

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

ДВУХУГЛОВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА НЕРОВНОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ*

Представлен дистанционный лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на неровной морской поверхности, в котором используется дополнительная информация о приводном ветре и специальная двухугловая геометрическая схема для облучения поверхности. Показано, что предложенный метод позволяет одновременно контролировать наличие двух эффектов — сглаживания ветрового волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности — и, тем самым, с высокой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений.

Нефть и продукты ее переработки являются одними из наиболее опасных источников загрязнений речных, озерных и морских акваторий нашей планеты [1–4].

Особенно актуальна проблема загрязнения нефтепродуктами прибрежных зон морей, где наиболее ярко проявляются отрицательные последствия активной хозяйственной деятельности человека.

Загрязнения нефтепродуктами наиболее оперативно обнаруживаются дистанционными методами, позволяющими инспектировать обширные водные поверхности за сравнительно малый промежуток времени. Дистанционные методы позволяют также обнаруживать нефтяные загрязнения на стадии слика (пленки на поверхности воды), т.е. вскоре после разлива. На этой стадии ликвидация нефтяных загрязнений может быть произведена с наименьшими затратами.

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.).

*Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 2437).

Физической основой дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности с использованием метода активного лазерного зондирования является наличие контраста яркости лазерного излучения, отраженного от чистой водной поверхности и поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов. Контраст обусловлен тем, что нефтяная пленка имеет другой коэффициент отражения, нежели граница раздела воздух–вода, и сглаживает морское волнение [5, 6].

Обнаружение нефтяных загрязнений обычно проводят, регистрируя лазерный локационный сигнал, отраженный от морской поверхности, и определяя контраст яркости излучения от чистой морской поверхности и от морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов [7].

Этот метод позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения, однако он имеет недостаток — он может идентифицировать как нефтяные загрязнения участки морской поверхности без пленки нефти, так как область с высокой интенсивностью отраженного излучения (т.е. с большим контрастом на фоне чистой морской поверхности) может являться областью со сглаженным ветровым волнением (слишком на морской поверхности или ветровой тенью за островом или высоким берегом); областью с высоким коэффициентом отражения (коэффициент отражения морской поверхности может изменяться не только из-за нефтяных загрязнений, но и из-за наличия, например, пены на морской поверхности).

Для повышения достоверности обнаружения нефтяных загрязнений необходимо одновременно контролировать наличие двух эффектов — сглаживания ветрового волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности. Это может быть достигнуто использованием дополнительной информации о приводном ветре и специальной двухугловой геометрической схемы для облучения морской поверхности.

Будем считать, что лазерный локаатор для зондирования нефтяных загрязнений морской поверхности установлен на авиационном носителе. Пусть в схеме зондирования морской поверхности используется два узких лазерных пучка: один лазерный пучок направлен вертикально вниз, другой — под углом θ вдоль (или поперек) линии полета (далее рассматривается случай, когда второй луч направлен под углом θ вдоль линии полета). Режим подсвета может быть как непрерывным, так и импульсным. В качестве контролируемых параметров используются мощности эхо-сигналов P_0 , P_x , регистрируемых при отражении от морской поверхности каждого из двух лазерных пучков (P_0 и P_x — мощности эхо-сигнала для лазерных пучков, направленных вертикально вниз и под углом θ вдоль линии полета). При импульсном подсвете

P_0, P_x — мощности сигналов, соответствующие максимумам регистрируемых импульсных локационных сигналов.

Мощности эхо-сигналов P_0, P_x , регистрируемые приемником от взволнованной морской поверхности (при отсутствии пенных образований), в случае импульсного подсвета и гауссовой формы зондирующего импульса

$$f(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{4t^2}{\tau_s^2}\right),$$

где τ_s — длительность зондирующего импульса, для небольших углов локации

$$\theta \ll \frac{\tau_s c}{4}(C_s + C_r)^{1/2}, \quad \theta \ll 1,$$

определяются следующими формулами [8]:

$$P_0 \approx a_1 a_2, \quad P_x \approx a_1 a_2 \exp\left(-\frac{0,5q_x^2}{q_z^2 \gamma_x^2}\right); \quad (1)$$

здесь

$$a_1 = \frac{V^2}{8\pi(\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}};$$

$$a_2 = 0,5a_s a_r c \tau \pi^{1/2} L^{-4} (C_s + C_r)^{-1} \left(\frac{\tau_s^2 c^2}{16} + 2\sigma^2\right)^{-1/2};$$

