

DOI: [10.7242/1999-6691/2020.13.1.2](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.1.2)

УДК 550.34.01

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГРУНТОВ

Ю.М. Заславский, В.Ю. Заславский

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Российская Федерация

Выведены расчетные соотношения, позволяющие проанализировать возможность обнаружения локальных неоднородностей при акустическом исследовании грунтовой толщи методом отраженных волн. Амплитудное значение суммарного отклика на выходе приемной антенны представляется в виде двумерного рельефа – функции двух аргументов: времени задержки обратно отраженного импульсного эхо-сигнала и смещения центра апертуры при пространственном сканировании относительно места предполагаемой локализации неоднородности. На основе графического представления суммарного отклика приемной антенны в виде двумерного пространственно-временного рельефа демонстрируется реализуемость предлагаемого метода обнаружения локальных неоднородностей в зондируемой среде. Иллюстрации результатов моделирования наглядно показывают, что данный подход способствует получению информации о фактическом профиле или характере горизонтального пространственного распределения аномалии. Путем математического и численного моделирования анализируется влияние длительности зондирующего импульса и апертуры приемной антенны, габаритов и глубины залегания локальной неоднородности, а также фактора диссипации при распространении сейсмоакустических волн на разрешающую способность при зондировании и удаленной диагностике параметров неоднородности. Областью применения разработанной методики является инженерная сейсморазведка карстовых полостей, брекчий, каверн и других видов локальных неоднородностей.

Ключевые слова: многоканальная сейсмоакустическая диагностика, вибрационное зондирование грунта, карстовая полость, локальная неоднородность, пространственное разрешение

SEISMOACOUSTIC SOUNDING OF LOCAL INHOMOGENEITIES BY THE METHOD OF REFLECTED WAVES

Yu.M. Zaslavsky and V.Yu. Zaslavsky

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The calculation relations are derived for analyzing the possibility of detecting local inhomogeneities by the method of reflected waves when conducting acoustic investigation of the ground layer. The amplitude value of the total response at the receiving antenna output is represented as a two-dimensional terrain - a function of two arguments: delay time of the back-reflected delay time pulse echo signal and the aperture center displacement during spatial scanning relative to the place of the intended target localization of the inhomogeneity. Based on a graphical representation of the total response of the receiving antenna in the form of a two-dimensional space-time terrain, the feasibility of the proposed method for detecting local inhomogeneities is demonstrated. The illustrations of the results of mathematical and numerical modeling for sensing the environment clearly show that this approach helps in obtaining information about the actual profile or nature of the horizontal spatial distribution of the anomaly. The influence of the duration of the probing pulse and the aperture of the receiving antenna, the size and depth of the local inhomogeneity, as well as the dissipation factor, during the propagation of seismic-acoustic waves on the resolution in probing and remote diagnostics of inhomogeneity parameters is analyzed by mathematical and numerical modeling modeling. The field of application of the developed technique is engineering seismic exploration of karst cavities, breccias, caverns and other types of local inhomogeneities.

Key words: multichannel seismoacoustic diagnostics, vibration sounding of the ground, karst cavity, local heterogeneity, spatial resolution

1. Введение

В современной инженерной сейсморазведке уделяется повышенное внимание вопросам зондирования верхних слоев осадочной земной толщи (грунтов) с целью обнаружения локальных неоднородностей, в частности, карстовых полостей, провалов, каверн, на глубинах от метра до первых десятков метров и с габаритами того же порядка. В отличие от традиционных методик, предназначенных для поиска углеводородных залежей, границы которых на километровой протяженности характеризуются достаточной стабильностью или выдержанностью, методы обнаружения таких объектов, ввиду их относительно малых масштабов, имеют свою специфику. При поиске и обнаружении применяется сейсмоакустическая диагностика с привлечением постоянно совершенствуемых современных средств инженерной малоглубинной сейсморазведки, в которых все чаще используются методы сейсмической томографии. Развитие методов поиска и обнаружения локальных неоднородностей направлено на повышение пространственного разрешения при зондировании осадочной толщи с целью обеспечения максимально высокой степени детальности в очертаниях или в профиле границ аномалий при их оконтуривании [1–10].

В настоящей работе обращается внимание на такую значимую для поисковой системы характеристику, как разрешающая способность по поперечным пространственным координатам (по латерали), которая достигается при сейсмоакустическом зондировании локальных неоднородностей типа карстовых полостей методом отраженных волн (МОВ). Безусловно, задачи картирования углеводородной залежи актуальны

сами по себе [11–15], однако в случае обнаружения маломасштабных малоглубинных аномалий вопрос оконтуривания границ вызывает повышенный интерес.

