

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **046482**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2024.03.20**

(51) Int. Cl. **G01N 21/55** (2014.01)  
**G01S 17/88** (2006.01)  
**G01S 17/04** (2020.01)

(21) Номер заявки  
**202393034**

(22) Дата подачи заявки  
**2023.11.27**

---

(54) **СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛЕНОК НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

---

(31) **2023108241**

(56) RU-C1-2143108  
RU-C1-2298169  
RU-C1-2347210  
SU-A1-1092393  
JP-A-52119293

(32) **2023.04.03**

(33) **RU**

(43) **2024.03.18**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ "САНКТ-  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ "ЛЭТИ" ИМ. В.И.  
УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)" (СПбГЭТУ  
"ЛЭТИ") (RU)**

(72) Изобретатель:  
**Бородин Михаил Анатольевич (RU)**

(74) Представитель:  
**Семенов А.А. (RU)**

---

(57) Изобретение относится к области оптической локации и может быть использовано для мониторинга водной поверхности акваторий с целью обнаружения нефтяных пленок. Задачей изобретения является разработка способа обнаружения нефтяных пленок на водной поверхности лидаром, обеспечивающего высокую вероятность обнаружения тонких пленок нефти на морской поверхности в сочетании с большой зоной обзора. Технический результат состоит в учете зависимости коэффициента отражения электромагнитных волн от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" от угла облучения и толщины пленки при выполнении обнаружения. На основании сигналов отраженного от водной поверхности многолучевого лазерного излучения, угла облучения, показаний датчиков температуры, влажности воздуха и коэффициента отражения электромагнитных волн от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" от угла облучения и толщины пленки рассчитывают показатель обнаружения пленки нефти  $F$ , выполняют обнаружение пленки нефти при выполнении условия  $\min F$  менее или равен порогу обнаружения.

---

**B1**

**046482**

**046482**

**B1**

Настоящее изобретение относится к области оптической локации и может быть использовано для мониторинга водной поверхности акваторий с целью обнаружения нефтяных пленок.

Важной задачей экологического мониторинга водной поверхности является задача обнаружения разливов нефти. Особенно актуально решение указанной задачи для акваторий сравнительно небольших размеров, в которых осуществляется интенсивное судоходство и возможны несанкционированные сбросы нефтепродуктов в воду. При этом используют оптические локаторы (лидары), размещаемые на стационарных объектах вблизи морской поверхности, например на опоры мостов, для обеспечения непрерывного экологического контроля.

В процессе растекания на водной поверхности толщина пленки нефти уменьшается с течением времени до значений порядка нескольких микрометров, что требует создания более совершенных средств обнаружения.

Физической основой дистанционного обнаружения пленок нефти на водной поверхности с помощью лидара является различие характеристик сигналов оптического излучения, отраженных от чистой водной поверхности и водной поверхности, покрытой нефтяной пленкой. Указанное различие обусловлено отличием показателей преломления нефти и воды, а также эффектом сглаживания рельефа водной поверхности пленкой нефти.

В случае нефтяных пленок большой толщины проникновением оптического излучения в пленку пренебрегают и для обнаружения пленки нефти на водной поверхности используют пороговый метод. Поскольку коэффициент отражения от нефтяной пленки (граница раздела сред "воздух-нефть") будет всегда больше, чем коэффициент отражения от границы раздела "воздух-вода", значение последнего используют в качестве порога при обнаружении.

Для случая тонких пленок толщиной до 10 мкм (Козинцев В.И. и др. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. с. 229-232) отражение оптического излучения происходит от границы раздела сред "воздух-нефть-вода", и коэффициент отражения носит осциллирующий характер из-за явления интерференции внутри пленки, в результате обнаружение последней становится затруднительным.