$q_x = 2 \sin \theta$; $q_z = 2 \cos \theta$; γ_x^2, γ_y^2 — дисперсии наклонов морской поверхности вдоль и поперек линии полета (морская поверхность в общем случае является анизотропной, и дисперсии γ_x^2 и γ_y^2 отличаются друг от друга); θ — угол локации (угол между оптической осью лидара и направлением вертикально вниз); L — расстояние от лидара до морской поверхности; V^2 — коэффициент отражения Френеля для морской поверхности; для прозрачной аэрозольной атмосферы

$$\alpha_s = \frac{P_s \exp(-\tau_a)}{\pi \alpha_s^2}; \quad \alpha_r = r_r^2 \exp(-\tau_a); \quad C_s = (\alpha_s L)^{-2}, \quad C_r = (\alpha_r L)^{-2};$$

$2\alpha_s$ и $2\alpha_r$ — угол расходимости источника излучения и угловое поле зрения приемной системы; P_s — мощность, излучаемая источником; r_r — эффективный размер приемной апертуры; τ_a — оптическая толщина атмосферы между лазерным локатором и морской поверхностью.

Из формулы (1) видно, что в двухугловой схеме дистанционного зондирования имеются две измеряемые величины P_0, P_x и три неизвестных параметра γ_x^2, γ_y^2 и V^2 , величину которых необходимо контролировать для надежного обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности.

Таким образом, без дополнительной априорной информации двух-угловая схема дистанционного зондирования не может быть использована при обнаружении нефтяных загрязнений на неровной морской поверхности.

Априорная информация, которая может быть эффективно использована в рассматриваемой задаче, — это данные о скорости и направлении приводного ветра над исследуемой акваторией. Такая информация легко доступна и достаточно точна (особенно в случае прибрежных районов морей).

Рассмотрим случаи, когда априорная информация представлена в различном виде.

Случай наличия дополнительной информации о скорости и направлении приводного ветра над исследуемой акваторией. Алгоритм обнаружения нефтяных загрязнений в этом случае включает в себя следующие этапы.

1. *Определение величины дисперсии наклонов γ_x^2 вдоль направления полета носителя.* Сигналы P_0, P_x , регистрируемые приемником лазерного локатора в двухугловой схеме зондирования, используются для вычисления следующей величины:

$$\frac{P_x}{P_0} = \exp\left(-\frac{0,5q_x^2}{q_z^2\gamma_x^2}\right). \quad (2)$$

Далее по известной величине P_x/P_0 вычисляется величина дисперсии наклонов γ_x^2 вдоль направления полета носителя.

Для определения дисперсии γ_y^2 необходима информация о скорости и направлении приводного ветра.

2. *Определение связи дисперсий наклонов γ_x^2, γ_y^2 со скоростью и направлением приводного ветра и с наличием нефтяных загрязнений.* Величины γ_x^2, γ_y^2 можно представить в следующем виде [9]:

$$\frac{1}{\gamma_x^2} = \frac{\cos^2\varphi}{\gamma_u^2} + \frac{\sin^2\varphi}{\gamma_\sigma^2}; \quad (3)$$

$$\frac{1}{\gamma_y^2} = \frac{\cos^2\varphi}{\gamma_\sigma^2} + \frac{\sin^2\varphi}{\gamma_u^2}; \quad (4)$$

здесь γ_u^2 и γ_σ^2 — дисперсии наклонов морской поверхности вдоль и поперек направления ветра; φ — угол между осью x (направлением полета носителя) и направлением ветра.

Дисперсии $\gamma_u^2, \gamma_\sigma^2$ зависят от скорости приводного ветра и наличия нефтяных загрязнений на морской поверхности.

В случае отсутствия нефтяных загрязнений на морской поверхности для оценки дисперсий наклонов морской поверхности обычно используют следующие соотношения [10, 11]:

$$\begin{aligned}\gamma_u^2 &= 3,16 \cdot 10^{-3}U, \\ \gamma_\sigma^2 &= 0,003 + 1,92 \cdot 10^{-3}U,\end{aligned}\tag{5}$$

где U — скорость приводного ветра, м/с.

При наличии на морской поверхности нефтяных загрязнений дисперсии наклонов ветрового волнения уменьшаются в 3 раза [11].

Таким образом, для области нефтяного загрязнения имеем

$$\begin{aligned}\gamma_u^2 &= k \cdot 3,16 \cdot 10^{-3}U, \\ \gamma_\sigma^2 &= k(0,003 + 1,92 \cdot 10^{-3}U),\end{aligned}\tag{6}$$

где $k = 1/3$.