Пространственное разрешение — важнейшая характеристика в процессе выявления локальных неоднородностей, который основывается на сейсмоакустическом профилировании среды посредством МОВ, регистрируемых антенной решеткой; применение последней обусловлено необходимостью выделения из шумов, образующих помеховый фон, полезного сигнала. В результате анализа шумового фона выясняется принципиальная сторона вопроса, поэтому на практике прибегают к некоторой идеализации, позволяющей абстрагироваться от целого ряда реально присутствующих эффектов, усложняющих выполнение всех этапов работ по диагностике аномалий в натуральных условиях, но являющихся «сторонними» в исследовании зависимости разрешающей способности от условий эксперимента. Так, не принимаются во внимание: кратно отраженные волны–помехи при мелкомасштабной нерегулярной слоистости в осадочной толще; волновой обмен при рассеянии; микросейсмический фон и другое; при вычислениях используются приближения.

Таким образом, сейсмоакустическое профилирование среды в действительности выполняется при упрощающем предположении: излучение зондирующей посылки и регистрация обратно отраженных эхо-сигналов имеют вид монотипных объемных продольных волн. Это достигается за счет применения виброисточников, создающих излучение в малом телесном угле в направлении, перпендикулярном к земной границе. Поперечные волны в этом направлении отсутствуют, и не требуется подавление поверхностных волн.

Интересно рассмотреть возможность повышения эффективности сейсмоакустического зондирования за счет сканирования антенны — пошагового дискретного перемещения апертуры вдоль ограниченного участка профиля на границе над областью зондирования для обзора приграничного пространства среды, и оценить пространственное разрешение, достигаемое при зондировании видеоимпульсной посылкой или сейсмическим волновым цугом (импульсом с несущей частотой). Также важно выяснить, осуществима ли диагностика характера профиля неоднородности — зависит ли он от поперечных координат. При этом предполагается:

- простейший вид обработки сигналов — их непосредственное «алгебраическое» суммирование со всех датчиков приемной антенны;
- анализ разрешения выполняется без предварительной обработки сигналов, например, хорошо известным взаимно-корреляционным способом;
- обратно отраженные эхо-сигналы регистрируются приемной антенной с развитой апертурой (с фиксированным размером и максимально плотным заполнением датчиками), дискретно перемещаемой вдоль некоторого линейного профиля (подобно методу многократных перекрытий в системе наблюдений и регистрации МОВ в модификации общей глубинной точки в инженерной сейсморазведке);
- на этапе обработки сигналов осуществляется построение и анализ двумерного пространственно-временного распределения суммарного отклика, который описывается функцией двух аргументов: времени задержки приходящих сигналов и координаты перемещения центра антенны.

На основе данных, полученных при моделировании рельефов, образуемых двумерным распределением максимумов отклика, возможна оценка как эффективности предлагаемого подхода при диагностике поперечных габаритов локальной неоднородности по линии ее граничного профиля, вдоль которого выполняется сканирование, так и характера аномалии. В завершение мотивации и обоснования работы, сформулируем постановку задачи.

2. Вывод расчетных соотношений

Пусть имеем идеальный случай, когда локальная неоднородность представляет собой бесконечно тонкий горизонтальный слой, ориентированный параллельно базовой оси x и простирающийся под свободной границей среды на глубине H . Рассмотрим упрощенную модель, в которой возмущения плотности и упругих параметров локализируются в ограниченном интервале на выделенном горизонте и характеризуются двумя масштабами. Указанные масштабы входят как параметры в зависимость коэффициента волнового отражения от координаты x . Очевидно, что исследование будет направлено на характеристики, связанные, в том числе, с пространственным разрешением, достигаемым в направлениях, поперечных относительно распространения зондирующей волны. Предполагаем, что приемная антенна и установленный в ее центре излучатель находятся на границе среды и в процессе зондирования могут дискретно перемещаться вдоль оси x (см. Рис.1). На рисунке приведено перевернутое изображение зондируемой области, на котором реальная глубина соотносится с осью z , направленной вверх (так же, как и отложенная вверх дистанция H до источника–неоднородности). Варьирование двух масштабов значительно расширяет возможности анализа. При расчете волнового поля используется лучевой подход [3]. Расчет выполняется применительно к схеме регистрации с помощью МОВ, в которой для получения результирующего отклика (на выходе антенны) осуществляется алгебраическое суммирование волновых эхо-сигналов, бегущих вначале вдоль прямого, а затем обратного луча

(отраженного неоднородностью) и принимаемых датчиками антенны, расположенными вдоль апертуры длиной L .

Далее в расчете вместо суммирования сигналов с выхода приемников (размещенных в антенне вдоль оси x в пределах от $-L/2$ до $L/2$) производится их интегрирование, которое является идеализацией, причем указанная процедура достаточно корректна при условии применения малоразмерных датчиков и при тесном, практически непрерывном, их расположении в приемной цепочке. Как правило, при реализации наблюдения на основе МОВ предполагается расположение «с выносом источника за пределы апертуры», но в настоящей работе рассматривается размещение неоднородности в центре апертуры приемной антенны. При этом возможны эквивалентные ситуации: либо неоднородность дискретно (с фиксированным шагом) перемещается вдоль базовой оси x мимо неподвижной системы излучатель–приемная антенна в направлении, противоположном оси x , либо мимо неоднородности движется (сканирует) единая система «приемная антенна–излучатель».