Известен способ обнаружения нефтяной пленки на морской поверхности (Авторское свидетельство СССР № 1354073, кл. G01N 21/55, 1987), заключающийся в том, что исследуемую водную поверхность облучают импульсным пучком оптического излучения, принимают отраженный сигнал и проводят сравнение сигналов, отраженных от чистой и исследуемой водной поверхности. В качестве параметра сравнения выбирается количество импульсных сигналов  $N$ , превысивших порог срабатывания анализатора. При  $N \geq N_b$  судят о наличии нефтяной пленки, а при  $N < N_b$  - об ее отсутствии, где  $N_b$  - число, характеризующее вероятность приема сигналов.

Главным недостатком данного способа-аналога является отсутствие возможности обнаружения тонких нефтяных пленок на морской поверхности. Также недостатком является малая производительность поиска нефтяных пленок на водной поверхности, обусловленная малыми размерами зоны обзора.

Известен способ обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности воды (патент RU, № 2387977 С1, G01N 21/55, 2008), включающий облучение исследуемой водной поверхности воды импульсным оптическим пучком с перестраиваемой в узком спектральном диапазоне длиной волны излучения, регистрацию излучения, отраженного от водной поверхности, определение по данным измерений зависимости мощности отраженного излучения от длины волны и нахождение на основе этой зависимости коэффициента отражения и его второй производной по длине волны. Принятие решения о наличии нефтяной пленки на водной поверхности производят по выполнению одновременно двух соотношений, в которые входят коэффициенты отражения от исследуемой и от чистой водной поверхности и вторые производные по длине волны коэффициента отражения от исследуемой и чистой водной поверхности.

Главным недостатком данного способа-аналога является малая зона обзора, и, как результат, малая производительность поиска нефтяных пленок на водной поверхности. Также недостатком является необходимость перестраивать длину волны излучения, что требует использования технически сложного лазера, что снижает надежность системы обнаружения.

Наиболее близким аналогом по технической сущности к предлагаемому способу является способ обнаружения нефтяных пленок на водной поверхности, следующий из технической реализации лидара OS1 High Resolution Imaging Ouster (<https://data.ouster.io/downloads/datasheets/datasheet-rev06-v2p4-os1.pdf>), в котором: ориентируют оси излучающей и приемной оптических систем лидара по нормали к плоскости водной поверхности в спокойном состоянии, формируют многолучевое лазерное импульсное излучение, облучают исследуемую водную поверхность импульсными оптическими сигналами в пределах совокупности из  $M$  сформированных лазерных лучей, где  $M$  - нечетное и  $M \geq 9$ , для каждого сформированного луча производят прием отраженного оптического сигнала, выполняют оптическую фильтрацию, преобразуют оптический сигнал в электрический, производят аналогово-цифровое преобразование, рассчитывают коэффициент отражения по мощности, по совокупности полученных за один цикл зондирования коэффициентов отражения формируют кадр изображения.

Главным недостатком данного способа-прототипа является относительно низкая вероятность обна-

ружения тонких пленок нефти на водной поверхности, обусловленная осциллирующим характером зависимости коэффициента отражения от границы раздела сред "воздух-нефть-вода". Обнаружение пленок нефти выполняется путем анализа сформированного кадра изображения, содержащего данные по всем  $M$  лазерным лучам, при использовании порогового метода отдельно для каждого луча и принятием решения при наличии факта обнаружения в большинстве из  $M$  лазерных лучей.

Задачей изобретения является разработка способа обнаружения нефтяных пленок на водной поверхности лидаром, обеспечивающего высокую вероятность обнаружения тонких пленок нефти на морской поверхности в сочетании с большой зоной обзора.

Технический результат состоит в учете зависимости коэффициента отражения электромагнитных волн от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" от угла облучения и толщины пленки при выполнении обнаружения.