3. *Определение величины дисперсии наклонов γ_y^2 поперек направления полета носителя.* Воспользуемся формулой (3) и получим

$$\frac{1}{\gamma_x^2} = \frac{\cos^2\varphi}{\gamma_u^2} + \frac{\sin^2\varphi}{\gamma_\sigma^2}.\tag{7}$$

В этой формуле известна величина γ_x^2 (из экспериментальных данных для двухугловой схемы зондирования) и угол φ (из дополнительной информации). Дисперсии γ_u^2 , γ_σ^2 также можно вычислить, если известна величина скорости U . Однако информация о нефтяных загрязнениях неизвестна. Следовательно, формула (7) содержит один неизвестный параметр — неизвестно, чему равен коэффициент k : $1/3$ (при наличии нефтяных загрязнений), какой-либо другой величине (при наличии других явлений на поверхности, сглаживающих ветровое волнение) или единице (при отсутствии нефтяных загрязнений и других явлений на поверхности, сглаживающих ветровое волнение).

При известной дополнительной информации о скорости и направлении приводного ветра формула (7) позволяет определить коэффициент k , характеризующий сглаживание волнения (по сравнению с волнением морской поверхности без загрязнений):

$$k = \gamma_x^2 \left(\frac{\cos^2\varphi}{3,16 \cdot 10^{-3}U} + \frac{\sin^2\varphi}{0,003 + 1,92 \cdot 10^{-3}U} \right).$$

Теперь, когда известны величины k , U , φ , по формуле (4) можно определить величину дисперсии γ_y^2 для исследуемого участка акватории.

4. Вычисление двух контролируемых параметров, характеризующих исследуемый участок акватории. Значения дисперсий γ_x^2 , γ_y^2 используются для вычисления величин

$$M = (\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{-1/2}, \quad (8)$$

$$N = P_0 M^{-1} = \frac{V^2}{8\pi} a_2. \quad (9)$$

Параметр M содержит информацию только о дисперсии наклонов морской поверхности, а параметр N — только о коэффициенте отражения исследуемого участка морской поверхности. Строго говоря, величина N зависит также от величины σ^2 — дисперсии высот морской поверхности. Однако длительность зондирующего импульса τ_s всегда можно выбрать такой, чтобы выполнялось неравенство $\tau_s^2 c^2 / 16 \gg 2\sigma^2$. В этом случае величина N зависит только от коэффициента отражения исследуемого участка морской поверхности.

5. Измерение контрастов для параметров M , N . При полете над исследуемой акваторией происходит непрерывное измерение параметров M , N и вычисление контрастов $K_N = N/N_w$ (здесь N , N_w — значения величины N соответственно для исследуемого участка морской поверхности и чистой морской поверхности) и $K_M = M/M_w$ (здесь M , M_w — значения величины M для исследуемого участка морской поверхности и чистой морской поверхности).

Графики рис. 1, 2 поясняют работу описанного алгоритма обнаружения нефтяных загрязнений на неровной морской поверхности.

Расчеты контрастов K_M , K_N проводились для длины волны 1,064 мкм. При расчете использовались следующие значения параметров: $V^2 = 0,02$ для чистой морской поверхности, $V^2 = 0,04$ для поверхности с нефтяным загрязнением; $\varphi = 0$; $\tau_s = 10$ нс; $L = 1$ км; $\alpha_s = 1$ мрад; $\alpha_r = 2$ мрад; $\theta = 0,05$ рад.

Было принято, что для нефтяных пленок дисперсии наклонов γ_x^2 , γ_y^2 уменьшаются в 3 раза.

Участки пены считались изотропными (ламбертовскими) отражателями. Распределение наклонов для пятен пены полагалось таким же, как распределение наклонов морских волн. При расчете лазерных сигналов, регистрируемых приемником лидара от неровной морской поверхности, частично покрытой пеной, использовались результаты работы [12]. Для альбедо пены принималось значение $A_f = 1$.