Считаем, что коэффициент отражения по амплитуде не связан с частотой и в ограниченных пределах (лимитирующих габариты локальной неоднородности, явный вид которой представлен ниже) описывается двухпараметрической зависимостью вдоль координаты x . Уточняя данное предположение, заметим, что распределение неоднородности вдоль x (профиль коэффициента отражения) имеет два масштаба: внешний — R , и внутренний — r , тот или иной выбор которых обеспечивает возможность диагностики вида и габаритов неоднородностей. Достижимость (либо недостижимость) пространственного разрешения при зондировании неоднородностей, отличающихся профилем и глубиной залегания, верифицируется на основе сопоставления очертаний двумерного рельефа, образуемого откликом на выходе антенны, и исходного зондируемого профиля.

Свяжем координаты x , z с центром линейной антенны, апертура которой непрерывно заполнена датчиками и занимает интервал $-L/2 \leq x \leq L/2$, в середине которого помещается всенаправленный источник (с контролируемыми параметрами зондирующей посылки), излучающий импульсный сигнал длительностью T , представляющий собой видеоимпульс гауссовой формы. Необходимо построить осциллограммы суммарного отклика на выходе антенны в каждой из точек текущего позиционирования $x+d_n$, где $d_n/L = n \cdot \Delta$, $n=1, 2, \dots$ — номер дискретного смещения на шаг Δ вдоль x , в соответствии со сменой значений координаты x при пространственном сканировании зондирующим устройством излучатель–антенна. Поместив осциллограммы одну под другой, получим двумерную картину зависимости уровня сигнала от времени и координаты, то есть на плоскости (x, t) . Рассматриваемая модель используется для иллюстрации типичных практических ситуаций, однако она не учитывает влияние реальных факторов: рассеяния зондирующего импульса на случайных неоднородностях среды; присутствия аддитивного шума; стохастических флуктуаций по времени.

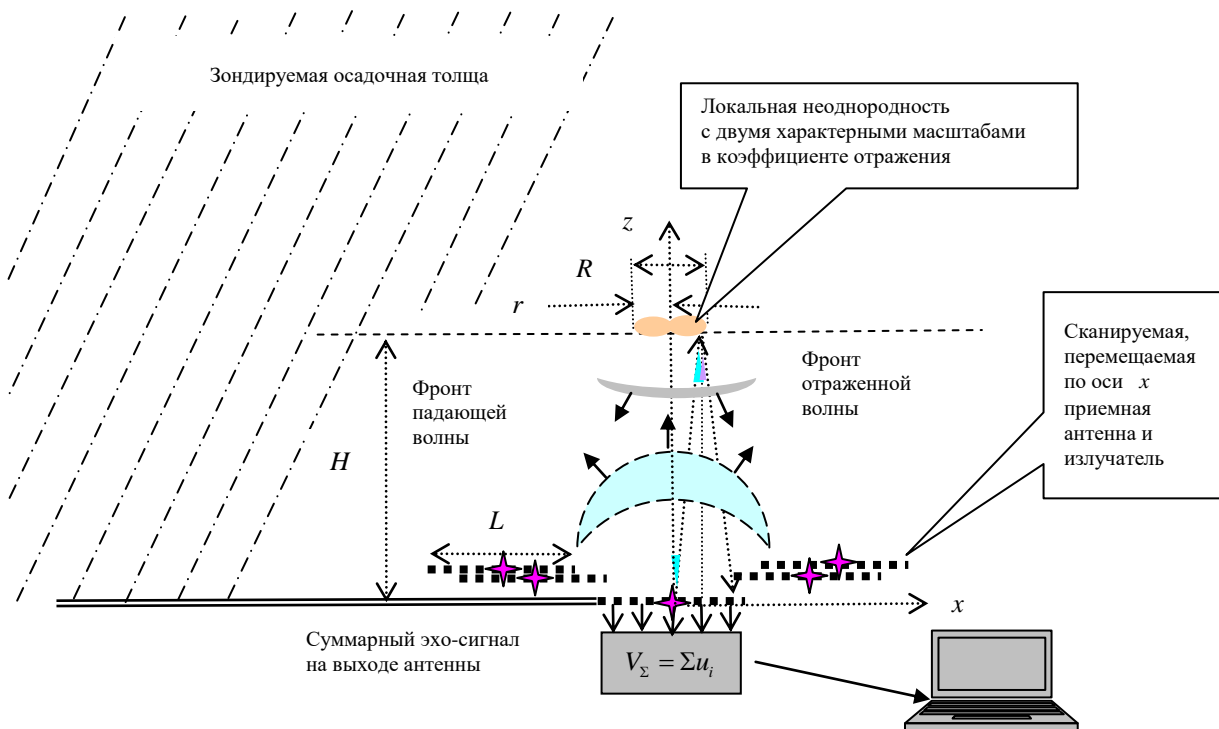


Рис. 1. Схема зондирования: акустический излучатель – приемная антенна – локальная неоднородность в осадочной толще

