

УДК 534:621.382

**АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ИНФРАЗВУКЕ  
В ЗАДАЧАХ ЛАЗЕРНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

© М. С. Хайретдинов<sup>1,3</sup>, Б. В. Поллер<sup>2,3</sup>, Б. Д. Борисов<sup>2,3</sup>,  
А. В. Бритвин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6*

<sup>2</sup>*Институт лазерной физики СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20*

*E-mail: marat@opg.sccc.ru*

Изучаются процессы акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах с применением сейсмических вибраторов в качестве источников низкочастотных акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере, и лазерных измерительных линий как оптических приёмников колебаний. Предложенные типы источника и приёмника в интересах изучения акустооптического взаимодействия определяют новизну и оригинальность предлагаемого подхода. Приводятся результаты экспериментов по оцениванию характеристик акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах в задачах лазерного экологического мониторинга окружающей среды.

*Ключевые слова:* акустооптическое взаимодействие, инфранизкие частоты, сейсмический вибратор, лазерная измерительная линия, оптический стенд, экспериментальные исследования.

DOI: 10.15372/AUT20200610

**Введение.** Вопросы акустооптического взаимодействия имеют давнюю историю и связаны в основном с изучением дифракции света в ультразвуковом и радиочастотном диапазонах [1–4]. При этом практически неисследованными остаются вопросы акустооптического взаимодействия в области инфранизких частот. По-видимому, это обусловлено отсутствием специальных акустических излучателей в этом диапазоне частот. В данной работе развивается подход по использованию акустических колебаний инфранизких частот, излучаемых в атмосферу сейсмическими вибраторами, для изучения эффектов акустооптического преобразования (АОП) на этих частотах [5, 6]. Ряд таких вибраторов был создан в Сибирском отделении РАН [7]. Экспериментально доказана возможность регистрации акустических колебаний от вибраторов на удалениях в десятки километров благодаря высокой синхронности излучаемых колебаний и использования методов корреляционно-спектрального накопления [8]. Вследствие ограниченной мощности излучения решается одновременно проблема экологической безопасности данного класса источников в отличие от традиционно используемых мощных взрывных источников. Заявленный подход открывает возможности проведения экспериментальных исследований по изучению закономерностей процессов акустооптического взаимодействия, результаты которых востребованы для решения задач лазерного экологического мониторинга природной среды, в том числе инфразвука как одного из предвестников природных и техногенных катастроф [9].

**Постановка задачи.** Рассматривается взаимодействие акустических и оптических волновых колебаний, описываемых уравнениями

$$\nabla^2 x - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 x}{dt^2} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla^2 y - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 y}{dt^2} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $v, c$  — соответствующие скорости распространения акустических и оптических волн,  $\nabla^2$  — оператор Лапласа. Акустический волновой процесс допускает решение в виде плоской гармонической волны с амплитудой  $A$ :  $x(t) = A \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r})$ , где  $\vec{r}$  — радиус-вектор,  $\vec{k}$  — волновой вектор, равный  $|\vec{k}| = k = \omega/v$ . Взаимодействие обоих волновых процессов основывается на том, что акустический волновой фронт, характеризуемый в точках среды значениями акустических давлений, обуславливает возникновение в среде механических деформаций  $a_j$ . Вследствие этого акустическое колебание вызывает изменение показателя преломления среды  $n$ . С учётом этого для плоской монохроматической акустической волны, распространяющейся вдоль заданного направления  $z$ , меняющийся показатель преломления может быть представлен в виде

$$n(z, t) = n + \Delta n \cos(2\pi ft - kz). \quad (3)$$

Здесь  $n$  — невозмущённый показатель преломления,  $f$  и  $k$  — частота и волновое число,  $\Delta n$  — амплитуда изменения показателя преломления под действием акустической волны. Происходящие изменения преломляющих свойств среды, в свою очередь, приводят к периодическому изменению скорости распространения оптических импульсов в луче, направленном под углом к фронту распространения инфразвуковой волны.

