

УДК 551.501

В. И. Козинцев, М. Л. Белов,  
В. А. Городничев, О. А. Смирнова,  
Ю. В. Федотов, А. М. Хрусталева

## ОБНАРУЖЕНИЕ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХЧАСТОТНЫМ ДИСТАНЦИОННЫМ ЛАЗЕРНЫМ МЕТОДОМ

*Предложен дистанционный двухчастотный лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности, позволяющий отличать нефтяные загрязнения от областей со сглаженным ветровым волнением и областей с высоким коэффициентом отражения, тем самым с большой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности.*

Нефть и продукты ее переработки являются одними из наиболее серьезных источников загрязнений морских акваторий нашей планеты [1, 2].

Загрязнения нефтепродуктами наиболее оперативно обнаруживаются дистанционными методами, позволяющими инспектировать обширные водные поверхности за сравнительно малый промежуток времени. Наиболее перспективными дистанционными методами контроля морских акваторий в целях обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности воды являются методы, основанные на лазерной локации.

Обнаружение нефтяных загрязнений на морской поверхности дистанционным лазерным методом обычно проводят, определяя контраст между интенсивностью отраженного излучения от чистой (без нефтяных загрязнений) водной поверхности и поверхности воды, покрытой пленкой нефтепродуктов [3]. Метод, основанный на активной лазерной локации водной поверхности, позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения на морской поверхности. Однако он имеет недостаток — участки морской поверхности и без пленки нефти он может идентифицировать как “нефтяные загрязнения”, так как область с высокой интенсивностью отраженного излучения может быть также областью со сглаженным ветровым волнением (сликом на морской поверхности, ветровой тенью за островом или высоким берегом) или областью с высоким коэффициентом отражения (например, из-за наличия пены).

Новый двухчастотный лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности позволяет проводить контроль одновременно двух эффектов – сглаживания ветрового волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности [4, 5] — и, тем самым, с большой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений.

Двухчастотный лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности включает:

- установку импульсного лазерного локатора на авиационном носителе;
- облучение морской поверхности вертикально вниз лазерным пучком на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;
- предварительный полет (до начала измерений на исследуемой акватории) над участком с чистой морской поверхностью;
- специальную обработку сигналов, полученных на участке с чистой морской поверхностью и на исследуемой акватории, по результатам которой принимается решение о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности.

Будем считать, что длины волн зондирующего излучения лежат в ИК-диапазоне спектра, где поглощение водой велико так, что основная доля регистрируемого приемником локатора лазерного эхо-сигнала создается излучением, зеркально отраженным границей “воздух–вода”, а долей излучения, диффузно отраженного толщей воды, можно пренебречь.

На предварительном участке полета (до начала измерений на исследуемой акватории) лидар регистрирует и запоминает в блоке обработки мощности эхо-сигналов  $P_w(\lambda_1)$ ,  $P_w(\lambda_2)$  на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  от участка с чистой морской поверхностью. Если длительность зондирующего импульса  $\tau_s$  выбрать так, чтобы выполнялось неравенство  $\tau_s^2 c^2 / 16 \gg 2\sigma_w^2$  ( $\sigma_w^2$  — дисперсия высот чистой взволнованной морской поверхности), то мощности  $P_w(\lambda_1)$ ,  $P_w(\lambda_2)$  определяются следующей формулой [6]:

$$P_w(\lambda_{1,2}) \cong \frac{V_w^2(\lambda_{1,2})}{4\pi(\gamma_{wx}^2 \gamma_{wy}^2)^{1/2}} \frac{a_s(\lambda_{1,2})a_r(\lambda_{1,2})\pi^{1/2}}{L^4(C_s + C_r)}, \quad (1)$$

где  $V_w^2$  — коэффициент отражения Френеля чистой морской поверхности;  $\gamma_{wx,wy}^2$  — дисперсии наклонов чистой морской поверхности;  $L$  — расстояние от лазерного локатора до морской поверхности (высота расположения носителя); для прозрачной земной атмосферы имеем:

$$a_s(\lambda) = P_s(\lambda) \exp[-\tau_a(\lambda)] / (\pi\alpha_s^2);$$

$$a_r(\lambda) = r_r^2 \exp[-\tau_a(\lambda)]; \quad C_{s,r} = (\alpha_{s,r}L)^{-2};$$

$2\alpha_{s,r}$  — угол расходимости источника излучения и угловое поле зрения приемной оптической системы лазерного локатора;  $P_s(\lambda)$  — мощность, излучаемая источником лазерного локатора;  $r_r$  — эффективный размер приемной апертуры лазерного локатора;  $\tau_a(\lambda)$  — оптическая толщина (вдоль направления вертикально вниз) земной атмосферы между лазерным локатором (авиационным носителем) и морской поверхностью на длине волны  $\lambda$ .