Импульс излучаемой волны бежит в направлении неоднородности, зеркально отражается от рассеивающей границы в точке с координатой $x/2$ (в соответствии с законом Снелля) и далее, распространяясь в обратную сторону, падает на соответствующий элемент (с координатой x) приемной антенны под возрастающим углом, поскольку точки приема по мере перемещения все более приближаются к периферии апертуры. При этом резкая зависимость коэффициента отражения от координаты в отражающей точке обуславливает модуляцию уровня сигнала, а плавная вариация дистанции до источника–приемника при пространственном сканировании антенны влечет за собой смену волнового фазового набега (сдвига фазы).

Для коэффициента отражения волны по амплитуде (в предположении, что волна локально плоская) удобно использовать выражения, описывающие распределение с одним или двумя максимумами, причем переход от одного выражения к другому позволяет распознавать форму профиля неоднородности в зависимости от степени его подобия характерной форме рельефа (вдоль координаты x), соотносящегося с уровнем суммарного сигнала на выходе антенны. Рельеф двумерного распределения может быть подобным или повторяющимся при достаточном высоком пространственном разрешении форму профиля неоднородности (при недостаточном разрешении форма профиля не повторяется). Учитывая, что при дискретном смещении (вдоль x) антенны относительно неоднородности в каждом новом положении аргументом будет величина $x/2 - d_n$, коэффициент отражения для локально плоской волны, падающей по лучу в отражающую точку неоднородности с указанной координатой, можем описать формулой:

$$K_n(x) = \left\{ \begin{array}{l} \sin^2 \frac{2\pi(x/2 - d_n)}{r} \\ \cos^2 \frac{2\pi(x/2 - d_n)}{r} \end{array} \right\} e^{-\frac{(x/2 - d_n)^2}{R^2}}, \quad (1)$$

где r и R — внутренний и внешний линейные масштабы неоднородности, причем в присутствии в распределении \sin^2 преобладает по уровню острый максимум, а при \cos^2 — раздвоенный и более пологий максимум.

Выражение (1) приведено в качестве примера, удобного для апробации и демонстрации работоспособности методики. Поскольку в задачу анализа входит исследование качественных величин, показывающих, как соотносятся друг с другом параметры профиля неоднородности, отражающей излучение, и отклика, регистрируемого антенной, то коэффициент отражения в (1) нормирован по амплитуде, то есть параметры неоднородности и окружающей ее среды не связаны между собой. За счет выбора масштабов r и R осуществляется вариация габаритов в расчетных моделях рельефа, а путем замены $\sin^2 \rightarrow \cos^2$ обеспечивается переход от одного вида профиля к другому.

Спектр излучаемого (зондирующего) сигнала — видеоимпульса гауссовой формы, записываем как

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t - \frac{4t^2}{T^2}} dt = \frac{T}{4\sqrt{\pi}} e^{-\frac{T^2\omega^2}{16}}, \quad (2)$$

где ω и T — частота и длительность импульса.

С учетом распространения фронта волнового импульса (объемной сферической волны) по лучам в прямом и обратном направлениях осциллограмму суммарного сигнала, возникающего на выходе антенны, можно представить в виде:

$$V_\Sigma(d_n, t) = \operatorname{Re} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{K_n(x)}{2\sqrt{H^2 + \left(\frac{x}{2} - d_n\right)^2}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{2i\frac{\omega}{c}\sqrt{H^2 + \left(\frac{x}{2} - d_n\right)^2} - \frac{\omega\Theta}{c}\sqrt{H^2 + \left(\frac{x}{2} - d_n\right)^2} - i\omega t} d\omega dx, \quad (3)$$

где c — скорость распространения волны, Θ — декремент поглощения сейсмических волн средой.

Интегрирование по формуле (3), используемое при вычислении, предполагает непрерывное размещение приемников в апертуре ($-L/2 \geq x \geq L/2$), что является идеализацией, которой соответствует термин «хорошо развитая антенна». На практике такая антенна может быть реализована размещением приемников в апертуре с шагом $\delta \approx \Lambda_{\min}/4$ (в четверть минимальной длины волны регистрируемого в спектре сигнала), при этом допустимый минимальный размер апертуры должен на порядок превышать максимальную длину волны Λ_{\max} в спектре сигнала.