В качестве основного фактора при акустооптическом преобразовании на низких частотах в газовой среде в отличие от твёрдых тел выступает зависимость коэффициента преломления воздуха от давления. В то же время изменение частоты акустических колебаний в инфразвуковом диапазоне не будет влиять на величину коэффициента преломления, так как составляющие коэффициента преломления — магнитная проницаемость и диэлектрическая постоянная для воздуха — близки к единице. Численная оценка изменения коэффициента преломления воздуха в зависимости от акустического давления согласно [10] определяется соотношением  $n = 1 + 77,6(1 + 0,00752/\lambda^2)(P/T) 10^{-6}$ , где  $P$  — атмосферное давление (гПа),  $T$  — температура воздуха (К),  $\lambda$  — длина оптической волны (мкм). В частности, в соответствии с расчётами, начиная с давления 10 мкПа, увеличение коэффициента преломления на длине волны 0,38 мкм в 2 раза больше, чем на длине волны 0,55 мкм.

Условия осуществимости лучевого приёма, основанные на соотношениях параметров внешнего акустического поля и измерительных световых колебаний, определяются следующими соотношениями:

$$\frac{\nu}{\omega} \gg \frac{c_0}{v}; \quad \frac{L}{rl} \gg 1; \quad \frac{\lambda}{d} > 0,82; \quad (4)$$

$$\frac{L}{\lambda} \ll \begin{cases} c_0^2/(c_m v) & \text{при } c_0/v \gg 1; \\ c_0^2/(c_m v), c_0/(v - c_0) & \text{при } c_0/v < 1. \end{cases}$$

Здесь  $\nu, c_0, c_m$  — угловая частота, средняя скорость и амплитуда параметрического изменения скорости распространения колебаний в измерительном луче;  $L, d$  — длина и диаметр

измерительного луча;  $\omega$ ,  $\lambda$ ,  $v$  — угловая частота, длина волны и скорость распространения внешних акустических колебаний;  $rl$  — радиус пространственной корреляции неоднородностей среды. Приведённые соотношения определяют требования к выбору условий регистрации акустических колебаний с помощью лазерной измерительной линии. Примем длину волны в измерительном луче, равной  $\Lambda$ . При условии  $\lambda \gg \Lambda$  следует соотношение  $v/\omega \gg c_0/v$ . Внешняя плоская гармоническая волна обуславливает пространственную и временную периодическую изменчивость среды, что, в свою очередь, вызывает модуляцию скорости распространения волны (2)  $c(t) = c_0 + c_m \sin(\omega t - \bar{k}\bar{r})$ , где  $c_0$  — скорость распространения колебаний в измерительном луче при отсутствии внешних возмущений,  $c_m$  — амплитуда модуляционной компоненты скорости. Наличие её ведёт к изменению времени задержки колебаний в пределах длины  $L$  измерительного луча, определяемой для прямого хода луча в виде

$$\tau(t) = \int_0^L dx/c(t) = \int_0^L dx/[c_0 + c_m \sin(\omega t + \omega x/c_0 - kx \cos \alpha)]. \quad (5)$$

Уравнение (5) соответствует случаю, когда измерительный луч лежит в плоскости  $XOY$ , волновой вектор  $\bar{k}$  совпадает по направлению с осью  $X$ ,  $\alpha$  — угол между направлением измерительного луча и волновым фронтом возмущения, член  $\omega x/c_0$  является фазовым сдвигом колебаний в волновом поле, определяемым скоростью распространения колебаний в измерительном луче. Как следует из (5), время задержки складывается из базовой и информационной составляющих:  $\tau(t) = \tau_b + \tau_i$ . Приблизённо информационная составляющая ограничена значением  $\max \tau_i \approx \mu L/c_0$ , где  $\mu = c_m/c_0$  удовлетворяет условию  $\mu \ll 1$ . С учётом обратного хода луча суммарная задержка для двухлучевой схемы модуляции примет вид

$$\tau^\circ(t) = \int_0^L dx^\circ/[c_0 + c_m \sin(\omega t + \omega L/c_0 - kL \cos \alpha + c_0 + kx^\circ \cos \alpha)]. \quad (6)$$

В реальных условиях на процессы модуляции влияет ряд внешних факторов: вносимые извне неоднородности атмосферы (в частности, аэрозольные и газовые), метеопараметры, характеристики освещённости и др. [10]. Полнота учёта всех внешних факторов достигается в условиях экспериментальных исследований. Для проведения исследований был создан макет акустооптической информационной системы (рис. 1) в составе сейсмического вибратора ЦВ-40 (акустического излучателя) и оптического стенда, включающего лазерный излучатель и оптический приёмник. Для прямой регистрации акустических колебаний используются автономные регистрирующие цифровые станции, располагаемые вдоль измерительного луча. Метеостанция предназначена для регистрации метеоусловий в окружающей атмосфере. Вибратор ЦВ-40 играет роль внешнего низкочастотного генератора акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере в диапазоне частот 6,25–11,23 Гц.

