



УДК 504.064.37

## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ



## LASER TECHNOLOGIES FOR THE CONTROL OF POLLUTANTS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

**Дьяченко В.В.**

Новороссийский политехнический институт (филиал),  
Кубанский государственный технологический университет

**Чартий П.В.**

Новороссийский политехнический институт (филиал),  
Кубанский государственный технологический университет

**Шеманин В.Г.**

Новороссийский политехнический институт (филиал),  
Кубанский государственный технологический университет  
v-v-d@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы использования лазерных технологий в нефтегазовой отрасли и области применения лазерных систем для контроля атмосферы, морских и подземных вод. Предложены варианты создания и использования лидаров для экологического мониторинга, технологического контроля и поисков месторождений углеводородов в различных природных и техногенных условиях. Основное внимание уделено лидару комбинационного рассеяния света для зондирования молекул углеводородов нефти в атмосфере. Показано, что время измерения таким лидаром концентрации исследуемых молекул  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  на расстоянии зондирования до 200 м не превышает 265 мкс. Создание флуоресцентного лидара для мониторинга морской акватории и подземных вод прибрежного района позволит решить проблему загрязнений, как грунтовых вод, так и морской акватории. Построение простейшего распределения концентраций загрязняющих веществ может служить исходными данными для решения обратной задачи по идентификации источников загрязнения. Предлагаемые методы имеют простую аппаратную реализацию и позволяют диагностировать высококонцентрированные потоки взвешенных частиц в атмосфере, а также углеводороды в морских и подземных водах.

**Ключевые слова:** лазер, лидар, углеводороды, оптические характеристики, загрязнение, комбинационное рассеяние, флуоресценция.

**Dyachenko V.V.**

Novorossiysk polytechnic institute of KubGTU

**Charty P.V.**

Novorossiysk polytechnic institute of KubGTU

**Shemanin V.G.**

Novorossiysk polytechnic institute of KubGTU  
v-v-d@mail.ru

**Annotation.** The questions of the laser technologies application in oil and gas industry and the scope of laser systems for the atmosphere, sea and underground waters control are considered in this article. Options of creation and using of the lidar for environmental monitoring, technological control and search of the hydrocarbons fields in various natural and technogenic conditions are offered. The main attention is paid to the Raman lidar for the sensing of the oil hydrocarbon molecules in the atmosphere. It is shown that such a lidar measurement time for the  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  concentration of the studied molecules at the ranging distance up to 200 m doesn't exceed 265 microseconds. Creation of the fluorescent lidar for the sea water and the underground waters of the coastal area monitoring will allow to solve a problem of their pollution. Recording of the pollutants concentration spatial distribution can serve as the basic data for the solution of the inverse problem of the identification of pollution sources. The suggested methods have simple hardware realization and allow to diagnose the high-concentrated flows of the weighed particles and also hydrocarbons in the sea and underground waters.

**Keywords:** Laser, lidar, hydrocarbons, optical characteristics, pollution, Raman scattering, fluorescence, concentration.

### **В**ведение

Лазерные технологии применяются в самых различных областях хозяйственной деятельности и сфера их применения постоянно расширяется, в том числе, и в нефтегазовой отрасли. Примеры использования лазерных методов существуют в поисках месторождений углеводородов, мониторинге объектов их добычи, переработки, транспортировки и хранения в различных странах. Во всех направлениях нефтегазовой отрасли возможно применение лазерных систем различных по виду излучателя (кристаллические, газовые и др.), длине волны, сопряженному использованию нескольких длин волн, применяемых методов (комбинационное рассеяние, дифференциальное поглощение, флуоресценция), условиям размещения (стационарные, передвижные по суше или водоемам, летательные аппараты, космическое базирование, скважины) и тд. Для каждого конкретного случая проектируется свой лидар (лазерная система).