При рассмотрении удалений H , значительно превышающих по величине масштаб апертуры L , то есть при $L/H \ll 1$, допустимо разложение выражения квадратного корня в ряд по x/H . Это позволяет выполнить упрощающие преобразования, и в конечном итоге получим расчетные выражения для суммарного сигнала на выходе антенны. Если в промежуточных выкладках ввести следующие безразмерные обозначения: $\xi = x/L$, $\rho = r/L$, $\rho_0 = R/L$, $h = H/L$, $\tau_0 = T/(L/c)$, то после перехода от ω к $\kappa = \omega L/c$ и внутреннего интегрирования в (3) по частоте придем к выражению (при некотором допущении, а именно при оставлении в показателе экспоненты членов только первой степени по малому декременту поглощения Θ и пренебрежении членами, содержащими более высокие степени):

$$\frac{T}{4\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{c^2 T^2}{16L^2} \kappa^2 + i\kappa \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} - \frac{c \cdot t}{L} \right) - \frac{\kappa \Theta}{2} \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} \right)} d\kappa = \frac{L}{2c} e^{-\frac{4}{\tau_0} \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} - \tau_m \right) \left(\left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} - \tau_m \right) + i\Theta \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} \right) \right)}. \quad (4)$$

При интегрировании по частоте в (4) используется табличное значение несобственного интеграла, приведенное, например, в [16].

При сканировании антенны ($d_n \rightarrow x$) для удобства графического представления результатов наряду с дискретизацией по перемещению целесообразно осуществлять дискретизацию по текущему времени: $\tau_m = c \cdot t_m / L = \varepsilon \cdot m$, $m = 1, 2, \dots$; здесь ε и m — шаг дискретизации и число шагов по времени. В результате выражение для суммарного сигнала (3) с учетом (4) преобразуется к следующему виду (для определенности рассматривается коэффициент $K_n(x)$ в форме \sin^2):

$$V_{\Sigma \sin}(n, m) = \operatorname{Re} \int_{-0,5}^{0,5} \sin^2 \frac{\pi(\xi - 2(\Delta \cdot n))}{\rho} e^{-\frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4\rho_0^2} - \frac{4}{\tau_0} \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} - \tau_m \right) \left(\left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} - \tau_m \right) + i\Theta \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} \right) \right)} h \left(1 + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{8h^2} \right)} d\xi. \quad (5)$$

По аналогии нетрудно получить выражение для суммарного отклика антенны, если в качестве зондирующего применяется импульс той же длительности T , но с несущей частотой ω_0 — радиопульс:

$$V_{\Sigma \sin}(n, m) = \operatorname{Re} \int_{-0,5}^{0,5} K_n(\xi) e^{-\frac{4}{\tau_0} \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} - \tau_m \right) \left(\left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} - \tau_m \right) + i\Theta \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} \right) \right) + i\kappa_0 \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} - \tau_m \right) - \frac{\kappa_0 \Theta}{2} \left(2h + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4h} \right)} h \left(1 + \frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{8h^2} \right)} d\xi, \quad (6)$$

где $K_n(\xi) = \sin^2 \frac{\pi(\xi - 2(\Delta \cdot n))}{\rho} \cdot e^{-\frac{(\xi - 2(\Delta \cdot n))^2}{4\rho_0^2}}$, $\kappa_0 = \omega_0 L/c$.

Рассмотрение режима излучения в форме радиопульса является обобщением случая видеоимпульсных зондирующих посылок и позволяет приблизить расчетные данные к требованиям реальных условий, выполняемых при сейсмоакустическом профилировании. Кроме того, переход на режим излучения с контролируемыми параметрами частоты и фазы приводит не только к увеличению количества «степеней свободы» за счет вариации в соотношениях «период колебаний–длительность импульса», но также оказывается возможной реализация методов сейсмической томографии с учетом специфического хода «интерференционных максимумов», образующих линии равных фаз на «муаровых картинах» в рельефе двумерного изображения отклика при пространственном сканировании антенны.

Полученные расчетные формулы (5), (6) (допускающие замену $\sin^2 \rightarrow \cos^2$) используются для численного моделирования двумерного пространственного распределения суммарного отклика — осциллограммы эхо-сигнала $V_{\Sigma \sin}(n, m)$. Вместо операции $\operatorname{Re}(f)$ в формулах (5), (6) возможно применение $\operatorname{Mod}(f)$.

