#### НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

## НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС 77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

# Лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности, использующий угловое сканирование

# 07, июль 2012

DOI: 10.7463/0712.0413496

Стрелков Б. В., Белов М. Л., Тухватуллина С. А., Городничев В. А.

УДК 551.501

Россия, НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана <a href="mailto:belov@bmstu.ru">belov@bmstu.ru</a> <a href="mailto:ekomonit@bmstu.ru">ekomonit@bmstu.ru</a> <a href="mailto:gorod@bmstu.ru">gorod@bmstu.ru</a>

В настоящее время актуальной является проблема загрязнения нефтепродуктами прибрежных зон морей (см., например [1-4]). Именно в прибрежных зонах морей ярко проявляются отрицательные последствия активной хозяйственной деятельности человека.

Наиболее перспективными методами контроля акваторий с целью обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности воды являются методы, основанные на активной лазерной локации водной поверхности. Лазерные методы не требуют естественного освещения, могут использоваться в широком диапазоне атмосферных условий независимо от времени суток, обладают высокой пространственно-угловой разрешающей способностью, возможностью фильтрации и временного стробирования полезного сигнала на фоне помех (солнечных бликов, импульсов обратного рассеяния от атмосферных слоев и т.п.)

Физической основой дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности методом активного лазерного зондирования является наличие контраста яркости лазерного излучения отраженного от чистой водной поверхности и поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов. Контраст обусловлен двумя причинами [5, 6]: нефтяная пленка имеет другой коэффициент отражения, чем граница раздела воздух-вода, и нефтяная пленка сглаживает морское волнение.

Обнаружение нефтяных загрязнений обычно проводят, регистрируя лазерный локационный сигнал, отраженный от морской поверхности, и определяя контраст между чистой морской поверхностью и морской поверхностью, покрытой пленкой нефтепродуктов (см., например, [7-10]).

Эти методы позволяют надежно обнаруживать нефтяные загрязнения, однако они имеют недостаток — они обнаруживают нефтяные загрязнения в схеме зондирования морской поверхности вертикально вниз или в направлениях очень близких к вертикальным (т.е. полоса контроля нефтяных загрязнений на морской поверхности является очень узкой — единицы и или десятки).

Ниже описан угловой лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности, использующий угловое сканирование и позволяющий при большой вероятности правильного обнаружения проводить контроль нефтяных загрязнений в широкой полосе на морской поверхности.

Считаем, что лазерный локатор для зондирования нефтяных загрязнений морской поверхности установлен на авиационном носителе. Схема зондирования морской поверхности имеет узкий лазерный пучок, сканирующий поперек линии полета (см. рис. 1).

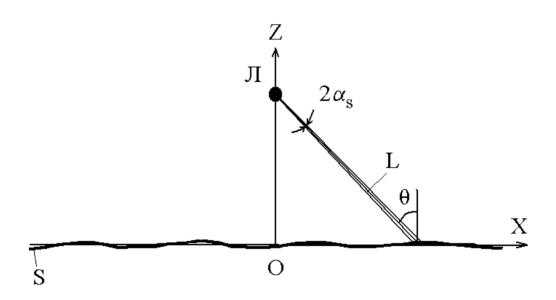


Рис. 1. Схема зондирования морской поверхности

На рисунке Л – лазерный локатор, расположенный на авиационном носителе, S - морская поверхность,  $2\alpha_s$  - угол расходимости лазерного источника,  $\theta$  - текущий угол между нормалью к плоскости z=0 и оптической осью лазерного локатора. Режим подсвета может быть как непрерывным, так и импульсным.

В качестве измеряемой величины используется массив значений средней (строго – по ансамблю реализаций морской поверхности, в практических задачах – по участкам морской поверхности много большим размера ее неровностей) мощности эхо-сигнала  $P(\theta)$ , регистрируемого при пространственном сканировании (поперек направления

**10.7463/0712.0413496** 188

полета носителя) морской поверхности. При импульсном подсвете  $P(\theta)$  - мощность в момент максимума регистрируемого импульсного локационного сигнала.