В случае морской поверхности с аномально большим количеством пены для относительного покрытия C_f моря пеной использовалось следующее выражение:

$$C_f = 0,009(U + 10)^3 - 0,3296(U + 10)^2 + 4,549(U + 10) - 21,33.$$

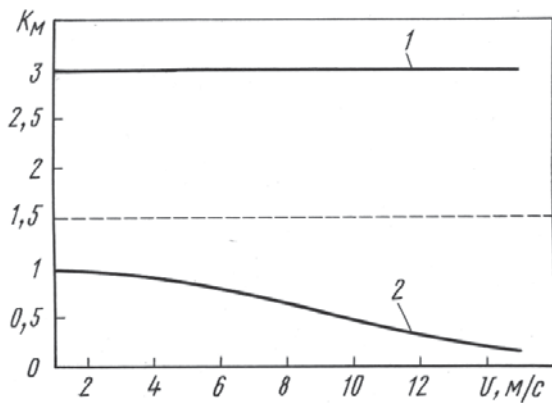


Рис. 1. Зависимость контраста K_M от скорости U приводного ветра:

1 — для яркости излучения морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов, и чистой морской поверхности; 2 — для яркости излучения морской поверхности с аномально большим количеством пены и чистой морской поверхности; штриховая линия — пороговое значение контраста ($K_r = 1,5$)

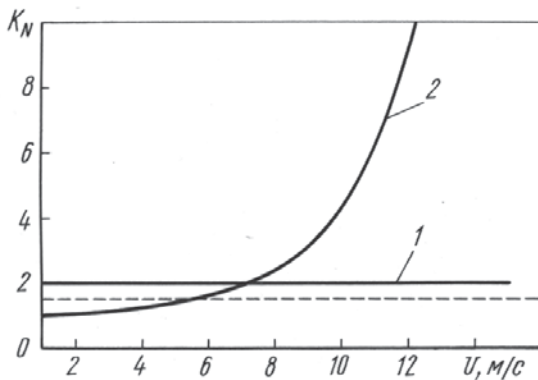


Рис. 2. Зависимость контраста K_N от скорости U приводного ветра:

1 — для яркости излучения морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов, и чистой морской поверхности; 2 — для яркости излучения морской поверхности с аномально большим количеством пены и чистой морской поверхности; штриховая линия — пороговое значение контраста ($K_r = 1,5$)

Из рис. 1, 2 видно, что для участков морской поверхности с нефтяными загрязнениями, на которых происходит как сглаживание ветрового волнения, так и изменение коэффициента отражения морской поверхности, одновременно выполняются оба условия наличия нефтяного загрязнения: $K_N, K_M > K_r$.

Для участков морской поверхности с аномально большим количеством пены, когда сглаживания морского волнения не происходит, контраст K_N оказывается выше порогового значения K_r , а контраст K_M — ниже его. В этом случаях решение об обнаружении нефтяного загрязнения не принимается.

Аналогично, в случае участков со сглаженным морским волнением, когда коэффициент отражения элементарных участков морской поверхности не изменяется, контраст K_M оказывается выше порогового значения K_r , а контраст K_N — ниже его.

Таким образом, лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности, в котором используется дополнительная информация о приводном ветре (направлении и величине скорости приводного ветра) и специальная двухугловая геометрическая схема для облучения морской поверхности, позволяет независимо контролировать наличие двух эффектов — сглаживания ветрового волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности и, тем самым, с высокой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности.

Случай наличия дополнительной информации только о скорости или только о направлении приводного ветра над исследуемой акваторией. Если размеры исследуемой акватории не велики, так что скорость и направление ветра не сильно различаются в разных точках акватории, то этот случай можно свести к рассмотренному выше.

Действительно, при полете над заведомо чистым (без нефтяных загрязнений) участком исследуемой акватории лазерный локатор при двухугловой схеме зондирования регистрирует сигналы P_0 , P_x , которые используются для последовательного вычисления величины P_x/P_0 (см. формулу (2)) и величины дисперсии наклонов γ_x^2 вдоль направления полета носителя для заведомо чистого (без нефтяных загрязнений) участка исследуемой акватории:

$$\gamma_x^2 = 0,5 \frac{q_x^2}{q_z^2} \left(\ln \frac{P_0}{P_x} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Пусть имеется дополнительная информация только о скорости U или только о направлении приводного ветра (угле φ) над исследуемой акваторией. Тогда, если известна дисперсия наклонов γ_x^2 для чистого участка исследуемой акватории, используя формулы (3) и (5), можно определить неизвестный параметр приводного ветра.

Дальнейшие этапы алгоритма совпадают с рассмотренными выше этапами для случая наличия дополнительной информации о скорости и направлении приводного ветра над исследуемой акваторией.

Использование двухлучевого лазерного метода обнаружения нефтяных загрязнений в случае возможности предварительного полета над чистым участком исследуемой акватории. В случае возможности предварительного (перед началом измерений) полета над заведомо чистым (без нефтяных загрязнений) участком исследуемой

акватории двухлучевой метод может быть использован без наличия информации о скорости и направлении приводного ветра. В этом случае та дополнительная информация, которая необходима для работы двухлучевого метода, содержится в результатах предварительных измерений над чистой морской поверхностью.