Схема оптического стенда представлена на рис. 2. Роль его состоит в формировании импульсов накачки длительностью 50 мкс с частотой следования 1–10 кГц с помощью генератора импульсов (ГИ) и модуля регулировки частоты (РЧ), передачи-приёма их по оптической линии связи с последующим выделением огибающей импульсов с применением интегратора (ИНТ). Выделяемая огибающая несёт в себе информацию о параметрах внешних акустических воздействий в виде амплитудно-частотно-фазовых и временных характеристик. Измерения проводились в условиях лаборатории и открытой атмосферы с использованием отражателей.

В экспериментах выполнено оценивание предельно низкого уровня глубины амплитудной модуляции измерительного луча, характеризующего чувствительность акустооптиче-

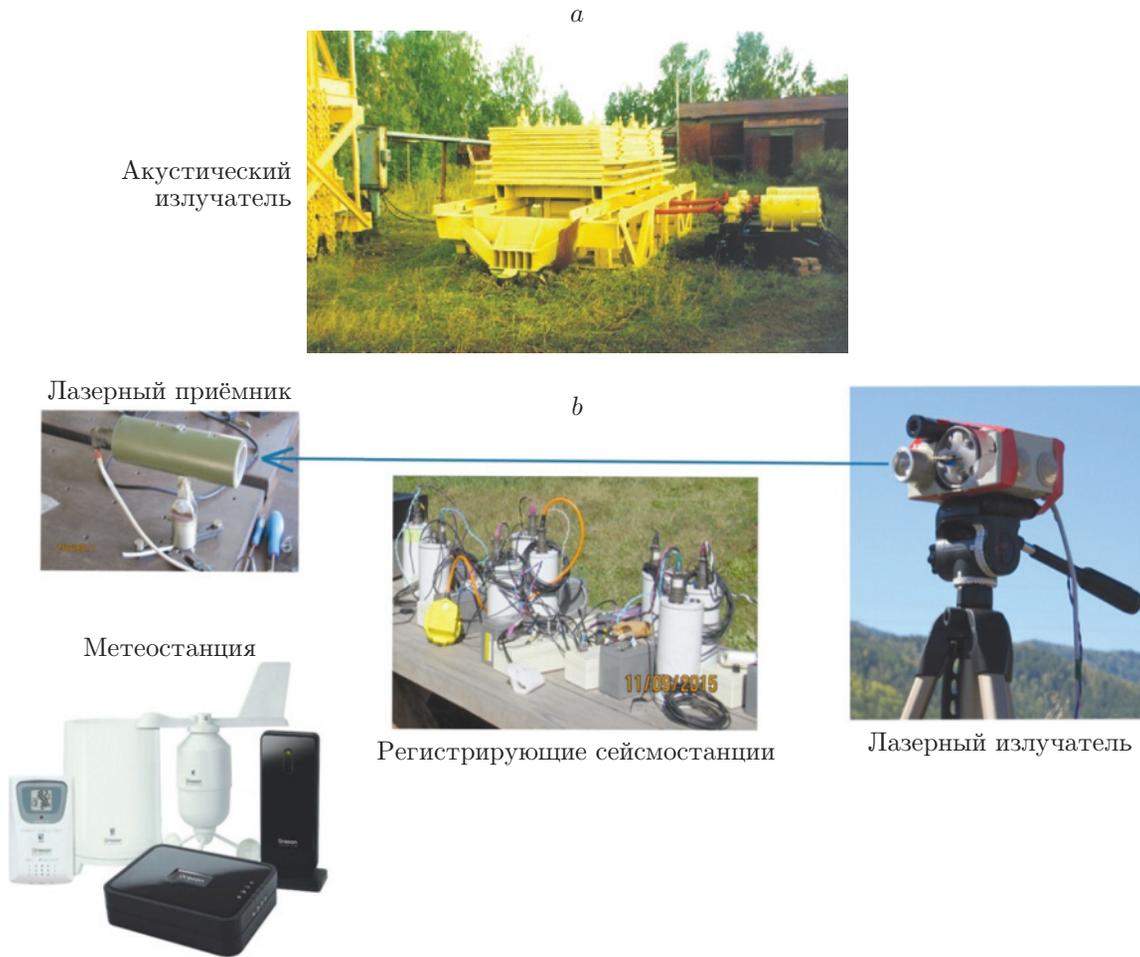


Рис. 1. Компоненты акустооптической системы: *a* — сейсмический вибратор ЦВ-40; *b* — оптический стенд