Мощность эхо-сигнала  $P(\theta)$ , регистрируемого приемником от взволнованной морской поверхности, определяется (импульсный подсвет при  $\tau_s c >> 2^{2.5} \, \sigma$ ; небольшие углы зондирования  $\theta <<1$ ,  $\theta << \frac{\tau_s c}{4} (C_s + C_r)^{1/2}$ ) следующей формулой (см., например, [8]):

$$P(\theta) \cong a_1 a_2 \exp\{-0.5tg^2\theta/\gamma_x^2\},\tag{1}$$

гле:

$$a_1 = \frac{V}{4\pi (\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}};$$

$$a_2 = a_s a_r \pi^{1/2} L^{-4} (C_s + C_r)^{-1}$$

L - расстояние от лидара до морской поверхности; V - коэффициент отражения Френеля для морской поверхности;  $\tau_s$  - длительность зондирующего импульса;  $\gamma_x^2$ ,  $\gamma_y^2$  - дисперсии наклонов морской поверхности поперек и вдоль линии полета (в плоскостях XOZ и YOZ.);

Для оценки дисперсий наклонов морской поверхности без нефтяных загрязнений используются следующие соотношения [11, 12]:

$$\frac{1}{\gamma_x^2} = \frac{\cos^2 \varphi}{\gamma_u^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\gamma_\sigma^2}; \quad \frac{1}{\gamma_y^2} = \frac{\cos^2 \varphi}{\gamma_\sigma^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\gamma_u^2};$$

$$\gamma_u^2 = 3.16 * 10^{-3} U$$
,  $\gamma_\sigma^2 = 0.003 + 1.92 * 10^{-3} U$ 

 $\gamma_u^2$ ,  $\gamma_\sigma^2$  - дисперсии наклонов морской поверхности по направлению ветра и поперек направления ветра;  $\phi$  - угол между осью х и направлением ветра; U - скорость приводного ветра (м/с).

Для прозрачной аэрозольной атмосферы величины  $a_s$  ,  $a_r$  ,  $C_{s,r}$  равны:

$$a_s = P_s \exp(-\tau_a)/(\pi\alpha_s^2); \ a_r = r_r^2 \exp(-\tau_a); \ C_{s,r} = (\alpha_{s,r}L)^{-2};$$

 $2\alpha_{s,r}$  - угол расходимости источника излучения и угловое поле зрения приемной системы;  $P_s$  - мощность излучаемая источником;  $r_r$  - эффективный размер приемной апертуры;  $\tau_a$  - оптическая толщина атмосферы между лазерным локатором и морской поверхностью.

Из формулы (1) получим формулу для отношения  $\frac{P(\theta + \Delta \theta)}{P(\theta)}$ :

$$\frac{P(\theta + \Delta\theta)}{P(\theta)} \cong \frac{V_2}{V_1} \frac{(\gamma_{1x}^2 \gamma_{1y}^2)^{1/2}}{(\gamma_{2x}^2 \gamma_{2y}^2)^{1/2}} exp\{-\frac{0.5}{\gamma_x^2} [tg^2(\theta + \Delta\theta) - tg^2\theta]\}$$
 (2)

Если  $\Delta\theta$  мало и измеряемые величины  $P(\theta+\Delta\theta),\ P(\theta)$  для соседних участков морской поверхности относятся к одной однородной области (воды или нефти), то  $V_2=V_1$ ,  $\gamma_{2x}^2=\gamma_{1x}^2,\ \gamma_{2y}^2=\gamma_{1y}^2$  и из (2) получим:

$$\frac{P(\theta + \Delta\theta)}{P(\theta)} = exp\{-\frac{0.5}{\gamma_x^2}[tg^2(\theta + \Delta\theta) - tg^2\theta]\}$$
 (3)

После преобразований из (3) имеем:

$$\gamma_x^2(\theta) = \frac{tg^2(\theta + \Delta\theta) - tg^2\theta}{2\ln\frac{P(\theta)}{P(\theta + \Delta\theta)}}$$
(4)

Таким образом, проводя измерения принимаемой мощности для небольших соседних участков морской поверхности, относящихся к одной однородной области (воды или нефти) можно измерить дисперсию  $\gamma_x^2$  наклонов морской поверхности в этой области (а значит и в пределах всего сектора сканирования на морской поверхности).

Отметим, что если для соседних участков измеряемые величины  $P(\theta + \Delta \theta)$ ,  $P(\theta)$  не относятся к одной однородной области (воды или нефти), то они будут сильно отличаться по величине (а значит, могут быть отбракованы при обработке данных измерений).