Формула (1) получена при импульсном зондировании взволнованной морской поверхности и определяет среднюю (если определять строго — среднюю по возможным реализациям неровной морской поверхности, если определять приближенно — среднюю за много посылок лазерных импульсов) принимаемую мощность в моменты максимумов регистрируемых импульсных локационных сигналов (форма зондирующего лазерного импульса считалась гауссовой). Заметим, что частота повторения зондирующих лазерных импульсов может быть десятки, сотни герц и даже единицы и десятки килогерц. Поэтому размер отрезков полета, на которых проводится усреднение принимаемой мощности, может быть небольшим — единицы и десятки метров даже при высокой скорости полета авиационного носителя.

При полете носителя над исследуемой акваторией лидар регистрирует на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  мощности эхо-сигналов  $P(\lambda_1)$  и  $P(\lambda_2)$  (на некоторых небольших отрезках полета, на которых проводятся измерения средней принимаемой мощности):

$$P(\lambda_{1,2}) \cong \frac{V^2(\lambda_{1,2}) a_s(\lambda_{1,2}) a_r(\lambda_{1,2}) \pi^{1/2}}{4\pi(\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2} L^4(C_s + C_r)}, \quad (2)$$

где  $V^2$  — коэффициент отражения Френеля для исследуемого участка морской поверхности;  $\gamma_{x,y}^2$  — дисперсии наклонов для исследуемого участка морской поверхности.

Сигналы  $P_w(\lambda_1)$ ,  $P_w(\lambda_2)$  и  $P(\lambda_1)$ ,  $P(\lambda_2)$  в блоке обработки нормируются на мощности, излучаемые источником лазерного локатора на длинах волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ :

$$\tilde{P}_w(\lambda_{1,2}) = \frac{P_w(\lambda_{1,2})}{P_s(\lambda_{1,2})} = \frac{V_w^2(\lambda_{1,2}) \exp[-2\tau_a(\lambda_{1,2})] r_r^2}{4\pi^{3/2}(\gamma_{wx}^2 \gamma_{wy}^2)^{1/2} L^4 \alpha_s^2(C_s + C_r)}, \quad (3)$$

$$\tilde{P}(\lambda_{1,2}) = \frac{P(\lambda_{1,2})}{P_s(\lambda_{1,2})} = \frac{V^2(\lambda_{1,2}) \exp[-2\tau_a(\lambda_{1,2})] r_r^2}{4\pi^{3/2}(\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2} L^4 \alpha_s^2(C_s + C_r)}. \quad (4)$$

Сигналы  $\tilde{P}(\lambda_1)$ ,  $\tilde{P}(\lambda_2)$  в блоке обработки нормируются соответственно на  $\tilde{P}_w(\lambda_1)$  и  $\tilde{P}_w(\lambda_2)$ :

$$\tilde{\tilde{P}}(\lambda_{1,2}) = \frac{\tilde{P}(\lambda_{1,2})}{\tilde{P}_w(\lambda_{1,2})} = \frac{V^2(\lambda_{1,2}) (\gamma_{wx}^2 \gamma_{wy}^2)^{1/2}}{V_w^2(\lambda_{1,2}) (\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}}. \quad (5)$$

Сигналы  $\tilde{P}(\lambda_1), \tilde{P}(\lambda_2)$  используются далее в блоке обработки для нахождения следующей величины:

$$N(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\tilde{P}(\lambda_1)}{\tilde{P}(\lambda_2)} = \left[ \frac{V^2(\lambda_1)}{V^2(\lambda_2)} \right] \frac{V_w^2(\lambda_2)}{V_w^2(\lambda_1)}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) видно, что величина  $N(\lambda_1, \lambda_2)$ , характеризующая некоторый отрезок полета, на котором проводятся измерения средней принимаемой мощности, зависит только от отношения коэффициентов отражения исследуемого участка морской поверхности на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . По величине  $N(\lambda_1, \lambda_2)$  можно судить о характере отражения водной поверхности на этом отрезке полета.

