

ЛАЗЕРНЫЕ ГИДРОФОНЫ

Лазерный адаптивный голографический гидрофон

Р.В.Ромашко, Ю.Н.Кульчин, М.Н.Безрук, С.А.Ермолаев

Предложен и исследован новый тип лазерного гидрофона на основе динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивном кристалле. Показано, что применение динамических голограмм позволяет избежать необходимости использования сложных оптических схем и систем электронной стабилизации рабочей точки интерферометра. Это существенно упрощает схему лазерного гидрофона при сохранении его высокой чувствительности, что открывает перспективы его применения при сильно изменяющихся параметрах окружающей среды. Реализованный в настоящей работе лазерный адаптивный голографический гидрофон обладает чувствительностью на уровне 3.3 мВ/Па в частотном диапазоне 1–30 кГц.

Ключевые слова: лазерный гидрофон, адаптивный интерферометр, динамическая голограмма.

Развитие систем мониторинга водных акваторий и Мирового океана неразрывно связано с созданием технических средств регистрации гидроакустических сигналов, основу которых до недавнего времени составляли пьезоэлектрические преобразователи [1]. Вместе с тем в последнее время оптические приемники акустических сигналов привлекают пристальное внимание исследователей, поскольку они обладают рядом существенных преимуществ перед электрическими аналогами – нечувствительностью к электромагнитным помехам и коррозии, низким удельным весом, малыми размерами и др. Среди оптических сенсоров особый класс составляют лазерные интерферометрические гидрофоны, которые потенциально позволяют измерять чрезвычайно слабые гидроакустические возмущения – с акустическим давлением менее 1 Па в широкой полосе частот и менее 0.1 Па в узкой [2–6]. В качестве чувствительных элементов таких гидрофонов обычно используются волоконно-оптические сенсоры [2–8] или резонансные элементы в виде упругих мембран [9–11]. Вместе с тем при эксплуатации лазерных гидрофонов в реальных условиях случайные механические воздействия, дрейф температуры, вариации статического давления окружающей среды и ряд других причин приводят к дрейфу рабочей точки интерферометра и, как следствие, к ухудшению отношения сигнал/шум и снижению чувствительности измерительной системы. Это обуславливает необходимость использования в лазерных гидрофонах специальных средств стабилизации рабочей точки. В качестве таких средств часто используют дополнительные компенсационные интерферометры [12], методы ак-

тивного и пассивного контроля фазы [9–11, 13, 14], методы оптической обратной связи по интенсивности [15] или частоте генерации лазера [16, 17], методы, основанные на использовании перестраиваемых дифракционных решеток [18] и нескольких длин волн излучения с последующим спектральным анализом [19], а также ряд других. К сожалению, применение всех отмеченных средств стабилизации рабочей точки интерферометров неизбежно приводит к существенному усложнению их конструкций, что негативно сказывается на надежности и стабильности работы измерительной системы в целом.

Как было показано в [20], использование в лазерных интерферометрах динамических голографических решеток, формируемых в фоторефрактивных кристаллах (ФРК), позволяет достаточно просто и эффективно решить проблему стабилизации рабочей точки измерительных лазерных интерферометров. Адаптивность к неконтролируемым внешним воздействиям в таких системах основана на том, что постоянная перезапись динамических голограмм в ФРК позволяет интерферометру автоматически подстраиваться под изменение внешних условий, обеспечивая тем самым стабильность его характеристик.

Цель настоящей работы – изучение возможности использования адаптивного голографического интерферометра на основе динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивном кристалле, для стабилизации рабочих характеристик лазерного гидрофона.