Для принятия решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности вычисляется  $K_{\gamma}(\theta)$  - отношение величины  $\gamma_x^2(\theta)$  исследуемого участка и чистой морской поверхности (величина  $K_{\gamma}(\theta)$  позволяет оценить эффект сглаживания морского волнения из-за нефтяных загрязнений):

$$K_{\gamma}(\theta) = \frac{\gamma_{xw}^{2}}{\gamma_{xoil}^{2}(\theta)},\tag{5}$$

где:  $\gamma_{xoil}^2(\theta)$ ,  $\gamma_{xw}^2$  - дисперсии наклонов исследуемого (текущего – регистрируемого при угле зондирования  $\theta$ ) участка и чистой морской поверхности; величина  $\gamma_{xw}^2$  дисперсии наклонов чистой морской поверхности может либо вычисляться в бортовом

10.7463/0712.0413496

вычислителе по данным измерений скорости приводного ветра, либо измеряться при полете над заведомо чистым (без нефтяных загрязнений) участком морской поверхности.

Контроль величины  $K_{\gamma}(\theta)$  позволяет относить исследуемый участок морской поверхности к случаю чистой воды или нефтяного загрязнения. Однако для надежного обнаружения нефтяных загрязнений одной величины  $K_{\gamma}(\theta)$  недостаточно (см., например, [8,9]) — кроме сглаживания морского волнения из-за разлива нефтепродуктов необходимо контролировать и коэффициент отражения поверхности.

Данные измерений  $P(\theta)$  и результаты определения величины  $\gamma_x^2(\theta)$  в пределах всего сектора сканирования на морской поверхности позволяют контролировать коэффициент отражения морской поверхности. Для этого определяется величина  $N(\theta)$ :

$$N(\theta) = P(\theta)\gamma_x^2 \exp\{0.5tg^2\theta/\gamma_x^2(\theta)\}$$
 (6)

Используя (1) из (6) имеем:

$$\tilde{N}(\theta) = V \frac{(\gamma_x^2)^{1/2}}{(\gamma_y^2)^{1/2}},$$
(7)

где:

$$\widetilde{N}(\theta) = \frac{N(\theta)}{A};$$

A – величина, не зависящая от характеристик морской поверхности;  $A = \frac{a_2}{4\pi}$ .

В левой части выражения (7) стоит величина, зависящая от данных измерений  $P(\theta)$ , результатов определения величины  $\gamma_x^2(\theta)$  (по данным обработки результатов измерений), дальности зондирования, характеристик источника и приемника. В правой части (7) стоит коэффициент отражения V морской поверхности (распределение которого в пределах всего участка сканирования на морской поверхности мы хотим определить).

Величина V в правой части (7) умножена на некоторый коэффициент  $\frac{(\gamma_x^2)^{1/2}}{(\gamma_y^2)^{1/2}}$ , однако

это не мешает контролировать V и относить полученную оценку V к случаю чистой воды или нефтяного загрязнения. Величина V увеличивается при переходе от чистой воды к нефтяному загрязнению в 2 раза в видимом и ближнем ИК диапазонах и в 4 раза в

среднем ИК диапазоне, в то время как коэффициент  $R = \frac{(\gamma_x^2)^{1/2}}{(\gamma_y^2)^{1/2}}$  довольно слабо

меняется при изменении характеристик волнения (см. рис. 2).

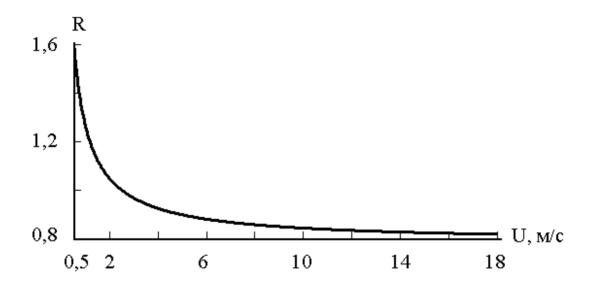


Рис. 2. Зависимость коэффициента R от скорости приводного ветра

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента R от скорости приводного ветра U в широком диапазоне условий волнения на морской поверхности - от штиля (0,5 м/c) до шторма (18 м/c). Хорошо видно, что, по крайней мере, в среднем ИК диапазоне вариации коэффициента R не помешают отнести измеренную величину V к чистой воды или нефтяному загрязнению.