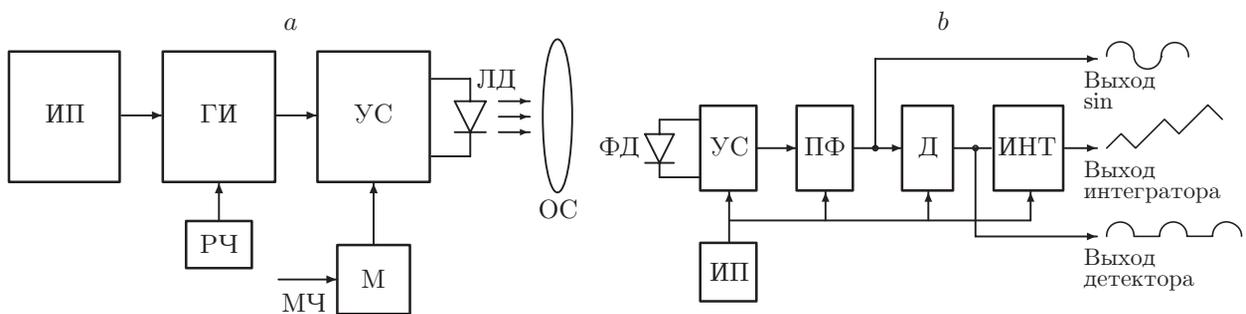


Рис. 2. Схема оптического стенда: *a* — функциональная схема модуля излучателя оптических импульсов; *b* — функциональная схема оптического приёмника. Обозначения: ИП — источник питания, УС — усилитель, М — модулятор, МЧ — модулирующая частота, ЛД — лазерный полупроводниковый диод, ОС — оптическая система, ФД — фотодиод, ПФ — полосовой фильтр, Д — детектор

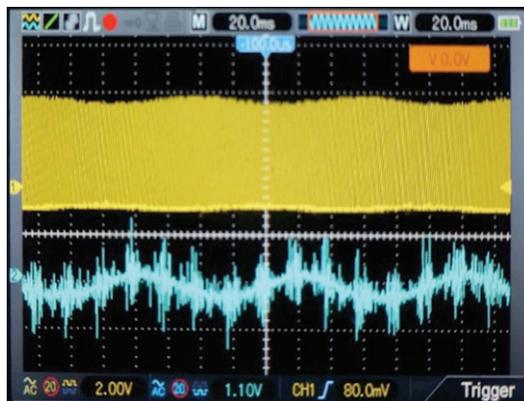


Рис. 3. Осциллограмма АМ-сигнала излучения с глубиной модуляции 5,1 % (в верхней части рисунка) и его огибающая с выхода оптического приёмника (в нижней части рисунка) на трассе протяжённостью 80 м

ского взаимодействия. Идея измерений в лабораторных условиях основывается на принципах амплитудной модуляции импульсов накачки лазерного излучения до задаваемой глубины модуляции от модулятора  $M$  прецизионными гармоническими сигналами в диапазоне частот 2–20 Гц (рис. 2, *a*) с последующими передачей-приёмом по оптической линии длиной 80 м. В частности, пример осциллограммы передачи АМ-сигналов и приёма демодулированных с выхода оптического приёмника представлен на рис. 3. Рисунок соответствует случаю передачи-приёма в условиях лаборатории на трассе протяжённостью 80 м и глубине модуляции 5,1 %.