Схема лазерного адаптивного голографического гидрофона (ЛАГГ) представлена на рис.1. Сенсорная часть ЛАГГ имеет прочный герметичный корпус, в одну из стенок которого встроена тонкая (50 мкм) круглая ($\varnothing 40$ мм) полированная мембрана из латуни, выполняющая роль чувствительного элемента гидрофона. Оптическая часть сенсора реализована следующим образом. Излучение Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1.06$ мкм, выходная мощность 0.5 Вт) проходит через светоделитель и вводится в многомодовый волоконный световод (диаметр сердцевины 62.5 мкм, числовая апертура $NA = 0.22$), с выхода которого направляется на мембрану. Выходной торец волоконного световода расположен на расстоянии 0.5 мм от мембраны. Отразившееся от мембраны излучение возвраща-

Р.В.Ромашко, Ю.Н.Кульчин. Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690091 Владивосток, ул. Суханова, 8; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: romashko@iacp.dvo.ru, kulchin@iacp.dvo.ru

М.Н.Безрук, С.А.Ермолаев. Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: bezmisha@list.ru, nekker2@gmail.com

Поступила в редакцию 29 ноября 2015 г., после доработки – 1 февраля 2016 г.

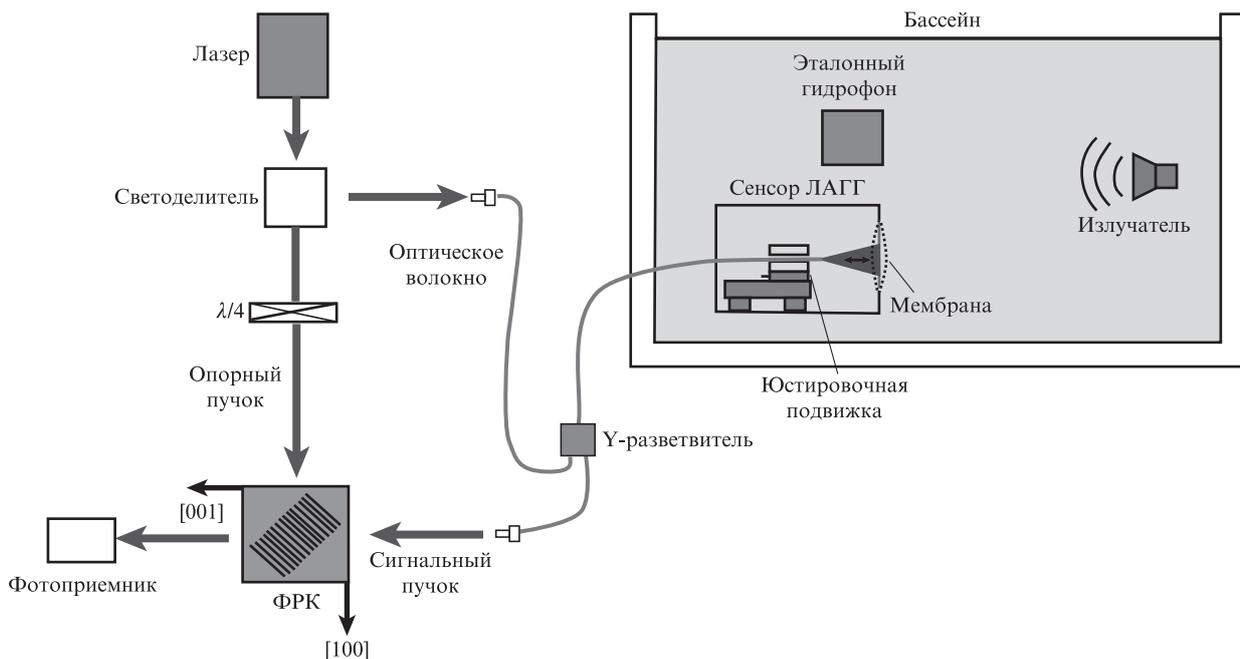


Рис.1. Схема лазерного адаптивного голографического гидрофона.