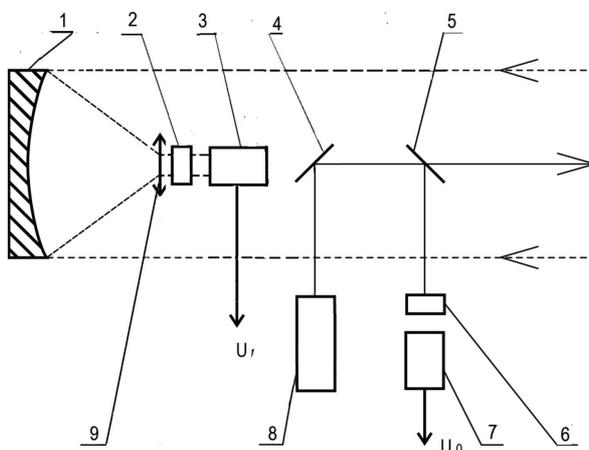
**Актуальность предлагаемых методов**

Использование лазеров дает ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Во-первых, это хорошее пространственно-временное разрешение – очень точное определение места и времени обнаружения заданного объекта, с точностью до мксек и м. Во-вторых, оперативность обнаружения вещества и передачи данных на пульт, фактически в реальном времени. В-третьих, возможность непрерывности наблюдения или мониторинга. В-четвертых, разнообразие арсенала методов, технологий построения и условий размещения приборов. В-пятых, возможность быстрой трансформации алгоритма, проводимых измерений, в соответствии с изменившейся ситуацией. В итоге, все это позволяет построить систему под самые различные объекты, молекулы, химические соединения, жидкости, аэрозоли или сделать комплексный лидар [1–8]. Актуальность лазерных методов определяется и тем, что долговременный характер выпадения различных химических соединений и частиц из атмосферы приводит к изменению химического и гранулометрического состава почв, деградации биогеоценозов а также повышению заболеваемости населения [9–11].

Особенностью лазерных технологий является привязка лидара к химическому составу углеводородов, метеорологическим и геохимическим условиям целевой среды и среды размещения приборов. Поэтому, фактически нет универсальных приборов (или их сложно подобрать и дорабатывать) для всех сочетаний природных и техногенных факторов. К тому же отдельные виды применения требуют использования определенных технологий. Для каждого конкретного нефтегазового поля и ландшафтно-геохимических условий проектируется свой лазерный комплекс, требующий проведения предварительных исследований с целью определения оптических характеристик объекта мониторинга и конкретных параметров системы. В данной работе рассмотрены различные варианты применения лазерных технологий в области нефте-газодобычи.

**Лидар комбинационного рассеяния света для зондирования молекул углеводородов нефти в атмосфере**

Основная среда, подвергающаяся загрязнению в нефтегазовой отрасли это атмосфера. При зондировании молекул углеводородов в атмосфере наиболее целесообразным является применение лидара комбинационного рассеяния света. Уровень концентрации молекул углеводородов в виде газовой фазы, которые могут измеряться таким лидаром, составляет единицы ПДК (для атмосферного воздуха). Рассмотрим оптическую схему лидара комбинационного рассеяния света [12] (рис. 1).



**Рисунок 1** – Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света:

- 1 – сферическое зеркало; 2, 6 – интерференционные светофильтры; 3, 7 – фотоприемники; 4 – зеркало с R~1;
- 5 – стеклянная пластина; 8 – лазер; 9 – объектив

В этой схеме оптическая ось приемного телескопа направлена вдоль лазерного луча. Для зондирования лидаром комбинационного рассеяния света молекул углеводородов в атмосфере необходимо знание дифференциальных сечений комбинационного рассеяния света этими молекулами на заданной длине волны лазерного излучения. Для этого нами выполнен калибровочный эксперимент (как и в [13]) и было измерено дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света в специальной кювете, по зависимости от расстояния в направлении назад.

