет проводить идентификацию малоразмерных загрязнений, что дает преимущество перед аэрофотосъемкой и съемкой с космических аппаратов. Полученные коэффициенты были проанализированы с помощью геоинформационной системы для выявления характерных спектральных признаков и отличий между различными типами нефтяных пленок и подбора соотношений для более точной идентификации нефтяных загрязнений на водной поверхности.

Предложенный алгоритм может быть внедрен в системы мониторинга в реальном времени, что позволяет оперативно отслеживать и анализировать изменения в состоянии водных поверхностей. Использование разработанного алгоритма в ГИС позволяет получить изображение мест загрязнений с точными границами пятна. Пример изображения нефтяного пятна, полученного в результате контролируемого разлива нефти марки Urals на водном полигоне во время проведения натурных испытаний. Съёмка была проведена 27 января 2023 года в утреннее время в малооблачную погоду. Съёмка проводилась мультиспектральной камерой с высоты 50 м. На водную поверхность в проруби было нанесено небольшое количество сырой нефти для получения эффекта

тонкой нефтяной пленки на водной поверхности. В соответствии с [12] толщина пленки составила 2–5 мкм. При рассмотрении с малого расстояния (с края проруби) пленка имела радужную расцветку. После завершения испытаний нефтяная пленка была локализована и удалена механическим способом. Проверка качества очистки проведена визуально. Полученные в результате съемки изображения были обработаны в ГИС (Рис. 5). На RGB-снимке (рис. 5а) отчетливо видны контуры проруби и отсутствие в ней посторонних предметов. Тонкое нефтяное пятно можно распознать только если заранее известно о его существовании и на малых расстояниях. На обработанном изображении (рис. 5б) цветовая гамма выбрана таким образом, что снежный покров отображен желтым цветом, водная поверхность – насыщенным синим цветом, нефтяные пятна в зависимости от толщины – оттенками голубого. Отметим, что съемка, например, в ясную погоду или в другое время года может потребовать дополнительных исследований, поскольку при этом изменится спектр отраженного от воды света.

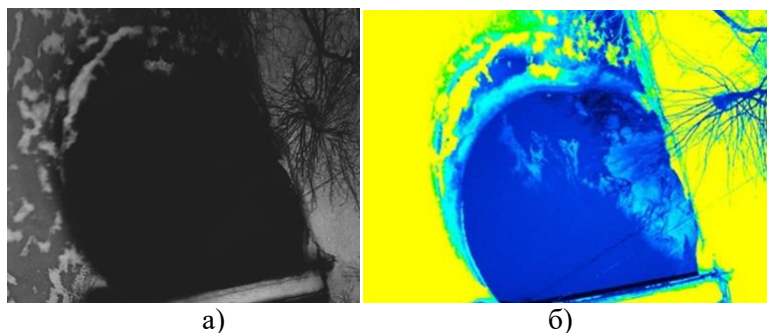


Рис. 5. а) Изображение нефтяной пленки на воде на RGB- снимке; б) Изображение нефтяной пленки на воде после обработки данных в ГИС

Внедрение данного алгоритма в ГИС обеспечивает возможность интеграции с другими источниками данных, такими как данные с беспилотных летательных аппаратов. Дистанционное зондирование в сочетании с применением ГИС-технологий улучшают идентификацию и классификацию разливов нефти, что

должно привести к созданию конечного продукта - карты распространения разливов нефти [17].

Практическое применение разработанного метода показало его эффективность в различных условиях, что подтверждается рядом выполненных полевых испытаний.

6. Заключение

В работе представлены математическая модель для нахождения индексов коэффициентов спектральной яркости и алгоритм идентификации загрязнений на водных поверхностях, основанный на анализе спектров отраженного солнечного света и выполнена его интеграция с геоинформационными системами. Предложенная математическая модель является аналитической и позволяет находить требуемые индексы коэффициентов спектральной яркости для различных условий окружающей среды еще до полевых испытаний, что существенно снижает затраты на экологический мониторинг.