Для обеспечения указанного технического результата в известный способ обнаружения нефтяных пленок на водной поверхности, в котором: ориентируют оси излучающей и приемной оптических систем лидара по нормали к плоскости водной поверхности в спокойном состоянии, формируют многолучевое лазерное импульсное излучение, облучают исследуемую водную поверхность импульсными оптическими сигналами в пределах совокупности из  $M$  сформированных лазерных лучей, где  $M$  - нечетное и  $M \geq 9$ , для каждого сформированного луча производят прием отраженного оптического сигнала, выполняют оптическую фильтрацию, преобразуют оптический сигнал в электрический, производят аналогово-цифровое преобразование, рассчитывают коэффициент отражения по мощности, по совокупности полученных за один цикл зондирования коэффициентов отражения формируют кадр изображения, введены новые признаки:

устанавливают датчик температуры и влажности воздуха в месте установки лидара;  
измеряют температуру и влажность воздуха;  
корректируют значение мощности принятых оптических сигналов;  
задают диапазон толщины и шаг изменения толщины пленки нефти, подлежащей обнаружению;  
рассчитывают эталонную зависимость коэффициента отражения от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" по мощности в зависимости от угла облучения и толщины пленки нефти;  
выполняют усреднение полученных за один цикл зондирования значений коэффициента отражения по мощности для лазерных лучей с одинаковыми углами наклона относительно нормали;  
рассчитывают показатель обнаружения пленки нефти

$$F(k) = \sum_{m=1}^{M_1} [R(\theta_{1,m}, d_k) - R_2(\theta_{1,m})]^2, \quad k = \overline{1, K},$$

где  $R$  - эталонная зависимость коэффициента отражения от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" по мощности в зависимости от угла облучения  $\theta_{1,m}$  и толщины пленки нефти  $d_k$ ;  $R_2$  - усредненная зависимость коэффициента отражения по мощности для лазерных лучей с одинаковыми углами наклона, полученных за один цикл зондирования;  $K$  - число значений толщин пленки, которые используются для выполнения обнаружения;  $M_1$  - число используемых углов облучения;

выполняют обнаружение пленки нефти при выполнении условия  $\min F \leq \Delta_0$ ,  $\Delta_0$  - порог обнаружения,  $\min F$  - минимальное значение показателя обнаружения пленки.

Таким образом, использование набора эталонных зависимостей коэффициента отражения по мощности от угла облучения и толщины пленки нефти позволяет учесть осциллирующий характер коэффициента отражения от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" при обнаружении, что в сочетании с процедурой коррекции мощности принятых сигналов и с учетом данных по совокупности полученных значений коэффициента отражения по мощности в пределах большой зоны обзора лидара позволяет увеличить вероятность обнаружения пленок нефти на водной поверхности.

Реализация способа поясняется фигурой.

На фигуре показана геометрия задачи обнаружения пленок нефти на водной поверхности, в которой представлены опора 1, держатель 2, лидар 3, состоящий из лазера 4, оптической изучающей системы 5, оптического дифракционного элемента 6, оптической приемной системы 7 многоканального оптического приемника 8, блока 9 обработки информации, системы 10 отображения информации, блока 11 контроля лазерного излучения, граница 12 раздела сред "воздух-вода", датчик 13 температуры и влажности воздуха.

Предложенный способ обнаружения нефтяных пленок на водной поверхности реализуется следующим способом.

Лидар 3 закрепляют на опоре 1 с помощью держателя 2 и ориентируют оси излучающей оптической системы 5 и приемной оптической системы 7 лидара 3 по нормали к плоскости водной поверхности в спокойном состоянии. В месте установки лидара 3 на держателе 2 устанавливают датчик 13 температуры и влажности воздуха.

Многолучевое лазерное импульсное излучение формируют следующим образом. Лазер 4 генерирует на фиксированной длине волны зондирующий импульс, который попадает в излучающую оптическую систему 5, направляющую импульс на оптический дифракционный элемент 6. Оптический дифракцион-

ный элемент 6 разделяет первичный лазерный луч на  $M$  лазерных лучей, излучаемых в сторону границы 12 раздела сред.

Также излученный лазером 4 зондирующий импульс поступает на блок 11 для контроля интенсивности лазерного излучения.

Облучают исследуемую водную поверхность импульсными оптическими сигналами в пределах совокупности сформированных лазерных лучей.