При полете на некотором прямолинейном участке над заведомо чистой (без нефтяных загрязнений) исследуемой акваторией лазерный локатор при двухугловой схеме зондирования регистрирует сигналы P_0 , P_x , которые используются для последовательного вычисления величины

$$\frac{P_x}{P_0} = \exp\left(-\frac{0,5q_x^2}{q_z^2\gamma_{xw}^2}\right)$$

и величины дисперсии наклонов γ_{xw}^2 вдоль направления полета носителя для заведомо чистого (без нефтяных загрязнений) участка исследуемой акватории:

$$\gamma_{xw}^2 = 0,5 \frac{q_x^2}{q_z^2} \left(\ln \frac{P_0}{P_x}\right)^{-1}.$$

Затем курс носителя следует изменить на 90° и снова провести измерения на прямолинейном участке над заведомо чистой акваторией. Результатом измерений является дисперсия наклонов γ_{yw}^2 поперек первоначального направления полета носителя для чистой акватории.

Таким образом, в результате предварительных измерений будут измерены дисперсии наклонов γ_{xw}^2 и γ_{yw}^2 для чистой (без нефтяных загрязнений) акватории.

Далее проводятся измерения над исследуемой акваторией. При этом направление полета носителя должно обязательно совпадать с одним из двух первоначальных направлений полета над чистой акваторией. В этом случае всегда можно контролировать величину дисперсии наклонов вдоль направления полета в соответствии с алгоритмом измерения величины γ_x^2 (см. формулу (10)) и определять, осталась ли она прежней или изменилась.

При изменении измеренной дисперсии наклонов γ_x^2 на некоторый коэффициент $K' = \gamma_x^2/\gamma_{xw}^2$ алгоритм обработки изменяет на такой же коэффициент K' значение дисперсии наклонов γ_y^2 (измеренное для чистой поверхности и находящееся в памяти).

Далее выполняются этапы 4, 5 алгоритма.

Таким образом, в случае возможности предварительного полета над заведомо чистым (без нефтяных загрязнений) участком исследуемой акватории, двухлучевой метод при применении специальной схемы

проведения измерений может быть использован без наличия информации о скорости и направлении приводного ветра. Такая специальная схема проведения измерений должна включать только взаимно перпендикулярные участки полета.

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. Алешин И. В. Экологический мониторинг Мирового океана. – СПб.: Изд-во СПбГМУ, 1997. – 76 с.
4. Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Панов Г. В. и др. Современное состояние прибрежных экосистем морей Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 9. – С. 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. Пашенко. – Л.: Судостроение, 1984. – 264 с.
8. Белов М. Л., Городничев В. А., Козинцев В. И. О лидарном методе обнаружения нефтяных пленок на морской поверхности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 1996. – № 3. – С. 3–8.
9. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
10. Сох С., Мунк W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun’s glitter // J. of Opt. Soc. of Amer. – 1954. – V. 44. – № 11. – P. 838–850.
11. Сох С., Мунк W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // Scripps. Inst. Oceanography Bull. – 1956. – V. 6. – № 9. – P. 401–488.
12. Белов М. Л., Городничев В. А., Козинцев В. И. О влиянии покрытия моря пеной на мощность лазерного сигнала, принимаемого лидаром при зондировании морской поверхности // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 1. – С. 68–70.

Статья поступила в редакцию 16.09.2004

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Д-р техн. наук, зам. директора НИИ “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 150 научных работ в области квантовой электроники и экологии.

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 150 publications in the field of quantum electronics and ecology.

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ "Радиоэлектроника и лазерная техника" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950) graduated from Moscow Institute for Power Engineering 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 150 publications in the field of the 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 сектора НИИ "Радиоэлектроника и лазерная техника" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 90 научных работ в области лазерной техники.

V.A. Gorodnichev (b. 1952) graduated from Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov in 1976. Ph. D. (Eng.), head of section of "Radio-electronics and Laser Technology" research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 90 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. Автор более 70 научных работ в области лазерной техники.

O.A. Smirnova graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of "Radio Electronic Systems and Devices" department 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 "Радиоэлектроника и лазерная техника" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области лазерной техники.

Yu.V. Fedotov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State 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., окончила в 1999 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Научный сотрудник НИИ "Радиоэлектроника и лазерная техника" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных работ в области лазерной техники.

A.M. Khrustalyova (b. 1976) graduated from Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov 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.