Экспериментальные исследования показали, что предложенная математическая модель и алгоритм, основанный на анализе спектральных признаков, позволяют не только точно идентифицировать виды нефтяных пленок, но и оперативно отслеживать изменения в реальном времени.

Литература

1. АНТОНЕЦ К.В. *Комплексный мониторинг нефтегазовых загрязнений* // International Agricultural Journal. – 2021. – №1. – С. 49–54.
2. БАРАБАШИН Т.О., КОРАБЛИНА И.В., ПАВЛЕНКО Л.Ф. и др. *Методическое обеспечение мониторинга загрязнения водных объектов азово-черноморского бассейна* // Водные биоресурсы и среда обитания. – 2018. – Т. 1. – №3-4. – С. 9–27.
3. БЕСКИД П.П., БОГДАНОВ П.Ю., МИКЛУШ В.А. и др. *Результаты исследований в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, проводимых в РГТМУ* // Гидрометеорология и экология. – 2020. – №60. – С. 371–391.

4. БОРН М., ВОЛЬФ Э. *Основы оптики*. М.: Изд-во Наука, 1973. – С. 24–81.
5. БУЗМАКОВ С.А., САННИКОВ П.Ю., СИВКОВ Д.Е. и др. *Разработка геоинформационных систем для управления окружающей средой и экологической безопасностью в районах эксплуатируемых нефтяных месторождений // Антропогенная трансформация природной среды*. – 2021. – Т. 1. – С. 102–127.
6. БУКИН О.А., ПРОЩЕНКО Д.Ю., ЧЕХЛЕНКО А.А. и др. *Методы оптического мониторинга нефтяного загрязнения морских акваторий с использованием беспилотных летательных аппаратов // Оптика атмосферы и океана*. – 2019. – Т. 32(4). – С. 324–328.
7. БЫКОВ Р.Е., ИГНАТЬЕВА Н.В., СЛАДКОВ А.Ю. *Технические средства контроля водных поверхностей // Человек и море*. – 1994. – С. 74–79.
8. ЕПИФАНОВ А.В., ХУРШУДЯН Н.С., ШАРЕНКОВ Д.В. и др. *Оценка техногенного воздействия на водные объекты с применением геоинформационных систем // Учебно-методическое пособие*. – 2010. – С. 36–62.
9. КАЗАНЦЕВ А.Ю. *Применение искусственного интеллекта в предотвращении и минимизации сбросов нефтесодержащих вод с судов // Каспийский научный журнал*. – 2024. – Т. 2. – №1. – С. 9–20.
10. КАЛАНТАЕВСКИЙ Ю.С., АЛЕКСАНДРОВА А.В., КСАНДОПУЛО С.Ю. и др. *Применение географических информационных систем для экологического мониторинга в нефтегазовом комплексе // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2013. – Т. 86. – С. 92–101.
11. ЛУНЕВ Б.С., КРАСИЛЬНИКОВ П. А., ИЛАРИОНОВ С. А. и др. *Картирование территории при проведении геоэкологического мониторинга средствами ГИС // Фундаментальные исследования*. – 2014. – №11–1. – С. 89–93.
12. МОЛЬКОВ А.А., КАПУСТИН И.А., ЕРМОШКИН А.В. и др. *Дистанционные методы определения толщины плёнок*