Если для принятия решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности использовать  $K_N(\,\theta\,) = rac{\widetilde{N}_{oil}(\,\theta\,)}{\widetilde{N}_w}$  (  $K_N(\,\theta\,)$ - отношение величины  $\widetilde{N}$ 

исследуемого участка и чистой морской поверхности), то величина  $K_N(\theta)$  вообще не будет зависить от коэффициента R (считаем, что для нефтяных пленок дисперсии наклонов  $\gamma_{x,y}^2$  одинаково уменьшаются по сравнению с чистой водной поверхностью):

$$K_{N}(\theta) = \frac{\tilde{N}_{oil}(\theta)}{\tilde{N}_{w}} = \frac{V_{oil}(\gamma_{yw}^{2})^{1/2}(\gamma_{xoil}^{2})^{1/2}}{V_{w}(\gamma_{yoli}^{2})^{1/2}(\gamma_{xw}^{2})^{1/2}} \cong \frac{V_{oil}}{V_{w}}$$
(8)

где:

 $\widetilde{N}_{oil}$ ,  $\widetilde{N}_w$  и  $V_{oil}$ ,  $V_w$ - значение величины  $\widetilde{N}$  и коэффициента отражения для исследуемого участка и чистой морской поверхности.

Таким образом, величина  $K_{\gamma}(\theta)$  содержит информацию только о дисперсии наклонов исследуемого участка морской поверхности, а величина  $K_{N}(\theta)$  - только о коэффициенте отражения исследуемого участка морской поверхности.

10.7463/0712.0413496

Для принятия решения о наличии нефтяных загрязнений на исследуемом (текущем — при угле зондирования  $\theta$ ) участке морской поверхности необходимо определить величины  $K_{\gamma}(\theta)$  и  $K_{N}(\theta)$  и сравнить их с некоторыми пороговыми значениями.

На рисунках 3, 4 представлены зависимости величин  $K_{\gamma}$  ,  $K_{N}$  от скорости приводного ветра U в идеальном случае отсутствия шума измерения.

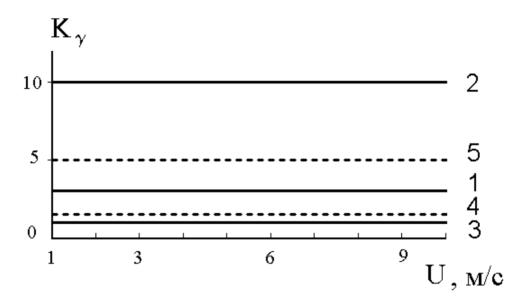


Рис. 3. Зависимость величины  $K_{\gamma}$  от скорости приводного ветра.

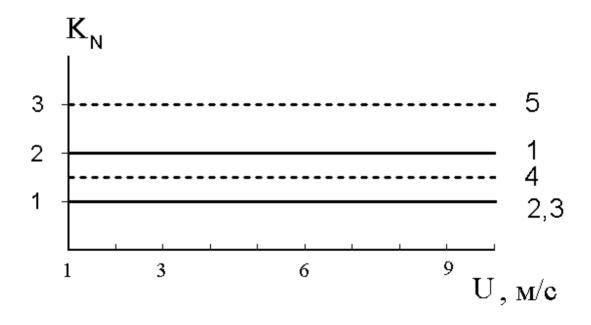


Рис. 4. Зависимость величины  $\ K_N$  от скорости приводного ветра.

На рисунках 5, 6 представлены результаты математического моделирования – пространственные реализации величин  $K_{\gamma}$  ,  $K_{N}$  .

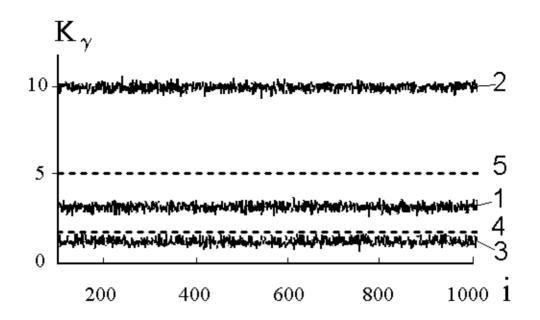


Рис. 5. Пространственная реализация величины  $K_{\gamma}$  .