ется обратно в световод, формируя сигнальную волну. Механические колебания мембраны, вызванные воздействием акустической волны, приводят к модуляции фазы сигнальной волны. Отведенное через Y-разветвитель излучение сигнальной волны (интенсивность $I = 0.8 \text{ мВт/мм}^2$) направляется в ФРК вдоль его кристаллографической оси [001]. Эллиптически поляризованная после прохождения четвертьволновой пластинки опорная волна ($I = 50 \text{ мВт/мм}^2$) входит в кристалл в ортогональном к сигнальной волне направлении – вдоль кристаллографической оси [100]. Интерференция сигнальной и опорной волн в ФРК вследствие фоторефрактивного эффекта приводит к записи динамической голограммы в кристалле, вектор решетки которой направлен вдоль кристаллографической оси [101]. Векторное взаимодействие эллиптически поляризованной опорной волны с деполаризованной (после прохождения через многомодовый волоконный световод) сигнальной волной в такой ортогональной геометрии в ФРК кубической симметрии обеспечивает выполнение квадратурных условий интерферометра, вследствие чего достигается его высокая чувствительность [21, 22]. Взаимодействие волн на сформированной ими же динамической голограмме обеспечивает точное сопряжение волновых фронтов и максимально эффективное преобразование модуляции фазы сигнальной волны, вызванной колебаниями мембраны, в изменения интенсивности, регистрируемые фотоприемником.

Следует отметить, что оптимальным соотношением интенсивностей интерферирующих пучков является такое, при котором контраст интерференционной картины не превышает 0.5. При больших контрастах (например, при равных интенсивностях пучков) голографическая решетка начинает искажаться, ее профиль становится отличным от синусоидального, что ведет к снижению эффективности взаимодействия пучков из-за дифракции их излучения на решетках более высоких пространственных порядков [23]. При снижении контраста интерференционной картины уровень сигнала фазовой демодуляции выходит на максимум, а затем плавно снижается из-за уменьшения эффективности записи голограммы [24, 25].

При использованных в настоящей работе интенсивностях контраст интерференционной картины составил 0.25. Несмотря на сравнительно низкую дифракционную эффективность динамической голограммы (менее 0.1%), адаптивный интерферометр, как будет показано ниже, обеспечил высокую чувствительность к детектированию модуляции фазы.

Следует отметить, что время записи динамической голограммы в кристалле, а также ее время жизни после выключения или изменения интерференционного поля конечны [23]. При медленных изменениях интерференционного поля, вызванных, например, дрейфом параметров окружающей среды за времена большие, чем время записи/жизни голограммы, происходит ее полная перезапись, что определяет адаптивные свойства интерферометра и, соответственно, гидрофона. Время записи голограммы в кристалле CdTe при интенсивности $\sim 50 \text{ мВт/мм}^2$ составило 1.2 мс, что делает ЛАГГ способным автоматически подстраиваться под все шумовые воздействия с характерными частотами в области менее 800 Гц.

Экспериментальные исследования ЛАГГ проводились в бассейне со стенками из звукопоглощающего материала. Для контроля акустического давления в непосредственной близости к мембране ЛАГГ помещался калиброванный эталонный пьезоэлектрический гидрофон ZETLab BC311. Акустическое давление в бассейне создавалось пьезоэлектрическим излучателем ЛУЗ.837.9, который находился на одной глубине с лазерным и эталонным гидрофонами на равном расстоянии от них (20 см).

В работе экспериментально измерена амплитудно-частотная характеристика ЛАГГ. Для этого на акустический излучатель подавался электрический импульс длительностью 5 мкс с амплитудой 2 В. На рис.2,а представлены формы акустических импульсов, зарегистрированных с помощью ЛАГГ и эталонного гидрофона. Фурье-анализ этих сигналов с учетом чувствительности эталонного гидрофона (56 мкВ/Па) позволил определить амплитудно-частотную характеристику ЛАГГ (рис.2,б). Видно, что ЛАГГ имеет равномерную чувствительность в достаточно широком (1–30 кГц) частотном диапазоне.