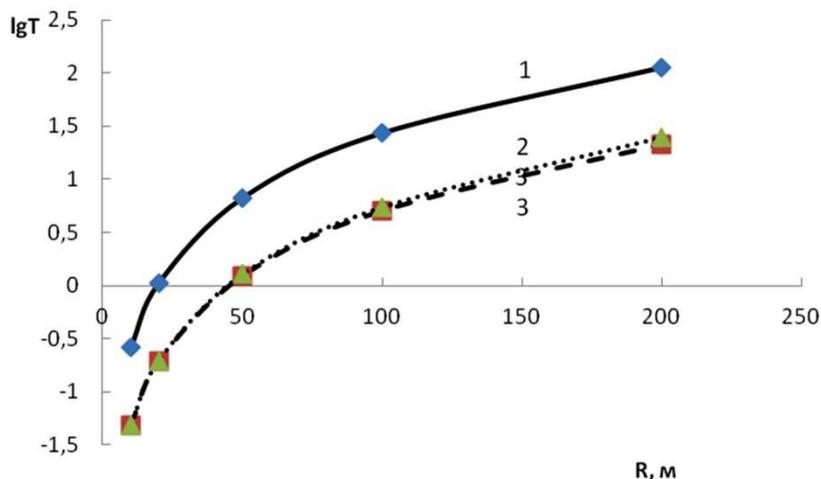
Процедура калибровки состояла из измерения мощности комбинационного рассеяния молекул азота на длине волны 607 нм. Используя параметры нашего лидара для длины волны 607 нм, по лидарному уравнению [7] было рассчитано значение дифференциального сечения комбинационного рассеяния света молекулами азота при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм и его среднее значение было равно  $(d\sigma/d\Omega) = (5,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-31} \text{ см}^2/\text{ср}$ . Это значение с учетом зависимости от длины волны возбуждения хорошо согласуется с данными для длины волны 337,1 нм в [14],



где для молекулы азота приведено значение  $3,5 \cdot 10^{-30}$  см<sup>2</sup>/ср. Наше расчетное значение для длины волны 337 нм равно  $3,2 \cdot 10^{-30}$  см<sup>2</sup>/ср.

Затем было измерено значение дифференциального сечения комбинационного рассеяния света молекулами углеводородов. Его среднее значение равно  $(15,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-30}$  см<sup>2</sup>/ср, которое с учетом зависимости от длины волны лазерного излучения хорошо соответствует значению  $93,5 \cdot 10^{-30}$  см<sup>2</sup>/ср для молекулы бутана и длины волны 337,1 нм из [14]. Пересчет нашего значения дифференциального сечения комбинационного рассеяния света молекулами изобутана для длины волны лазерного излучения 337,1 нм дает величину  $93,8 \cdot 10^{-30}$  см<sup>2</sup>/ср.

Рассмотрим численное решение лидарного уравнения [7] с шагом 7,5 м. Для нашей экспериментальной ситуации возьмем концентрацию молекул водорода  $N(z) = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, так как ПДК этих молекул в атмосферном воздухе равно  $2,1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Импульсы излучения второй гармоники YAG-Nd лазера на длине волны 532 нм имеют длительность 10 нс и энергию 10 мДж. Длины волн линии генерации лазера и линии комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами равны, соответственно,  $\lambda_0 = 532$  нм и  $\lambda_R = 629$  нм. Возьмем значения коэффициентов ослабления для этих длин волн  $\alpha(v_0, r)$  и  $\alpha(v_R, r)$  из [7], равными 0,17 и 0,16 км<sup>-1</sup> и выполним численное решение лидарного уравнения для трех длин волн – 532, 355 и 266 нм и диапазона расстояния зондирования от 10 м до 200 м. Результаты решения, представленные на рисунке 2 показывают, что такую концентрацию исследуемых молекул лидар может зарегистрировать на длине волны 355 нм в среднем в 10 раз быстрее, чем на длине волны лазерного излучения 532 нм.



**Рисунок 2** – Рассчитанная по лидарному уравнению логарифмическая зависимость времени измерения T (в мс) от расстояния зондирования R (в м) для трех значений длин волн лазеров 532 (1), 355 (3) и 266 (2)

Анализ полученных результатов показывает, что время измерения таким вариантом лидара комбинационного рассеяния света (для уровня концентрации исследуемых молекул углеводородов  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>) на длине волны лазерного излучения 355 нм и расстоянии зондирования до 200 м лежит в диапазоне 265 мкс ... 25 мс. Поэтому регистрация концентрации исследуемых молекул углеводородов возможна на уровне ПДК. Лидар подобного типа может быть использован и для мониторинга объектов, находящихся в слое воды до 100 м с пространственным разрешением до 5 м. До глубины 100 м могут обследоваться дно и придонные объекты.