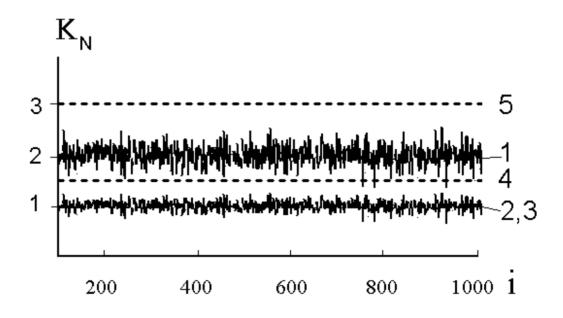


Рис. 6. Пространственная реализация величины  $K_N$ .

Для рисунков 5, 6 по оси абсцисс отложен i - номер пространственного дискрета на линии сканирования; среднеквадратическое значение шума измерения равно 0,5 %;

**10.7463/0712.0413496** 194

 $\theta$  =0,12;  $\Delta\theta$  =0,003; скорость приводного ветра — 3 м/с; высота полета носителя — 2000 м; длина волны лазера 1,06 мкм;  $\phi$  = 0; чистая морская поверхность: V = 0,02; толстая нефтяная пленка: V = 0,04. Пространственные реализации величин  $K_{\gamma}$ ,  $K_{N}$  получены по данным «измерений» по описанному выше методу. Принималось, что для толстых нефтяных пленок дисперсии наклонов  $\gamma_{x,y}^{2}$  уменьшаются по сравнению с чистой водной поверхностью в 3 раза [6, 11], а для слика (участка морской поверхности со сглаженным ветровым волнением) - в 10 раз. В области слика по разным причинам происходит очень сильное сглаживание волнения на морской

На рисунках 3 и 5 линии 1, 2, 3 соответствуют величинам  $K_{\gamma}$  "нефтяное загрязнение - чистая морская поверхность", "слик - чистая морская поверхность", "чистая морская поверхность - чистая морская поверхность", линии 4 и 5 - пороговые значения K1=1,5, K2=5. На рисунках 4 и 6 обозначения те же (как и на рисунках 3, 5) с одним отличием: кривая 5 соответствует пороговому значению K3=3.

поверхности и его можно спутать с нефтяным загрязнением, однако коэффициент

отражения в области слика такой же как и у чистой поверхности воды.

Из рисунков 3 - 6 хорошо видно, что определяя величины  $K_{\gamma}$ ,  $K_{N}$  можно уверенно обнаруживать нефтяные загрязнения и отличать их от сликов на морской поверхности. Математическое моделирование показывает, что одновременное использование условий  $K2 > K_{\gamma} > K1$  и  $K3 > K_{N} > K1$  позволяет принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности с вероятностью правильного обнаружения 0,9935 при вероятности ложных тревог 0,0025. Причем, при используемых для расчета параметрах схемы зондирования ширина полосы контроля нефтяных загрязнений на морской поверхности была не менее 500 м.

Таким образом, угловой лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности, позволяет при большой вероятности правильного обнаружения и приемлемой вероятности ложных тревог проводить обнаружение нефтяных загрязнений в широкой (сотни метров) полосе на морской поверхности.

#### Литература

- 1. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.
- 2. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия / В.М. Гольдберг [и др.] М.: Наука, 2001. 125 с.
- 3. Алешин И.В. Экологический мониторинг Мирового океана. СПб.: Изд-во СПГМТУ, 1997. 76 с.

- 4. Современное состояние прибрежных экосистем морей Российской Федерации / Ю.А.Израэль [и др.] // Метеорология и гидрология. 1995. N9. C. 6-21.
- 5. Гуревич И.Я., Шифрин К.С. Отражение видимого и ИК излучения нефтяными пленками на море // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 166-176.
- 6. Гардашов Р.Г., Гуревич И.Я., Шифрин К.С. Отражение оптического излучения от взволнованной морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой // Оптика атмосферы и океана. Баку: ЭЛМ, 1983. С. 33-44.
- 7. Оптико-физические средства исследования океана / Под ред. Е.Г. Пащенко. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.
- 8. Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И. Трехлучевой лазерный метод обнаружения нефтяной пленки на морской поверхности. // Вестник МГТУ. сер. Приборостроение. 2000. № 3. С. 7-12.
- 9. Дистанционное обнаружение нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности с помощью двухспектрального метода / Белов М.Л. [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2006.Т.19. N10. C. 872-874.
- 10. Белов М.Л. Спектрально-угловой лазерный метод дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005. Т.З. N4-5. С. 60-64.
- 11. Cox C.,Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // J.O.S.A. 1954. V.44. N.11. P.838-850.
- 12. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.:Наука, 1972. 424 с.