Величины  $\tilde{P}(\lambda_{1,2})$  зависят как от коэффициентов отражения, так и от дисперсии наклонов исследуемого участка морской поверхности. Таким образом, по величинам  $\tilde{P}(\lambda_1)$  и  $\tilde{P}(\lambda_2)$  можно судить об изменении характера неровностей водной поверхности по трассе полета носителя.

Для принятия решения о наличии нефтяных загрязнений на водной поверхности величины  $N(\lambda_1, \lambda_2)$  и  $\tilde{P}(\lambda_{1,2})$  сравниваются в блоке обработки с некоторым пороговым значением  $K$ . Совместное использование условий  $N(\lambda_1, \lambda_2) > K, \tilde{P}(\lambda_{1,2}) > K$  позволяет с высокой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на водной поверхности.

Таким образом, при полете над исследуемой акваторией алгоритм обнаружения нефтяных загрязнений на основе двухчастотного лазерного метода определяет из данных измерений две величины — одна из которых зависит только от коэффициента отражения границы раздела “воздух–вода”, другая — как от дисперсий наклонов взволнованной морской поверхности, так и от коэффициента отражения границы раздела “воздух–вода”. Совместное использование величин  $N(\lambda_1, \lambda_2)$  и  $\tilde{P}(\lambda_{1,2})$  позволяет отличать нефтяные загрязнения на взволнованной морской поверхности от областей со сглаженным ветровым волнением и областей с высоким коэффициентом отражения.

В принципе существует достаточно много вариантов выбора пар длин волн зондирования  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  для двухчастотного метода (например, 5,9 и 2,86 мкм; 11 и 1,43 мкм; 1,06 и 3,36 мкм; 2,86 и 3,41 мкм и др.). Значения величин  $N(\lambda_1, \lambda_2)$ ,  $\tilde{P}(\lambda_{1,2})$  и пороговой величины  $K$  для различных пар длин волн зондирования будут отличаться друг от друга, но работоспособность двухчастотного метода обнаружения будет сохраняться.

Отметим, что идея использовать двухчастотные лазерные измерения для обнаружения нефтяных загрязнений высказывалась в работах

[7, 8]. Однако эта идея заключалась в обязательном использовании для двухчастотных лазерных измерений длины волны  $\lambda \cong 3,4$  мкм, для которой коэффициент отражения нефти примерно равен коэффициенту отражения воды. Другая длина волны могла быть выбрана в ближнем или среднем инфракрасном диапазонах.

В таблице приведены результаты расчетов для двух пар длин волн зондирования: 11 и 1,43 мкм, 1,06 и 3,36 мкм, иллюстрирующие работу двухчастотного метода обнаружения нефтяных загрязнений водной поверхности. Данные приведены для различных исследуемых участков водной поверхности: нефтяное пятно, слик (область со сглаженным ветровым волнением), пенное образование, участок водной поверхности без нефтяных загрязнений.

**Результаты расчета величин  $N(\lambda_1, \lambda_2)$  и  $\tilde{P}(\lambda_2)$  для различных комбинаций длин волн**

Характер исследуемого участка водной поверхности	Длина волны, мкм			
	11 и 1,43		1,06 и 3,36 мкм	
	$N(\lambda_1, \lambda_2)$	$\tilde{P}(\lambda_2)$	$N(\lambda_1, \lambda_2)$	$\tilde{P}(\lambda_2)$
Нефтяное пятно	2,1	6,7	2,4	2,8
Область со сглаженным ветровым волнением	1	10	1	10
Пенное образование	0,085	11,8	28	1
Участок водной поверхности без нефтяных загрязнений	1	1	1	1

Расчеты величин  $\tilde{P}(\lambda_2)$  и  $N(\lambda_1, \lambda_2)$  проводились по формулам (1)–(6). При расчете использовались следующие значения коэффициентов отражения: чистая водная поверхность  $V_w^2$  — 0,017 (1,06 мкм); 0,017 (1,43 мкм); 0,032 (3,36 мкм); 0,0085 (11 мкм); нефтяная пленка  $V^2$  — 0,038 (1,06 мкм); 0,038 (1,43 мкм); 0,03 (3,36 мкм); 0,04 (11 мкм).