### Лазерная система для зондирования загрязнения акваторий углеводородами методом флуоресценции

Самую большую антропогенную нагрузку испытывает прибрежная часть морской акватории. Основными загрязняющими веществами выступают взвешенные частицы и углеводороды как из нефтепродуктов, так и из сточных вод. Для снижения интенсивности загрязнения необходим непрерывный контроль, как самих источников загрязняющих веществ, так и их распределения в воде. В настоящее время такой контроль осуществляется эпизодически, в случае возникновения неблагоприятной ситуации, но не в реальное время, с использованием флуориметров различных типов [14].

Применение в качестве источника излучения импульсного лазера ультрафиолетового диапазона позволит повысить временное и пространственное разрешение флуориметра, а также увеличить точность измерений за счет высокой мощности лазерного излучения. С этой целью может быть использована лазерная система с двумя каналами регистрации – упругого рассеяния Ми на взвешенных частицах и флуоресценции на молекулах углеводородов. Они различаются длинами волн лазерного излучения, используемого для зондирования. Для регистрации рассеяния Ми используется вторая гармоника АИГ-Nd лазера



на длине волны 532 нм с длительностью импульса 10 нс и энергией в импульсе до 20 мДж. Это позволяет получить пространственное разрешение не менее 3 м вдоль направления зондирования, до глубины 70 м. Амплитуда сигнала рассеяния будет прямо пропорциональна концентрации взвешенных частиц в измерительном объеме, который образуется из части цилиндра с диаметром равном диаметру поля зрения приемного телескопа (в нашем случае это 400 мм) с длиной не менее 1,5 м. Рассеянное излучение собирается этим телескопом через интерференционный светофильтр на фотоприемник типа ФЭУ-79, сигнал с которого вводится в электронный осциллограф на основе персонального компьютера для дальнейшей обработки.

**Комплекс аппаратных средств для регистрации и обработки импульсных оптических сигналов работает под управлением программы ЛИДАР-ФЛУО.** Это программное обеспечение позволяет определить распределение взвешенных частиц и молекул углеводородов в воде вдоль лазерного луча с шагом 3 м и получить карту загрязнения контролируемой акватории на заданных глубинах.

Для проведения исследований лазерная система устанавливается на катере, который курсируя по акватории, измеряет концентрацию взвешенных частиц и молекул углеводородов, фиксируя метеопараметры, скорость катера и скорость течения. Вся эта информация необходима для построения пространственного распределения концентраций и может служить исходными данными для решения обратной задачи по идентификации места, источников загрязнения и выработке рекомендаций по их ликвидации.

Таким образом, исследования с помощью предложенных лазерных систем позволят определить реальную обстановку в акватории и выработать стратегию по очистке сточных вод и ливневых коллекторов, а также детектировать «бледные» источники поступления углеводородов в случае, когда нет пленки, а только водоземulsionные загрязнения.

#### **Флуоресцентная система мониторинга загрязнения грунтовых вод углеводородами**

Проблема загрязнения грунтовых и, в целом, подземных вод представляет собой сложную научную и практическую задачу, требующую своего решения. Это со всей очевидностью демонстрируют примеры городов Ейска, Новороссийска и др. Техногенез приводит к значительному и, как правило, неконтролируемому поступлению загрязняющих веществ (ЗВ) в подземные воды. Одним из наиболее распространенных ЗВ являются нефтепродукты. При добыче углеводородов в прибрежной части морских портов создаются нефтехранилища и нефтеналивные терминалы. Их негерметичность может приводить к проникновению нефтепродуктов в грунтовые воды и далее в поверхностные водные объекты. Поэтому необходимо оперативно контролировать концентрацию углеводородов в скважинах. Для этого требуется выбор оптимального метода измерения их концентрации в реальном времени по всей глубине скважины.