3. Некоторые результаты моделирования

Результаты моделирования представлены далее в виде двумерных картин распределения $|V_{\Sigma \sin}(n, m)|$, при этом графическое построение двумерного пространственного образа выполнено с помощью расчетных формул (5), (6). Вначале рассмотрено волновое распространение в простейшем случае —

в бездиссипативной среде, в которой $\Theta = 0$. Так, на рисунке 2 двумерное распределение сигнала на выходе антенны получено по формуле (5) и приведено в координатах «время задержки (продольная ось)–координата центра приемной антенны при ее дискретном смещении (сканировании) над областью аномалии (поперечная ось)». Рисунок 2а соответствует профилю неоднородности с \cos^2 (с двумя максимумами в коэффициенте отражения) — двугорбому рельефу, рисунок 2б — профилю неоднородности с \sin^2 , при этом рельеф распределения отклика имеет один основной максимум и два боковых. Дистанция источник–неоднородность соответствовала глубине залегания $h = 2,75$, безразмерная длительность излучаемого сигнала равнялась $\tau_0 = 0,1$, шаги дискретизации составляли: $\varepsilon = 0,05$ (по времени), $\Delta = 0,05$ (по пространственной координате).

Можно видеть, что форма распределения эхо-сигнала — отклика на выходе антенны, в области максимума при выбранной глубине h связана с характером профиля, соответствующего пространственному распределению коэффициента отражения в каждом из рассмотренных случаев. Следовательно, при умеренных значениях заглупления неоднородности h регистрация отраженного импульсного сигнала и последующее двумерное представление совокупности осциллограмм на плоскости $(x = n \cdot \Delta \cdot L, t = m \cdot \varepsilon \cdot \tau_0)$ позволяют получить признаки, полезные для интерпретации формы или профиля неоднородности по виду рельефа, образуемому максимумом уровня суммарного отклика на выходе антенны.

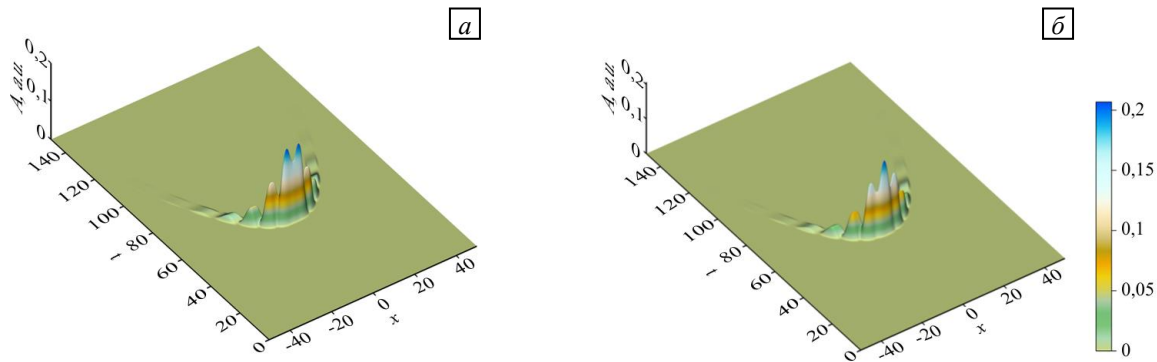


Рис. 2. Двумерное распределение на плоскости $x = n \cdot \Delta \cdot L, t = m \cdot \varepsilon \cdot \tau_0$ уровня A суммарного сигнала (в произвольных единицах – arbitrary units) на выходе антенны $|V_{\Sigma \sin}(n, m)|$ при длительности импульса $\tau_0 = 0,1$, дистанции $h = 2,25$, внутреннем масштабе $\rho = 1,15$, внешнем масштабе $\rho_0 = 3,5$; неоднородность с профилем \cos^2 (а) и с профилем \sin^2 (б)

Представляет интерес результат моделирования, когда в среде возможно присутствие двух неоднородностей идентичного вида, залегающих на горизонтах, отличающихся глубиной. При построении двумерного рельефа в этом случае необходимо принимать во внимание фактор поглощения при распространении зондирующей волны в среде, характеризующейся декрементом $\Theta = 0,1$. Расчет был выполнен по формуле (5) применительно к двум одинаковым неоднородностям, находящимся одна под другой на разных горизонтах: $h_1 = 2,25$ и $h_2 = 9,75$. Изображение двумерного пространственного распределения представлено на рисунке 3. Из рисунка видно, что отличительной особенностью двумерного пространственного распределения является не только нарастание времени задержки поступления импульсов, отраженных неоднородностью, расположенной дальше от источника излучения, но и снижение уровня отклика, а также уменьшение кривизны линии, вдоль которой на плоскости (x, t) строятся сигналы–отклики.

Из рисунка 3а видно, что тонкая структура, обозначенная в центре рельефа \sin^2 для отклика, отраженного на незначительной глубине $h_1 = 2,25$, уже слабо просматривается в рельефе отклика, обусловленного отражением от границы, залегающей глубже: $h_2 = 9,75$. Тем самым демонстрируется «замывание» тонкой структуры в рельефе двумерного распределения, имеющее следствием потерю разрешающей способности при зондировании неоднородности, располагающейся на большем удалении от приемоизлучающего устройства. Последнее объясняется обеднением спектрального состава сейсмоакустического сигнала, отраженного неоднородностью с большей глубины вследствие его поглощения в процессе волнового распространения. Вместе с тем, из сравнения рельефов, соответствующих зондируемым профилям \sin^2 и \cos^2 , видно, что для их взаимного различения (распознавания по существенно разным конфигурациям границ, а не по мелким деталям) пространственное

разрешение по координате x достаточное не только на глубине h_1 , но даже и на более удаленном горизонте — на глубине h_2 .