Принималось, что при наличии нефтяных пленок дисперсии наклонов  $\gamma_{x,y}^2$  уменьшаются в 3 раза [9, 10], а для слика (области со сглаженным ветровым волнением) — в 10 раз. Считалось, что при очень большой скорости ветра пятна пены расположены почти параллельно склонам волн, так что можно считать распределение наклонов пятен пены таким же, как и распределение наклонов морских волн [11]. Учитывалось, что наличие пены на морской поверхности в среднем ИК-диапазоне (для длин волн 3,36 и 11 мкм) практически не сказывается на излучательных и отражательных характеристиках моря [12, 13]. Для длин волн 1,06 и 1,43 мкм коэффициенты отражения пены определялись по данным эксперимента [13].

Из таблицы видно, что совместное использование условий  $N(\lambda_1, \lambda_2) > K_1$ ,  $\tilde{P}(\lambda_2) > K_2$  ( $K_{1,2}$  — некоторые пороговые значения) позволяет с высокой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на водной поверхности. При этом совсем необязательно использовать для двухчастотных лазерных измерений длину волны  $\lambda \cong 3,4$  мкм, для которой коэффициент отражения нефти примерно равен коэффициенту отражения воды. Конкретные значения длин волн для двухчастотного лазерного метода обнаружения нефтяных загрязнений (вариантов пар длин волн достаточно много) можно выбрать, ориентируясь на уже имеющуюся (или разрабатываемую) бортовую лазерную аппаратуру (лазерный альтиметр, лазерный локализатор для зондирования атмосферы, лазерный локализатор для измерения параметров морского волнения, скорости приводного ветра и т.п.).

Исследование возможностей и границ применимости двухчастотного лазерного метода обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности проводилось методом математического моделирования.

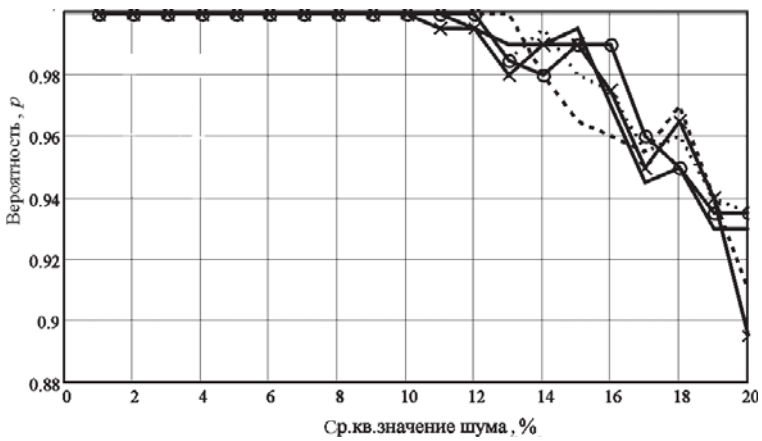
Диапазон изменения параметров для математического моделирования был выбран следующим:

1. Диапазон скоростей приводного ветра 0,1... 7 м/с;
2. Диапазон среднеквадратического относительного значения шума измерения 1... 20 %;
3. Диапазон углов между направлениями скоростей приводного ветра и полета авиационного носителя (на котором установлена лазерная система обнаружения) 0... 180°;
4. Диапазон вариаций величины скорости приводного ветра во время проведения измерений 0...  $\pm 2$  м/с;
5. Диапазон вариаций направления приводного ветра во время проведения измерений 0...  $\pm 0,7$  рад.

На рис. 1... 3 приведены некоторые результаты математического моделирования в зависимости от среднеквадратического относительного значения шума измерения. Вопрос о влиянии шума наиболее актуален при лазерном дистанционном зондировании, так как лидарным системам нередко приходится работать в условиях, когда отношение сигнал/шум составляет порядка 10 и менее [14].