Акустооптические взаимодействия относятся к числу слабых, которые эффективно можно обнаруживать цифровыми методами накопления сигналов в шумах. К числу таких методов принадлежит алгоритм квадратурного измерения амплитуд и фаз гармонических колебаний вида  $f(t) = A_{i\max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0 t) + n(t)$ ,  $i = 1, \dots, M$ , где  $A_{i\max}$ ,  $\omega_0$  и  $\varphi_0$  — амплитуды, частоты и фазы сигналов на фоне гауссового шума  $n(t)$ . Искомые параметры на интервале задания колебания  $T$  определяются с помощью рекуррентного квадратурного алгоритма путём оценивания установившихся значений статистик вида  $R[n]$ ,  $\varphi[n]$ :

$$R[n] = \sqrt{X[n]^2 + Y[n]^2}; \quad \varphi[n] = \arctg(Y[n]/X[n]);$$

$$\bar{X}[n] = \bar{X}[n-1] + \gamma(Z_x[n] - \bar{X}[n-1]); \quad \bar{Y}[n] = \bar{Y}[n-1] + \gamma(Z_y[n] - \bar{Y}[n-1]), \quad (7)$$

$$\gamma = \Delta t/T, \quad Z_x = f(t) \sin \omega_0 t, \quad Z_y = f(t) \cos \omega_0 t.$$

Здесь  $\gamma$  — параметр сходимости алгоритма,  $\Delta t$  — интервал дискретизации колебания  $f(t)$ .

С помощью алгоритма (7) для случая использования внешнего модулирующего колебания с заданной частотой  $f_0$  и глубиной модуляции вычисляются текущие оценки амплитуд и фаз огибающей оптического сигнала. На рис. 4 представлены результаты цифровой обработки оптического сигнала, соответствующие измерению текущих значений амплитуды (рис. 4, *a*), фазы (рис. 4, *b*) и спектра (рис. 4, *c*) огибающей оптического сигнала при глубине модуляции 0,4 %.

Конечные результаты оценивания параметров определяются их установившимися значениями, начиная с некоторой итерации  $n_{уст}$ . Приведённые здесь результаты подтверждают возможность многократного усиления показателя чувствительности акустооптического преобразования (АОП) за счёт цифровой обработки, связанной с вычислением

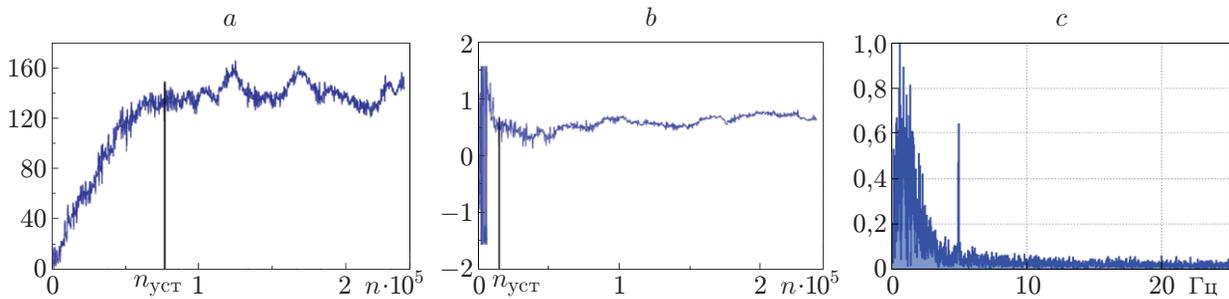


Рис. 4. Результаты цифровой обработки оптического сигнала: *a* — текущее значение амплитуды; *b* — фаза; *c* — спектр огибающей оптического сигнала при глубине модуляции 0,4 %

амплитудно-фазочастотных характеристик оптического сигнала. При этом эффект усиления может исчисляться порядками.

В проведённых тестовых экспериментах показано, что наиболее чувствительными к акустооптическому взаимодействию являются фазочастотные характеристики, измеряемые с высокой точностью при минимально предельных глубинах АМ-сигналов до уровней 0,1 % и ниже.

**Результаты натуральных акустооптических измерений на инфранизких частотах.** Проведены натурные эксперименты по регистрации инфранизкочастотных колебаний от сейсмического вибратора ЦВ-40 с помощью сейсмоакустических систем и приёмной лазерной измерительной линии. Схема проведения акустооптических измерений, привязанных к карте местности в районе Быстровского вибросейсмического полигона, представлена на рис. 5, *a*.