Углы облучения соответствующие углам наклона лазерных лучей  $\theta_m$  относительно нормали к поверхности границы 12 раздела сред рассчитывают по формуле

$$\theta_m = \theta_0 + (m - 1) \cdot \Delta\theta, \quad m = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где

$\Delta\theta$  - шаг изменения угла наклона оси лазерного луча;

$\theta_0$  - начальный угол наклона оси лазерного луча;

$M$  - число сформированных лазерных лучей.

Граница 12 раздела сред рассеивает поступающие на нее зондирующие импульсы в сторону лидача 3.

Далее для каждого сформированного лазерного луча производят прием отраженного оптического сигнала - зондирующего импульса с помощью оптической приемной системы 7. Оптическая приемная система 7 направляет принятые сигналы на многоканальный оптический приемник 8, с помощью которого выполняют оптическую фильтрацию, преобразуют оптический сигнал в электрический и производят аналогово-цифровое преобразование.

Измеряют температуру и влажность воздуха с помощью датчика 13.

В блоке 9 обработки информации для каждого сформированного лазерного луча корректируют значение мощности принятых оптических сигналов

$$\hat{P}_{np} = P_{np} \cdot 10^{2\gamma h}, \quad (2)$$

где

$P_{np}$  - мощность принятого оптического сигнала;

$\hat{P}_{np}$  - мощность принятого оптического сигнала после коррекции;

$\gamma$  - коэффициент затухания оптического сигнала в атмосфере;

$h$  - расстояние от лидача 3 до водной поверхности.

Коэффициент затухания оптического сигнала  $\gamma$  в зависимости от длины волны, температуры и влажности атмосферы определяют согласно рекомендации МС3-R.P.1817 (08/2007): данные о распространении радиоволн, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве.

Расстояние от лидача 3 до водной поверхности определяют при установке на опоре 1.

Также в блоке 9 обработки информации для каждого сформированного лазерного луча рассчитывают коэффициент отражения по мощности. После обработки всех  $M$  лазерных лучей получают массив

$$R_1(\theta_{1,m}), \quad m = \overline{1, M}$$

Для обнаружения пленки нефти на водной поверхности задают диапазон толщины пленок нефти путем установки минимальной и максимальной толщины пленки нефти -  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$ , соответственно, которую будут обнаруживать.

Толщину пленки нефти в пределах заданного диапазона толщин определяют по формуле

$$d(k) = d_{\min} + \frac{d_{\max} - d_{\min}}{K - 1} (k - 1), \quad k = \overline{1, K}. \quad (3)$$

где  $K$  - число градаций толщин пленки в пределах заданного диапазона толщин, определяющее шаг изменения толщины пленки.

Из (3) шаг изменения толщины пленки равен

$$\frac{d_{\max} - d_{\min}}{K - 1}$$

Для расчетов целесообразно установить значение нечетным и равным  $K \geq 101$ , а  $d_{\min} = 0.1$  мкм,  $d_{\max} = 20$  мкм.

Рассчитывают эталонную зависимость коэффициента отражения от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" по мощности в зависимости от угла облучения и толщины пленки нефти по формуле [Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. Перевод с английского. М.: Наука, 1973. с. 76-77]

$$R(\theta_{1,m}, d_k) = \frac{r_{12}^2(\theta_{1,m}) + r_{23}^2(\theta_m)T(d_k) + 2r_{12}(\theta_{1,m})r_{23}(\theta_m)T(d_k)\cos(2\beta_{m,k})}{1 + r_{12}^2(\theta_{1,m})r_{23}^2(\theta_m)T(d_k) + 2r_{12}(\theta_{1,m})r_{23}(\theta_m)T(d_k)\cos(2\beta_{m,k})} \quad (4)$$

$$m = \overline{1, M}, \quad k = \overline{1, K}.$$

где  $n_1, n_2, n_3$  - показатели преломления воздуха, нефти и морской воды соответственно;