10.7463/0712.0413496

#### SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

### SCIENCE and EDUCATION

EL № FS 77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

## Laser method of detection of oil pollution on rough sea surface using angle scanning

# 07, July 2012

DOI: 10.7463/0712.0413496

Strelkov B.V., Belov M.L., Tuhvatullina S.A., Gorodnichev V.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

<u>belov@bmstu.ru</u>

<u>ekomonit@bmstu.ru</u>

gorod@bmstu.ru

In this paper the authors describe a laser method of detecting oil pollution on rough sea surface by means of angle scanning. It was shown that the laser method allows to detect oil pollutions in a broad band on sea surface with high probability of correct detection and low probability of false alarm.

**Publications with keywords:** <u>laser method</u>, <u>detection of oil pollution</u>, <u>sea surface</u>, <u>angle</u> scanning

Publications with words: <u>laser method</u>, <u>detection of oil pollution</u>, <u>sea surface</u>, <u>angle scanning</u>

#### References

- 1. Patin S.A. *Neft' i ekologiia kontinental'nogo shel'fa* [Oil and ecology of the continental shelf]. Moscow, VNIRO Publ., 2001. 247 p.
- 2. Gol'dberg V.M., Zverev V.P., Arbuzov A.I., Kazennov S.M., e.a. *Tekhnogennoe zagriaznenie prirodnykh vod uglevodorodami i ego ekologicheskie posledstviia* [Technogenic pollution of natural waters by hydrocarbons and its environmental impact]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 125 p.
- 3. Aleshin I.V. *Ekologicheskii monitoring Mirovogo okeana* [Ecological monitoring of the World Ocean]. St. Petersburg, SPGMTU Publ., 1997. 76 p.
- 4. Izrael' Iu.A., Tsyban' A.V., Panov G.V., e.a. Sovremennoe sostoianie pribrezhnykh ekosistem morei Rossiiskoi Federatsii [Current status of marine coastal ecosystems of the Russian Federation]. *Meteorologiia i gidrologiia*, 1995, no. 9, pp. 6-21.
- 5. Gurevich I.Ia., Shifrin K.S. Otrazhenie vidimogo i IK izlucheniia neftianymi plenkami na more [Reflection of visible and IR emission of light by oil films on the sea]. *Opticheskie*

- metody izucheniia okeanov i vnutrennikh vodoemov [Optical methods of studying the oceans and inland waters]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, pp. 166-176.
- 6. Gardashov R.G., Gurevich I.Ia., Shifrin K.S. Otrazhenie opticheskogo izlucheniia ot vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti, pokrytoi neftianoi plenkoi [The reflection of optical radiation from the rough sea surface covered by oil film]. *Optika atmosfery i okeana*. Baku, ELM Publ., 1983, pp. 33-44.
- 7. Ikonnikov I.B., Barantsev V.I., Gavrilov V.M., Gul'kov V.N., Zaitsev V.A., Kropotkin M.A., Pashchenko E.G., Tikhonov V.V. *Optiko-fizicheskie sredstva issledovaniia okeana* [Optico-physical means of ocean studies]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1984. 264 p.
- 8. Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Trekhluchevoi lazernyi metod obnaruzheniia neftianoi plenki na morskoi poverkhnosti [Three-beamlaser method fordetection ofoil filmon the sea surface]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie*[Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrumentation], 2000, no. 3, pp. 7-12.
- 9. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Smirnova O.A., Fedotov Iu.V., Khrustaleva A.M. Distantsionnoe obnaruzhenie neftianykh zagriaznenii na vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti s pomoshch'iu dvukhspektral'nogo metoda [Two-wave laser method for remote detection of oil spills on rough sea surface]. *Optika atmosfery i okeana*, 2006, vol. 19, no. 10, pp. 872-874.
- 10. Belov M.L. Spektral'no-uglovoi lazernyi metod distantsionnogo obnaruzheniia neftianykh zagriaznenii na morskoi poverkhnosti [The spectral-angular laser method for remote detection of oil pollution on sea surface]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy*, 2005, vol. 3, no. 4-5, pp. 60-64.
- 11. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, vol. 44, no. 11, pp. 838-850.
- 12. Bass F.G., Fuks I.M. *Rasseianie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* [Wave scattering from statistically rough surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 424 p.

**10.7463/0712.0413496** 198