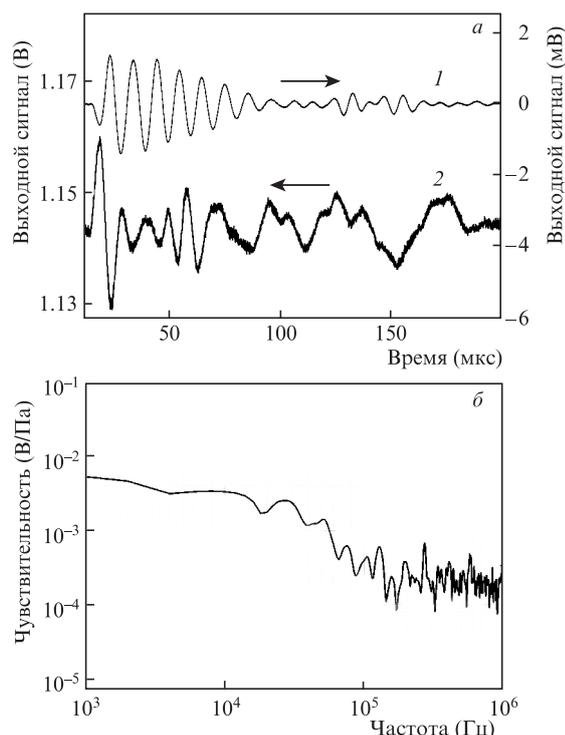


Рис.2. Акустический импульс, зарегистрированный с помощью эталонного гидрофона (1) и ЛАГГ (2) (а) и амплитудно-частотная характеристика лазерного адаптивного гидрофона (б).

На более высоких частотах (0.1–1 МГц) чувствительность ЛАГГ снижается на порядок. На рис.3 приведена переходная характеристика ЛАГГ, измеренная на частоте 10.5 кГц – в области наибольшей его чувствительности. Экспериментально измеренная чувствительность ЛАГГ на линейном участке переходной характеристики составляет 3.3 мВ/Па.

Отметим, что общая чувствительность ЛАГГ к акустическому давлению (В/Па) определяется характеристиками всех преобразующих элементов и может быть представлена следующим выражением:

$$S_{\Sigma} = S_1 S_2 S_3, \quad (1)$$

где S_1 (рад/Па) – чувствительность мембраны; S_2 (Вт/рад) – чувствительность адаптивного интерферометра и S_3 (В/Вт) – чувствительность фотодетектора. Чувствительность используемого в работе фотоприемника Thorlabs PDA10CS S_3 составила 5×10^5 В/Вт. Чувствительность адаптивного

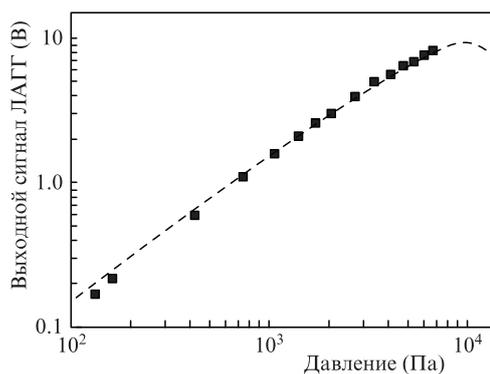


Рис.3. Переходная характеристика лазерного адаптивного гидрофона на частоте 10.5 кГц (точки – эксперимент, штриховая кривая – расчет).

интерферометра S_2 определялась по методике [26] и составила 0.18 мВт/рад.

Рассчитанная с использованием выражения (1) калибровочная зависимость ЛАГГ показана на рис.3 штриховой кривой. Видно, что при большом акустическом давлении переходная характеристика ЛАГГ имеет нелинейный участок, ограничивающий динамический диапазон. С учетом данных, представленных на рис.3, а также уровня собственных шумов измерительной системы было установлено, что ЛАГГ обеспечивает измерение акустического давления в динамическом диапазоне 36 дБ, при этом минимальное детектируемое акустическое давление составляет 130 Па.

Принципиально важным элементом конструкции ЛАГГ является мембрана, воспринимающая давление акустической волны. Поскольку мембрана представляет собой первичный акустический приемник, она главным образом и определяет чувствительность лазерного гидрофона. С использованием выражения (1) и переходной характеристики, представленной на рис.3, было установлено, что чувствительность используемой в ЛАГГ мембраны S_1 равна 0.37 мрад/Па.