$\lambda$  - длина волны излучаемого оптического сигнала;

$d_k$  - толщина пленки нефти;

$r_{12}$  - коэффициент отражения от границы раздела сред "воздух-нефть";

$r_{23}$  - коэффициент отражения от границы раздела сред "нефть-вода";

$T$  - коэффициент пропускания пленки нефти;

$\theta_{1,m} = \theta_{m+M_1}$ ,  $m = \overline{1, M_1+1}$ ,  $M_1 = 0.5 \cdot (M - 1)$  - угол облучения границы раздела сред "воздух-нефть" или "воздух-вода";

$\theta_{2,m}$  - угол облучения границы раздела сред "нефть-вода";

$\beta_{m,k} = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_k \cos \theta_{2,m}$  - вспомогательный параметр.

Угол облучения границы раздела сред "нефть-вода" определяют по формуле

$$\theta_{2,m} = \arcsin \left[ \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{1,m} \right], \quad m = \overline{1, M}. \quad (5)$$

Коэффициент отражения от границы раздела сред "воздух-нефть" рассчитывают по формуле

$$r_{12}(\theta_{1,m}) = \frac{n_1 \cos \theta_{1,m} - n_2 \cos \theta_{2,m}}{n_1 \cos \theta_{1,m} + n_2 \cos \theta_{2,m}}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (6)$$

Коэффициент отражения от границы раздела сред "нефть-вода" рассчитывают по формуле

$$r_{23}(\theta_{2,m}) = \frac{n_2 \cos \theta_{2,m} - n_3 \cos \theta_{3,m}}{n_2 \cos \theta_{2,m} + n_3 \cos \theta_{3,m}}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (7)$$

Угол преломления лазерного излучения в водной среде

$$\theta_{3,m} = \arcsin \left[ \frac{n_2}{n_3} \sin \theta_{2,m} \right], \quad m = \overline{1, M}. \quad (8)$$

Коэффициент пропускания пленки нефти определяют по формуле

$$T(d_k) = \exp \left( -\frac{4\pi}{\lambda} k_2 d_k \right), \quad k = \overline{1, K}, \quad (9)$$

где  $k_2$  - показатель поглощения нефти.

Выполняют усреднение полученных за один цикл зондирования значений коэффициента отражения по мощности для лазерных лучей с одинаковыми углами наклона относительно нормали по формуле

$$R_2(\theta_{1,m}) = \begin{cases} R_1(\theta_{m+M_1}), & \text{при } m = 1 \\ 0.5 \cdot [R_1(\theta_{M_1+2-m}) + R_1(\theta_{M_1+m})], & \text{при } m = \overline{2, M_1+1} \end{cases}, \quad (10)$$

где  $M_1 = 0.5 \cdot (M - 1)$ .

Рассчитывают показатель обнаружения пленки нефти

$$F(k) = \sum_{m=1}^{M_1} [R(\theta_{1,m}, d_k) - R_2(\theta_{1,m})]^2, \quad k = \overline{1, K}. \quad (11)$$

Выполняют обнаружение пленки нефти при выполнении условия

$$\min F \leq \Delta_0, \quad (12)$$

где  $\Delta_0$  - порог обнаружения,

$\min F$  - минимальное значение показателя обнаружения пленки.

По совокупности полученных за один цикл зондирования коэффициентов отражения  $R_1$  формируют кадр изображения, который отображают с помощью системы 10 отображения информации.

Оценим увеличение вероятности обнаружения пленки нефти на водной поверхности предложенным способом.

В способе-прототипе реализовано обнаружение пленки нефти по кадру изображения при использовании порогового метода отдельно для каждого лазерного луча. Принятие решения об обнаружении производят при наличии факта обнаружения в большинстве лазерных лучей количеством  $L$  из  $M$  возможных лучей, где число  $L > 0.5M$ . При этом вероятность обнаружения пленки нефти по совокупности любых  $L$  из  $M$  лазерных лучей рассчитывают по формуле

$$P_1 = \sum_{i=L}^M C_{M,i} (p_0)^i (1-p_0)^{M-i}, \quad (13)$$

где  $p_0$  - вероятность обнаружения пленки нефти в одном лазерном луче;

$C_{M,i} = \frac{M \cdot (M-1) \cdot \dots \cdot (M-i+1)}{i!}$  - коэффициент.