В настоящее время пробы воды отбираются из скважин эпизодически, с заданной глубины для проведения их анализа в лабораторных условиях. С этой целью используются приборы АН-2, КН-1, КН-2, построенные на основе метода ИК-спектроскопии или прибор Флюорат-002 на основе люминесцентного метода анализа. В итоге, время получения результатов анализов значительно отделено от времени забора пробы и не охватывает всю толщу воды. Это лишает оперативности систему мониторинга подземных вод. Нами проработано использование погружного флуориметра, построенного на основе описанных выше моделей. Такой флуориметр состоит из двух модулей – оптического и электронного. Оптический включает в себя источник излучения – светодиод на 405 нм и приемный объектив диаметром 40 мм, который фокусирует свечение флуоресценции молекул углеводородов в одномодовый световод длиной до 12 м. Этот модуль и будет погружаться в воду. На другом конце световода находится фотоприемник типа ФЭУ-79, с выхода которого сигнал записывается в электронный осциллограф на основе персонального компьютера.

Для повышения оперативности обнаружения утечек, во все емкости и в другие потенциальные источники загрязнения вносятся различные флуоресцентные маркеры, которые могут определяться в наблюдательных скважинах с помощью флуориметра. По типу флуоресцентного маркера выявленного в подземных водах, определяем протекающую емкость, потребность и схему расположения технологических скважин для откачки воды до полного устранения подземного загрязнения. В наиболее ответственных местах возможна постановка флуориметрического сигнализатора подобного типа для мониторинга углеводородов в воде с целью своевременного обнаружения утечки нефтепродуктов из технологического оборудования и ее устранения.

В результате внедрения такой системы мониторинга будет сразу определяться утечка загрязненных вод, концентрация углеводородов и их объем, что практически исключит поступление углеводородов за пределы контролируемой территории и сделано это будет самым экономичным способом.

#### **Заключение**

Предложенные лазерные системы можно использовать при производственном экологическом мониторинге для определения углеводородов в атмосфере, поверхностных и подземных водах. Соответствующие приборы могут иметь стационарное, судовое или воздушное базирование (на квадрокоптерах). Последний вариант более оптимален, ввиду оперативности, скорости передвижения и дешевизны. При этом, можно контролировать не только загрязнение на поверхности, но и в толще воды и даже выявлять газовые эманаии со дна или объектов подводной нефтегазовой инфраструктуры.

**Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-42-230004 и 19-45-230009****Литература:**

1. Privalov V.E., Shemanin V.G. Lidars for control and measurement // Proceedings SPIE. – 1998. – V. 3345. – P. 6–10.
2. Воронина Э.И., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Лидарная система определения аварийных выбросов углеводородов в атмосферу // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 9. – С. 30–33.
3. Дьяченко В.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Исследование дисперсного состава приземного атмосферного аэрозоля оптическими методами // ЛАЗЕР-ИНФОРМ. – 2005. – № 18.
4. Контроль аэрозолей в приземном слое атмосферы в реальном времени / В.В. Дьяченко [и др.] // Безопасность в техносфере. – 2008. – № 3. – С. 36–43.
5. Дьяченко В.В., Шеманин В.Г. 50 лет лазерной эры: лидары для мониторинга атмосферы // Безопасность в техносфере. – 2010. – № 6. – С. 28–36.
6. Васильев А.О., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Мониторинг выбросов углеводородов при хранении и транспортировке нефти и нефтепродуктов // Безопасность в техносфере. – 2011. – № 5. – С. 3–7.
7. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы : учебное пособие. – СПб. : Издательство «Лань», 2013. – 288 с.
8. Дьяченко В.В., Роговский В.В., Чартий П.В. Контроль экологической безопасности пылегазоочистных установок модифицированным методом спектральной прозрачности // Безопасность в техносфере. – 2014. – № 4. – С. 17–22.
9. Мalykhin Ю.А., Дьяченко В.В. Геоэкологические аспекты безопасности жизнедеятельности населения в городах Краснодарского края и Ростовской области // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 9. – С. 13–20.
10. Мalykhina Ю.А., Мalykhina А.Г., Дьяченко В.В. Медико-экологические исследования урбанизированных территорий // Безопасность в техносфере. – 2008. – № 3. – С. 16–21.
11. Дьяченко В.В., Дьяченко Л.Г., Мalykhin Ю.А. Проблемы загрязнения ландшафтов Краснодарского края и здоровье населения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2014. – № 07 (101). – IDA [articleID]: 1011407080. <http://ej.kubagro.ru/2014/07/pdf/80.pdf>.
12. Веденин Е.И., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Устройство для контроля параметров аэрозольных потоков // Патент РФ на полезную модель № 159104 G01N 15/02 от 27.01.2016 г. Бюл. № 3
13. Privalov V.E., Shemanin V.G. Detecting Molecules of Hydrogen Sulfide in the Atmosphere by a Raman Light-Scattering Lidar from Space // Optics and Spectroscopy. – 2017. – Vol. 123. – № 6. – P. 950–954.
14. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М. : Мир, 1987. – 550 с.