Основные компоненты акустооптической системы и геометрические характеристики их расположения даны на рис. 5, *a*. Функционально состав основных компонент системы соответствует рис. 1, 2. Излучение акустических колебаний осуществлялось в гармоническом режиме на дискретных частотах, расположенных в полосе 8,0–10,5 Гц. Вышепредставленные методы анализа данных (7) по отношению к рассматриваемому эксперименту иллюстрируются графиками накопления на рис. 5, *b, c*, аналогичном рис. 4, но в отличие от него показывает накопление в оптическом сигнале сверхслабого модулирующего акустического колебания частоты 9,5 Гц: на рис. 5, *b* представлен график накопления по амплитуде; на рис. 5, *c* — график измерения мгновенной фазы акустического колебания. По результатам измерений усреднённый уровень внешних акустических колебаний от вибратора ЦВ-40 вдоль оптического луча длиной 300 м составляет  $\sim 0,01$  Па. Этому соответствует смещение оптического луча около  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  м. Очевидно, что измерение таких уровней смещения доступно лишь алгоритмам накопления типа (7), предназначенным для получения оценок в первую очередь в нанометровом диапазоне [8]. Полученные графики на рис. 4 и 5, *b, c* подтверждают эффективность использования алгоритма (7).

Исключения возможных артефактов, вызванных воздействием сейсмических колебаний на процесс акустооптического взаимодействия, достигаются благодаря возможности временного разделения сейсмических и акустических волн, которые распространяются с резко отличающимися скоростями (на порядок и более) [5].

На точность оценивания параметров модулированных оптических колебаний, кроме внешних природных факторов [11], влияет фактор нестабильности частоты генератора, задающего частоту следования импульсов накачки. Экспериментально наличие дрейфа определялось на основе получения и анализа реализаций спектров периодических импульсных сигналов в измерительном луче. Соответственно была рассчитана количественная

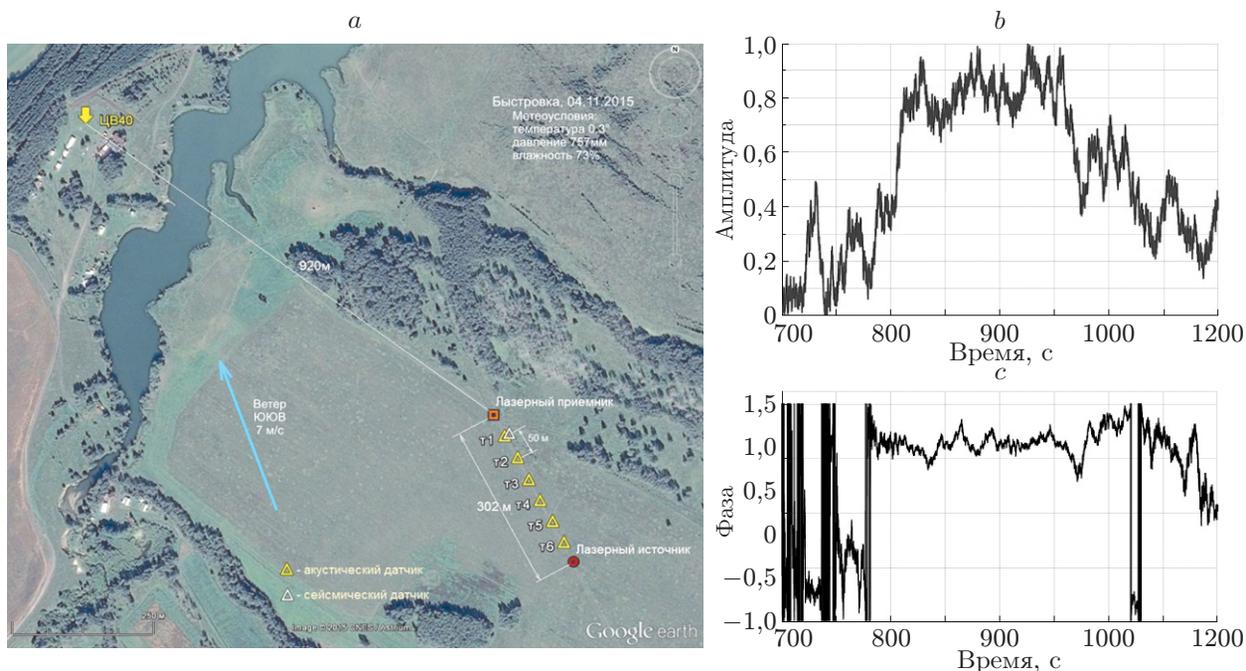


Рис. 5. Схема полевого эксперимента и его результаты: *a* — карта местности и схема расположения устройств акустооптической системы и вибратора ЦВ-40 в районе полигона «Быстровка»; *b* — результат обработки оптических колебаний в измерительном луче: амплитудное накопление огибающей, обусловленное присутствием внешнего акустического колебания с частотой 9,5 Гц; *c* — установившаяся фаза колебаний, осложнённая шумами

оценка максимального значения девиации частоты около 0,2 %. Полученная оценка определяет точность оценивания положения мод акустического колебания, преобразованного в оптическое, на частотной оси. Оба проанализированных фактора определяют выбор схем измерения высокочувствительного акустооптического взаимодействия.