В предложенном способе обнаружение ведется путем сравнения известной зависимости коэффициента отражения по мощности от угла облучения и толщины пленки с зависимостью коэффициента отражения по мощности от угла облучения при неизвестной толщине пленки нефти. При этом для сравнения используют даже те лазерные лучи, в которых значения коэффициента отражения по мощности меньше порога, т.е. в которых пленка не обнаружена. Следовательно, для выполнения обнаружения используют-

ся данные по всем  $M$  лазерным лучам, в этом случае вероятность обнаружения пленки нефти по совокупности из  $M$  лазерных лучей рассчитывают по формуле

$$P_2 = \sum_{i=1}^M C_{M,i} (p_0)^i (1-p_0)^{M-i}. \quad (14)$$

При вероятности обнаружения тонкой пленки нефти на водной поверхности в одном лазерном луче равной 0.6 и типовых значениях  $M=9$ ,  $L=5$ , получаем  $P_1=0.73$ , а  $P_2=0.9997$ . Увеличение вероятности обнаружения пленки нефти на водной поверхности составляет 36,9%.

Таким образом, предложенный способ обнаружения пленок нефти на водной поверхности обеспечивает высокую вероятность обнаружения тонких пленок нефти на морской поверхности в сочетании с большой зоной обзора.

Технический результат изобретения достигнут.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ обнаружения нефтяных пленок на водной поверхности, в котором ориентируют оси излучающей и приемной оптических систем лидара по нормали к плоскости водной поверхности в спокойном состоянии, формируют многолучевое лазерное импульсное излучение, облучают исследуемую водную поверхность импульсными оптическими сигналами в пределах совокупности из  $M$  сформированных лазерных лучей, где  $M$  - нечетное и  $M \geq 9$ , для каждого сформированного луча производят прием отраженного оптического сигнала, выполняют оптическую фильтрацию, преобразуют оптический сигнал в электрический, производят аналогово-цифровое преобразование, рассчитывают коэффициент отражения по мощности, по совокупности полученных за один цикл зондирования коэффициентов отражения формируют кадр изображения, отличающийся тем, что устанавливают датчик температуры и влажности воздуха в месте установки лидара, измеряют температуру и влажность воздуха, корректируют значение мощности принятых оптических сигналов, задают диапазон толщины и шаг изменения толщины пленки нефти, подлежащей обнаружению, рассчитывают эталонную зависимость коэффициента отражения от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" по мощности в зависимости от угла облучения и толщины пленки нефти, выполняют усреднение полученных за один цикл зондирования значений коэффициента отражения по мощности для лазерных лучей с одинаковыми углами наклона относительно нормали, рассчитывают показатель обнаружения пленки нефти

$$F(k) = \sum_{m=1}^{M_1} [R(\theta_{1,m}, d_k) - R_2(\theta_{1,m})]^2, \quad k = \overline{1, K}$$

где  $R$  - эталонная зависимость коэффициента отражения от границы раздела сред "воздух-нефть-вода" по мощности в зависимости от угла облучения  $\theta_{1,m}$  и толщины пленки нефти  $d_k$ ;  $R_2$  - усредненная зависимость коэффициента отражения по мощности для лазерных лучей с одинаковыми углами наклона, полученных за один цикл зондирования;  $K$  - число значений толщин пленки, которые используются для выполнения обнаружения;  $M_1$  - число используемых углов облучения, выполняют обнаружение пленки нефти при выполнении условия  $\min F \leq \Delta_0$ ,  $\Delta_0$  - порог обнаружения,  $\min F$  - минимальное значение показателя обнаружения пленки.