Потеря пространственного разрешения по мере удаления неоднородности от приемозлучающей системы проявляется еще заметнее при зондирующем сигнале в форме радиоимпульса (см. формулу (6)), то есть импульса с несущей частотой ω_0 (в безразмерных переменных κ_0), превышающей эффективную ширину полосы видеоимпульсного сигнала $\sim 2\pi/T$, имевшей место в рассмотренном выше случае.

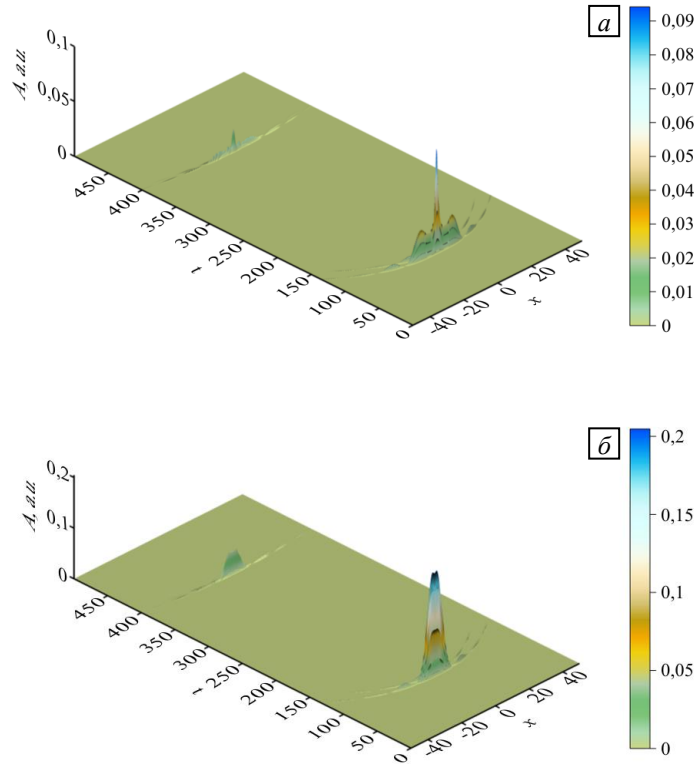


Рис. 3. Двумерное распределение суммарного сигнала на выходе антенны при волновом отражении от двух неоднородностей с профилями вида \sin^2 (а) и \cos^2 (б), залегающих на глубинах $h_1 = 2,25$ (а) и $h_2 = 9,75$ (б), при масштабах $\rho = 1,25$, $\rho_0 = 1,5$, декременте поглощения $\Theta = 0,1$, длительности импульса $\tau_0 = 0,1$

На рисунке 4 представлены рельефы суммарного отклика на импульс с несущей частотой $\kappa_0 = 6\pi/\tau_0$, в которых неоднородности с одинаковым профилем \sin^2 разнесены по глубине более, чем втрое, то есть при $h_1 = 2,25$ и $h_2 = 7,5$ и наличии поглощения в среде. По виду откликов, соответствующих одинаковому профилю, можно заключить, что в случае большего заглубления возникает огрубление рельефа, пропадают резкие изменения в его форме, свидетельствующие о снижении разрешающей способности.

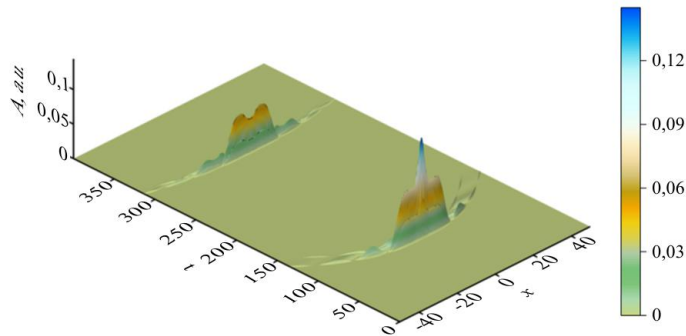


Рис. 4. Двумерное распределение уровня суммарного сигнала на выходе антенны при зондирующем импульсе с несущей частотой $\kappa_0 = 6\pi/\tau_0$ и неоднородностях с одинаковым профилем \sin^2 , но залегающих на разных глубинах: $h_1 = 2,25$, $h_2 = 7,5$

Для оценки линейного масштаба разрешения, достигаемого по координате x , можно исходить из существующего классического критерия (по аналогии с оптикой), определяющего линейные масштабы разрешения дифракционных максимумов на голограмме при излучении щелью [17]:

$$l_{\min} = \frac{\lambda}{D} r_s, \quad (7)$$

где l_{\min} — минимальное расстояние между соседними максимумами, λ — длина волны, D — ширина щели, r_s — расстояние от голограммы до щели.