**Аналитические оценки метода мониторинга инфразвуковых волн на атмосферных трассах с высокостабильным лазерным излучением.** Рассмотрены различные схемы построения лазерных измерительных линий с повышенной чувствительностью к акустооптическим взаимодействиям [12, 13]. На основе выполненного анализа предлагается схема частотного метода измерений с повышенной чувствительностью (рис. 6).

В основе метода измерений лежит использование стандарта частоты (СЧ) для формирования стабильной частоты  $F_0$  потока лазерных импульсов в лазерном излучателе на длине волны  $\lambda_0$ . Требования к стабильности  $F_0$  обусловлено ожидаемым изменением коэффициента преломления излучения на длине волны  $\lambda_0$ , на трассе  $L_0$ . Если принять, что при определенной длине оптического кабеля  $OK2 = L_{опр}$  время прихода лазерных импульсов на оптические усилители ОУ2 и ОУ3 совпадает, то можно записать уравнение

$$\frac{n_i L_0}{C_0} + \frac{n_{0k} L_0}{C_0} = \frac{n_i L_0}{C_0} + \frac{n_i L_0}{C_0} + \frac{n_{0k} L_{опр}}{C_0},$$

где  $C_0$  — скорость распространения импульсов в луче;  $n_{0k}, L_0$  — коэффициент преломления и длина оптического кабеля ОК3 соответственно. Для этого случая можно показать, что искомый коэффициент преломления  $n_i = n_{0k}(1 - L_{опр}/L_0)$ . Таким образом, в структуре метода измерения (рис. 6), установив длину ОК2, равной  $L_2$ , можно определить начальное

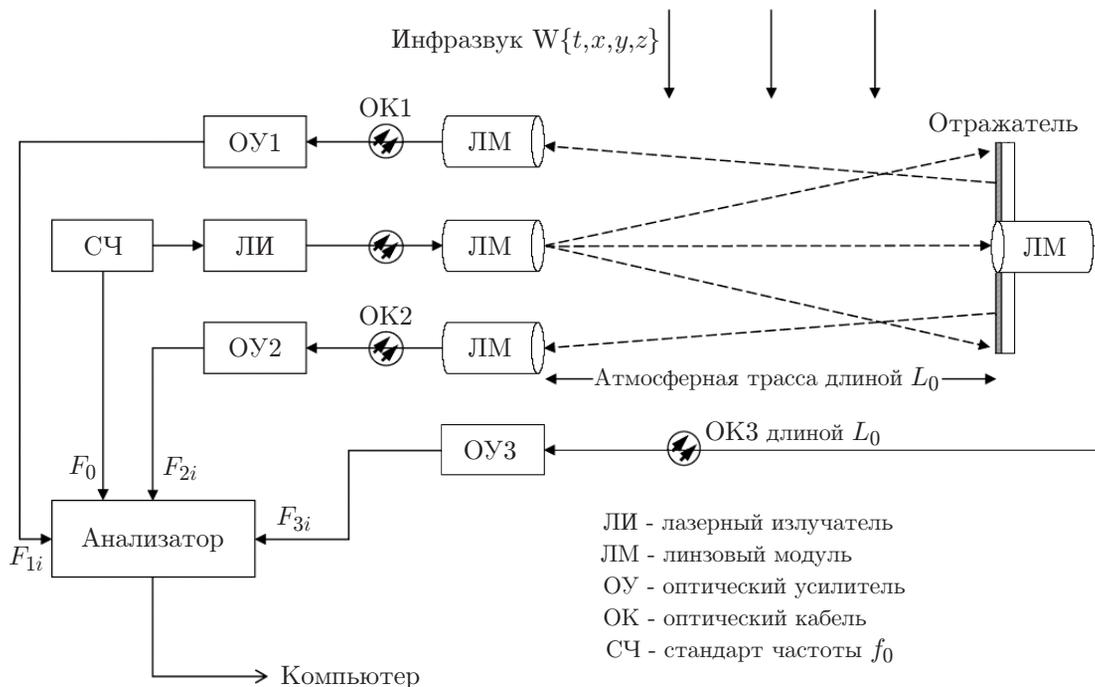


Рис. 6. Структура схемы измерений частотным методом для мониторинга инфразвука

значение параметра  $n$  при определённых условиях и затем измерять отклонения от него, вызванные внешним акустическим воздействием за счёт применения методов прецизионной частотометрии [14].