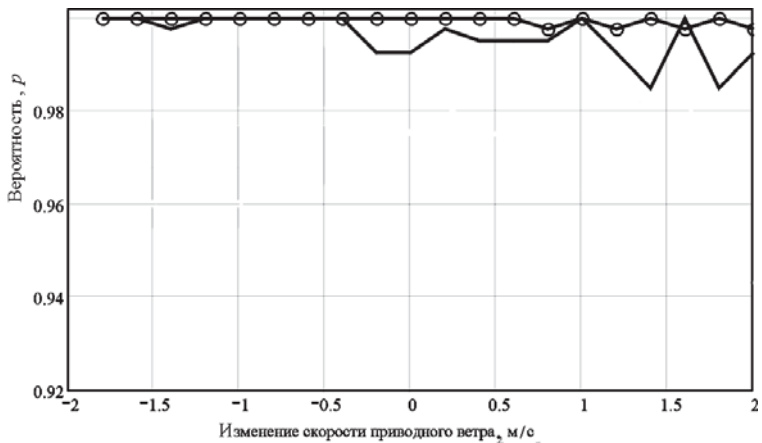
На рис. 1 для пары длин волн зондирования 1,06 и 3,36 мкм показана зависимость вероятности правильного обнаружения от относительного среднеквадратического значения шума измерения при разных значениях скорости приводного ветра.

На рис. 2 и 3 для пары длин волн зондирования 2,86 и 3,41 мкм показаны зависимости вероятности правильного обнаружения от изменения скорости приводного ветра во время проведения измерений



**Рис. 1.** Оценка вероятности правильного обнаружения нефтяной пленки при разных скоростях приводного ветра в зависимости от относительного среднеквадратического значения шума измерения для пары длин волн зондирования 1,06 и 3,36 мкм:

— — 0,1 м/с; ··· — 1 м/с; - - - - 3 м/с; -x-x-x- - 5 м/с; -o-o-o- - 7 м/с



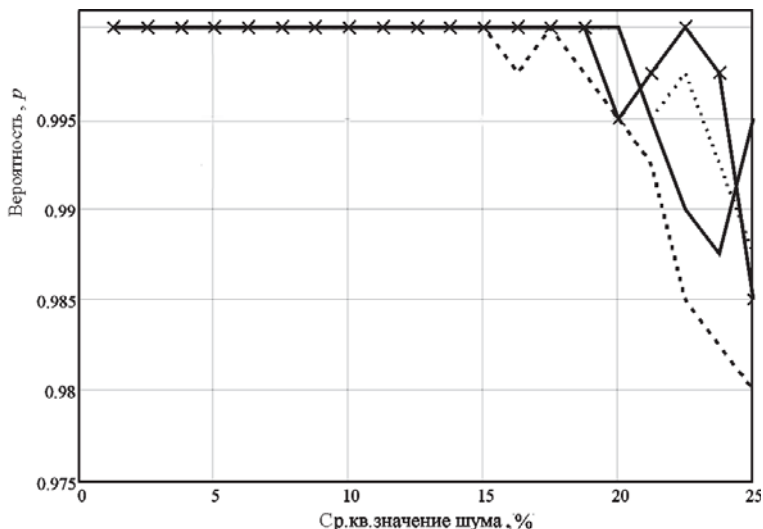
**Рис. 2.** Оценка вероятности правильного обнаружения нефтяной пленки при разных среднеквадратических значениях шума измерения в зависимости от изменения скорости приводного ветра для пары длин волн зондирования 2,86 и 3,41 мкм:

-o-o-o- — 15%; — — 20%

(при разных относительных среднеквадратических значениях шума измерения) и от относительного среднеквадратического значения шума измерения (при разных направлениях приводного ветра).

Графики на рис. 1. . . 3 построены на основе статистического анализа 200 смоделированных реализаций принимаемых лазерных локационных сигналов.