**References:**

1. Privalov V.E., Shemanin V.G. Lidars for control and measurement // Proceedings SPIE. – 1998. – V. 3345. – P. 6–10.
2. Voronina E.I., Privalov V.E., Shemanin V.G. Lidar system for determination of the emergency hydrocarbon emissions into atmosphere // Life safety. – 2003. – № 9. – P. 30–33.
3. Diachenko V.V., Charty P.V., Shemanin V.G. Research of the disperse composition of the surface atmospheric aerosol by optical methods // LASER-INFORM. – 2005. – № 18.
4. Control of the aerosols in the surface atmospheric layer in real time / V.V. Diachenko [et al.] // Safety in technosphere. – 2008. – № 3. – P. 36–43.
5. Diachenko V.V., Shemanin V.G. 50 years of the laser era: lidars for atmosphere monitoring // Proc. of the Technosphere. – 2010. – № 6. – P. 28–36.
6. Vasilev A.O., Charty P.V., Shemanin V.G. Monitoring of the hydrocarbons emissions at storage and transportation of oil and oil products // MPEI Nezavisimost Technosphere. – 2011. – № 5. – P. 3–7.
7. Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. Lasers and ecological monitoring of atmosphere : a training manual. – St. Petersburg : «Lan» Publishing House, 2013. – 288 p.
8. Diachenko V.V., Rogovsky V.V., Charty P.V. Ecological safety control of the dust-and-gas purification installations by the modified method of the spectral transparency // MPEI Vezopasnost in technosphere. – 2014. – № 4. – P. 17–22.
9. Malykhin Yu.A., Diachenko V.V. Geoecological aspects of life safety in cities of Krasnodar region and Rostov region // Life safety. – 2003. – № 9. – P. 13–20.
10. Malykhina Yu.A., Malykhina A.G., Diachenko V.V. Mediko-ecological research of the urbanized territories // Security in technosphere. – 2008. – № 3. – P. 16–21.
11. Diachenko V.V., Diachenko L.G., Malykhin Yu.A. Problems of the Krasnodar Territory landscape pollution and the population health // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban state agrarian university [Electron resource]. – Krasnodar : Kuban State Agrarian University, 2014. – № 07 (101). – IDA [articleID]: 1011407080. <http://ej.kubagro.ru/2014/07/pdf/80.pdf>.
12. Vedenin E.I., Charty P.V., Shemanin V.G. Device for the aerosol flow parameters control // Russian Federation patent for useful model № 159104 G01N 15/02 of 27.01.2016. Bulletin № 3
13. Privalov V.E., Shemanin V.G. Detecting Molecules of Hydrogen Sulfide in the Atmosphere by a Raman Light-Scattering Lidar from Space // Optics and Spectroscopy. – 2017. – Vol. 123. – № 6. – P. 950–954.
14. Mezheris R. Laser remote sensing. – M. : Mir, 1987. – 550 p.