Параметры разработанного нами ЛАГГ и существующих аналогов представлено в табл.1. Видно, что чувствительность S_1 первичного приемника ЛАГГ – мембраны – не является рекордно высокой. Повысить S_1 и, как следствие, общую чувствительность ЛАГГ можно путем соответствующего подбора материала, а также площади и толщины мембраны, определяющих ее жесткость. Альтернативный путь – использование первичных приемников других типов. Так, при использовании в схеме ЛАГГ в качестве первичного акустического приемника, анало-

Табл.1. Параметры гидрофонов.

Гидрофон	Чувствительность первичного преобразователя S_1 (мрад/Па)	Общая чувствительность S_{Σ} (мВ/Па)	Минимальное детектируемое давление (Па)	Частотный диапазон (кГц)
[5]	1.1	11.0	1.3	100–300
[6]	143	0.1	–	5–20
[7]	500	–	5	5–300
[8]	7.5×10^{-5}	5.8×10^{-4}	1.5×10^4	20000
[9]	–	–	0.013	0.3
[27]	20	–	–	3–8
Пьезоэлектрический ZETLab BC311	–	0.056	100	0.003–100
ЛАГГ (настоящая работа)	0.37	3.3	130	1–30
ЛАГГ (в перспективе)	500	4400	0.09	5–300

гичного представленному в работе [7] и обеспечивающего акустическую чувствительность на уровне 0.5 рад/Па, общая чувствительность ЛАГГ S_{Σ} составит 4.4 В/Па, что намного превышает чувствительность как гидрофона, предложенного в работе [7], так и большинства других аналогов. При этом важно отметить, что, в отличие от других гидрофонов, ЛАГГ обладает предельно простой оптической схемой, которая обеспечивает, в том числе, и адаптивность его работы.

Дополнительно отметим, что входящая в выражение (1) чувствительность адаптивного интерферометра S_2 определяется дифракционной эффективностью голографической решетки, которая в ортогональной геометрии взаимодействия опорной и сигнальной волн в ФРК не является максимальной. Максимальная дифракционная эффективность динамической голограммы будет достигаться в отражательной геометрии, когда взаимодействующие волны распространяются в кристалле навстречу друг другу [21]. Использование отражательной геометрии позволит дополнительно повысить чувствительность адаптивного интерферометра и, как следствие, общую чувствительность ЛАГГ в $\sqrt{2}$ раз [28].

В работе выполнено исследование стабильности рабочих характеристик ЛАГГ при изменении температуры – одного из наиболее критичных параметров для систем на основе интерферометрических схем. С этой целью в течение 24 ч измерялась амплитуда выходного сигнала ЛАГГ при постоянном акустическом давлении и комнатной температуре (суточное колебание $\pm 5^\circ\text{C}$). Измерения показали, что флуктуации амплитуды выходного сигнала ЛАГГ не превысили 1%.

Как было показано в работах [24, 29–31], фоторефрактивные среды позволяют эффективно мультиплексировать динамические голограммы в одном кристалле. Установлено, что формирование до 70 голограмм приводит к снижению чувствительности не более чем на 10% [29]. На практике реализована адаптивная интерферометрическая система с 26 голографическими каналами [32]. Таким образом, применение динамических голограмм в схеме лазерного гидрофона способно не только обеспечить стабильность его характеристик и высокую чувствительность, но и открывает перспективы по созданию многоканального адаптивного гидроакустического комплекса.

Таким образом, в настоящей работе предложен и исследован новый тип лазерного гидрофона на основе динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивном кристалле. Показано, что применение в интерферометрических гидрофонах динамических голограмм позволяет избежать необходимости использования сложных оптических схем и систем электронной стабилизации рабочей точки интерферометра, что существенно упрощает схему лазерного гидрофона, сохраняя при этом его высокую чувствительность, и делает его перспективными для применения в условиях сильно изменяющихся параметров окружающей среды. Реализованный в настоящей работе ЛАГГ обладает чувствительностью на уровне 3.3 мВ/Па, обеспечивая порог детектирования акустического давления 130 Па в частотном диапазоне 1–30 кГц. Вместе с тем, построение лазерного гидрофона на основе принципов адаптивной голографической интерферометрии открывает перспективы снижения порога широко-

полосного детектирования до уровня менее 0.1 Па без изменения оптической схемы. Кроме того, на основе мультиплексирования множества динамических голограмм в одном фоторефрактивном кристалле может быть построен многоканальный лазерный высокочувствительный гидроакустический комплекс с числом каналов более 30.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект №14-12-01122).