Математическое моделирование показывает, что использование дистанционного двухчастотного лазерного метода для обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности позволяет в широком диа-



**Рис. 3.** Оценка вероятности правильного обнаружения нефтяной пленки при разных направлениях приводного ветра в зависимости от относительного среднеквадратического значения шума измерения для пары длин волн зондирования 2,86 и 3,41 мкм:

—  $\phi = 0^\circ$ ;  $\dots$  —  $\phi = 45^\circ$ ;  $---$  —  $\phi = 90^\circ$ ;  $-x-x-x-$  —  $\phi = 180^\circ$

пазоне скоростей приводного ветра с большой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности.

Таким образом, двухчастотный лазерный метод позволяет отличать “нефтяные загрязнения” от областей со сглаженным ветровым волнением (например, сликом на водной поверхности или ветровой тенью за островом или высоким берегом) и областей с высоким коэффициентом отражения (например, из-за наличия пены на водной поверхности) и с большой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического Центра (проект 2437).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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, В.П. Зверев, А.И. Арбузов и др. – М.: Наука, 2001. – 125 с.
3. Оптико-физические средства исследования океана / Под ред. Е.Г. Пашенко. – Л.: Судостроение, 1984. – 264 с.



4. Г у р е в и ч И. Я., Ш и ф р и н К. С. Отражение видимого и ИК излучения нефтяными пленками на море // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. – Новосибирск: Наука, 1979. – С. 166–176.
5. Б о г о р о д с к и й В. В., К р о п о т к и н М. А. Методы и средства дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений вод. II. Активные методы обнаружения // Водные ресурсы. – 1984. – № 5. – С. 115–124.
6. Б е л о в М. Л., Г о р о д н и ч е в В. А., К о з и н ц е в В. И. О лидарном методе обнаружения нефтяных пленок на морской поверхности // Вестник МГТУ. Сер. “Приборостроение”. – 1996. – № 3. – С. 3–8.
7. Г а р д а ш о в Р. Г., Г у р е в и ч И. Я., Ш и ф р и н К. С. Отражение оптического излучения от взволнованной морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой / Оптика атмосферы и океана. – Баку: ЭЛМ, 1983. – С. 33–44.
8. Г у р е в и ч И. Я. Модельные расчеты яркости и контраста нефтяной пленки на море. Дис... канд. физ.-мат. наук. – М., 1983. – 13 с.
9. С о х С., М u n k W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // J.O.S.A. – 1954. – V. 44. – № 11. – P. 838–850.
10. С о х С., М u n k W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // Scripps. Inst. Oceanography. Bull. – 1956. – V. 6, № 9. – P. 401–488.
11. W a l d L., M o n g e t J. M. Remote sensing of the sea state using the 0,8–1,1 nm spectral band // Int. J. Remote sensing. – 1983. – V. 4, № 2. – P. 433–446.
12. Б ы ч к о в а И. А., В и к т о р о в С. В., В и н о г р а д о в В. В. Дистанционное определение температуры моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 223 с.
13. W h i t l o c k C. H., B a r t l e t t D. S., G u r g a n u s E. A. Sea foam reflectance and influence on optimum wavelength for remote sensing of ocean aerosols // Geophysical Research Letter. – 1982. – V. 9, № 6. – P. 719–722.
14. М е ж е р и с Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.

Статья поступила в редакцию 30.11.2005

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р. техн. наук, зам. директора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b. 1945), graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), deputy director of “Radio-electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р. техн. наук, вед. науч. сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950), graduated from Moscow Energy Institute in 1973. D. Sc. (Eng.), leading researcher of “Radio-electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optics of atmosphere.





Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.A. Gorodnichev (b. 1952), graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1976. Ph. D. (Eng.), head of department of “Radio-electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Ольга Алексеевна Смирнова окончила в 1971 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет более 70 научных работ в области лазерной техники.

O.A. Smirnova graduated from the Bauman Moscow Higher Technical University in 1971. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Radio-electronic Systems and Devices” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of laser technology.

Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет более 20 научных работ в области лазерной техники.

Yu.V. Fedotov (b. 1974), graduated from the Bauman Moscow Higher Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), researcher of “Radio-electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of laser technology.

Анастасия Михайловна Хрусталева родилась в 1976 г., в 1999 г. окончила МГУ им. М.В. Ломоносова, научный сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет две научные работы в области лазерной техники.

A.M. Khroustaleva (b. 1976), graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1999. Researcher of “Radio-electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 2 publications in the field of laser technology.