- нефти и нефтепродуктов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – №3. – С. 9–27.
13. ФЕДОТОВ Ю.В., БЕЛОВ М.Л., МАТРОСОВА О.А. и др. *Метод обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах.* // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2010. – Т. 2. – С. 39–47.
 14. ЯЩЕНКО И.Г., АЛЕКСЕЕВА М.Н., СВАРОВСКАЯ Л.И. *Геоинформационные технологии для анализа нефтяных загрязнений рек* // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 7. – С. 38–43.
 15. BAYIRHAN İ., GAZIOGLU C. *Use of unmanned aerial vehicles (UAV) and marine environment simulator in oil pollution investigations* // Baltic journal of modern computing. – 2020. – Vol.8. – P. 327–336.
 16. BARABANOVA E., VYTOVTOV K., GLADKIKH T. et al. *Environmental monitoring of water surface pollution in the visible range by using UAVs* // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2023. – Vol. 68. – P. 388–392.
 17. ELJABRI A., GALLAGHER C. *Developing integrated remote sensing and GIS procedures for oil spills monitoring at Libyan coast* // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2012. – Vol. 44. – P. 17–20.
 18. FERREIRA N.M., COUTINHO R., DE OLIVEIRA L.S. *Emerging studies on oil pollution biomonitoring: A systematic review* // Marine Pollution Bulletin. – 2023. – Vol. 192. – P. 115081.
 19. FINGAS M., BROWN C.E. *A review of oil spill remote sensing sensors* // Sensors (Basel). – 2017. – Vol.18.
 20. GHORBANI Z., BEHZADAN A.H. *Monitoring offshore oil pollution using multi-class convolutional neural networks* // Environmental Pollution. – 2021. – Vol. 289. – P. 117884.
 21. GÓMEZ C., GREEN D.R. *Small unmanned airborne systems to support oil and gas pipeline monitoring and mapping* // Arab. J Geosci. – 2017. – Vol. 10. – DOI: 10.1007/s12517-017-2989-x.

22. LUKYANOV A., HOZAN H., SIALOUNAS G. et al. *Dynamics of oil slicks on wavy water surfaces* // Environmental Fluid Mechanics. – 2024. – P. 1–20.
23. MOHAMMADI M., SHARIFI A., HOSSEINGHOLIZADEH M. et al. *Detection of oil pollution using SAR and optical remote sensing imagery: A case study of the Persian Gulf* // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2021. – Vol. 49. – No. 10. – P. 2377–2385.
24. VYTOVTOV K. *Analytical investigation of stratified isotropic media* // Journal of the Optical Society of America A. – 2005. – Vol. 22(4). – P. 689–696.
25. WANASINGHE T., GOSINE R., DE SILVA O. et al. *Unmanned aerial systems for the oil and gas industry: overview, applications and challenges* // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 166980–166997.
26. YANG M., ZHANG B., XIN X. et al. *Microplastic and oil pollution in oceans: Interactions and environmental impacts* // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 838. – P. 156142.

ALGORITHM FOR IDENTIFICATION OF WATER SURFACE POLLUTION FOR GEOINFORMATION SYSTEMS

Konstantin Vytovtov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, Assistant Professor (vytovtov_konstan@mail.ru).

Tatiana Gladkikh, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, Research Associate (golnik@yandex.ru).

Abstract: The article considers the urgent problem of detection of oil and oil products on the water surface, which is of crucial importance for ecological monitoring of water resources. The growth of water bodies pollution with oil products necessitates the development of effective methods for their detection and assessment of the ecosystem state. This paper presents a new analytical technique based on the study of the spectra of reflected sunlight, which allows for the high-precision detection of oil pollution. The authors obtained analytical expressions for the indices of spectral brightness coefficients, which were subsequently used in geographic information systems (GIS). These indicators help in processing and interpreting data obtained by remote sensing, significantly simplifying the process of monitoring and analyzing the state of water

bodies. The method has proven its effectiveness in various conditions and can be adapted for use in real time. The research results contribute to the improvement of environmental monitoring methods and provide more reliable protection of water resources from pollution. In addition, the study considers the potential integration of this method with other environmental monitoring systems to improve the accuracy and efficiency of pollution detection. Thanks to these improvements, the proposed methodology not only allows for the detection of oil spills, but also helps in their management and the reduction of negative consequences associated with oil spills.

Keywords: petroleum products, environmental monitoring, multispectral images, spectrometry, information processing, geoinformation system.

УДК 504.064.36

ББК 26.192

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.И. Алчиновым.*

*Поступила в редакцию 31.10.2024.
Опубликована 31.05.2025.*