Следует отметить, что наличие в схеме измерения двух атмосферных трактов приёма ОУ1 и ОУ2 позволяет уменьшить влияние атмосферных аддитивных помех при использовании вычитания амплитуд импульсов с оптических усилителей в анализаторе.

**Заключение.** Представлены новые методы и результаты исследований акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах в интересах лазерного мониторинга на атмосферных трассах. Новизна выполненных исследований определяется применением сейсмоакустических низкочастотных вибраторов как прецизионных излучателей инфразвука, высокочувствительных помехоустойчивых алгоритмов обнаружения и оценивания параметров акустооптического преобразования, а также использованием метода высокоточной синхронизации частоты лазерного излучателя. Экспериментально показана возможность прецизионной оценки параметров модуляции измерительного луча и текущих изменений коэффициента преломления воздуха на атмосферной трассе с учётом коэффициентов преломления нормальной атмосферы, температуры и локального давления.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 17-07-00872-а, 18-47540006р-а, 20-07-00861-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молчанов В. Я., Китаев Ю. И., Колесников А. И. и др. Теория и практика современной акустооптики. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 459 с.
2. Богданов С. В. Акустооптические методы измерения скорости звука. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 142 с.
3. Корпел А. Акустооптика. М.: Мир, 1993. 240 с.

4. Luna D. A., Real M. A., Duran D. V. Undergraduate experiment to measure the speed of sound // Amer. Journ. Phys. 2002. **70**, N 8. P. 874.
5. Khairtdinov M. S., Kovalevsky V. V., Shimanskaya G. M. et al. Active monitoring technology in studying the interaction of geophysical fields // Active Geophysical Monitoring. Elsevier, 2020. Second Edition. Chapter 3.3. P. 207–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102684-7.00010-8>.
6. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Еманов А. Ф. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, филиал «Гео» изд. СО РАН, 2004. 387 с.
7. Хайретдинов М. С., Поллер Б. В. Акустооптическое взаимодействие на инфранизких частотах // Сб. тр. XVI науч.-практ. конф. "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии ИНФО 2019". Сочи, 1–10 окт., 2019. С. 194–198.
8. Khairtdinov M. S., Poller B. V., Britvin A. V. et al The vibrational method for studying acoustooptic interaction at infralow frequencies // Proc. of the 14-th Intern. Scientific-technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2018). Novosibirsk, 2018. Vol. 1, Pt. 4. P. 442–446.
9. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды /Под. ред. В. Н. Рождествина. М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2002. 528 с.
10. Одинцов С. Л., Гладких В. А., Камардин А. П. и др. Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы. Часть 1. Показатель преломления // Оптика атмосферы и океана. 2017. **30**, № 10. С. 821–828.
11. Мамышев В. П., Одинцов С. Л. Дисперсия фазы узкополосных звуковых сигналов на приземных трассах // Оптика атмосферы и океана. 2016. **29**, № 12. С. 1061–1067.
12. Бритвин А. В., Коняев С. И., Никитенко Н. С. и др. Методы построения и экспериментальные характеристики ультрафиолетовых атмосферных линий связи // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 25–28.
13. Бритвин А. В., Поважаев А. В., Никитенко Н. С., Поллер Б. В. Характеристики оптико-электронной системы для контроля подвижных объектов и сред в приземной зоне лазерного мониторинга // Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018»: Сб. материалов в 2 т. Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 2. С. 151–157.
14. Абрамов М. А., Борисов Б. Д., Васильев В. А., Кузякин Н. А. Прецизионный цифровой частотомер с частотно-фазовой автоподстройкой (ЧФАП) // Материалы V междунар. конф. "Радиотехника, электроника и связь". Омск, 7–9 окт., 2019. С. 52–54.

*Поступила в редакцию 18.02.2020*

*После доработки 22.04.2020*

*Принята к публикации 28.06.2020*