1. Sherman C.H., Butler J.L. *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (New York: Springer, 2007).
2. Bucaro J.A., Dardy H.D., Carome E.F. *J. Acoust. Soc. Am.*, **62** (5), 1302 (1977).
3. El-Hawary F. *The Ocean Engineering Handbook* (New York, London: CRC Press, 2000).
4. Lee H.B., Kim Y.H., Park K.S., Eom J.B., Kim M.J., Rho B.S., Choi H.Y. *Sensors*, **12**, 2467 (2012).
5. Posada-Roman J., Garcia-Souto J. A., Rubio-Serrano J. *Sensors*, **12** (4), 4793 (2012).
6. Lim T. K., Zhou Y., Lin Y., Yip Y.M., Lam Y.L. *Opt. Commun.*, **159** (4), 301 (1999).
7. Macià-Sanahuja C., Lamela H., Garcia-Souto J.A. *J. Opt. Technol.*, **74** (2), 122 (2007).
8. Morris P., Hurrell A., Shaw A., Zhang E., Beard P. *J. Acoust. Soc. Am.*, **125** (6), 3611 (2009).
9. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Плотников А.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. *Подводные исследования и робототехника*, №1, 40 (2007).
10. Долгих Г.И., Плотников А.А., Швец В.А. *ПТЭ*, **1**, 159 (2007).
11. Staudenraus J., Eisenmenger W. *Ultrasonics*, **31** (4), 267 (1993).
12. Morris P., Hurrell A., Beard P. *Proc. Instit. Acoustic*, **28**, 717 (2006).
13. Freschi A.A., Frejlich J. *Opt. Lett.*, **20**, 635 (1995).
14. Shi C.-H., Chen J.-P., Wu G.-L., Li X.-W., Zhou J.-H., Ou F. *Opt. Express*, **14** (12), 5098 (2006).
15. Yoshino T., Nara M., Mnatzakanian S., Lee B.S., Strand T.C. *Appl. Opt.*, **26** (5), 892 (1987).
16. Liu J., Yamaguchi I. *Appl. Opt.*, **39** (1), 104 (2000).
17. Herz M. *Opt. Engng.*, **44** (9), 090505-090505-3 (2005).
18. Karhade O., Degertekin L., Kurfess T. *Opt. Lett.*, **34** (19), 3044 (2009).
19. Schmidt M., Werther B., Fürstenau N., Matthias M., Melz T. *Opt. Express*, **8** (8), 475 (2001).
20. Kamshilin A.A., Petrov M.P. *Opt. Commun.*, **53**, 23 (1985).
21. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Launay J.-C. *Opt. Express*, **15** (2), 545 (2007).
22. Romashko R.V., Di Girolamo S., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27** (2), 311 (2010).
23. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. *Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике* (С.-Пб: Наука, 1992).
24. Di Girolamo S., Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Launay J.-C., Kamshilin A.A. *Opt. Express*, **16** (22), 18040-9 (2008).
25. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камшилин А.А., Ромашко Р.В. *Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей* (Москва: Физматлит, 2009).
26. Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Ермолаев С.А., Завестовская И.Н. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **41**, 12, 348 (2014).
27. Ефимов М.Е., Плотников М.Ю., Куликов А.В. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **93** (5), 158 (2014).
28. Di Girolamo S., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Romashko R.V. *Opt. Commun.*, **283** (1), 128 (2010).
29. Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Камшилин А.А., Кульчин Ю.Н. *Квантовая электроника*, **42** (6), 551 (2012).
30. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. *J. Rus. Laser Res.*, **31** (1), 55 (2010).
31. Fomitchov P., Murray T.W., Krishnaswamy S. *Appl. Opt.*, **41** (7), 1262 (2002).
32. Romashko R.V., Bezruk M.N., Kamshilin A.A., Kulchin Y.N. *Pacific Sci. Rev.*, **15** (1), 104 (2013).