Переход к рассматриваемому в данной работе виду неоднородности, в котором H аналогично r_s , L аналогично D , позволяет придти к формуле для оценки минимального расстояния между максимумами (в коэффициенте отражения) в области неоднородности, которые могут быть установлены при сейсмоакустическом зондировании:

$$l_{\min} = \frac{cT}{L} H, \quad (8)$$

или в безразмерных переменных:

$$\left. \frac{l}{L} \right|_{\min} = \tau_0 \cdot h. \quad (9)$$

Из формул (8), (9) следует, что минимальное расстояние (масштаб пространственного разрешения) между двумя горбами l_{\min} — это внутренний масштаб неоднородности, на котором максимумы изображены раздельно в рельефе суммарного отклика антенны, и он будет нарастать линейно с увеличением реальной глубины залегания H локальной аномалии (в безразмерных единицах — с ростом h).

Если не фиксировать длительность τ_0 , а рассматривать ее как варьируемый параметр, зависящий от декремента поглощения Θ и от глубин, выбираемых в залежи для обзора с целью выявления локальных неоднородностей (в предположении, что диссипация волновой энергии при распространении в среде является доминирующим фактором ослабления), то в соответствии с зависимостью спада уровня зондирующего сигнала от исходного значения A_0 до уровня $A_{\text{microseism}}$:

$$\frac{A_{\text{microseism}}}{A_0} = e^{-\frac{\Theta H}{cT}}, \quad (10)$$

и в развитие формулы (9) нетрудно придти к выражению для приближенной оценки:

$$\left. \frac{l}{L} \right|_{\min} = \frac{\Theta \cdot h^2}{\ln(A_0/A_{\text{microseism}})}. \quad (11)$$

Продемонстрированные отклики, отраженные одновременно с двух горизонтов, получены без учета «эффекта затенения» (или экранирования) первичного излучения, падающего на неоднородность, лежащую более глубоко, чем ближняя к устройству, подающему сигнал. Именно последняя является экраном, поскольку находится на пути распространения зондирующей волны. В тех случаях, когда разнесение неоднородностей по глубине превышает условную «длину волны», игнорирование эффекта затенения при расчетах двумерного распределения отклика на антенне не ведет к значительным нарушениям. Однако при меньшем расстоянии между локальными дефектами возникает некорректность моделирования, требующая учета волнового прохождения сквозь менее заглубленный из них, а также рассеяния и дифракции на его краях.

В осуществленных расчетах экранирование во внимание не принимается, предполагается «прозрачность» лежащей ближе к источнику излучения неоднородности, то есть она пропускает сигнал, идущий сквозь нее в прямом направлении, к более заглубленной.

Если допустить, что при построении двумерного распределения, зарегистрированного в реальных условиях (в присутствии сплошного заполнения зондируемого полупространства последовательно

сменяющимися друг друга бесконечно наслаивающимися протяженными неоднородностями с различной степенью контраста в коэффициенте отражения), результирующая картина, подобная показанной на рисунке 3, представляла бы сложно изрезанную двумерную поверхность, на фоне которой можно было бы выделить основные и побочные максимумы откликов, обусловленных сигналами, отраженными от прослоев с наибольшим контрастом. Но ввиду усложнений при зондировании осадочной толщи, которые возникли бы на практике, интерес вызывает рассмотрение особенностей двумерного распределения сигналов, отраженных от локальной неоднородности, расположенной глубже экранирующей неоднородности. Таковой в среде может оказаться граница раздела, лежащая ниже аномалии, имеющей поперечный размер большей протяженности. Наличие подобной локальной особенности достаточно вероятно, и необходимость обнаружения целевой — искомой, неоднородности на фоне более сильного отражения от экранирующей — менее заглубленной и более контрастной, является актуальной задачей.

Рисунок 5 содержит двумерное распределение уровней двух сигналов-откликов (рельефы соответствуют профилю локальной неоднородности \cos^2): один отражен от более протяженной и мелко заглубленной неоднородности, другой — от малоразмерной локальной неоднородности, которая залегает на горизонте с вдвое большей глубиной. Как видим, в описываемом здесь идеальном случае для демонстрации обнаружения локальной неоднородности на фоне доминирующего по уровню отклика, обусловленного более протяженной и близлежащей экранирующей границей, оказывается достаточным представление сигнала с антенны в виде двумерного рельефа.

Очевидно, что в условиях реальной среды, включающей подобные границы, для выделения слабого отклика на фоне сильного потребуются использование некоторого усложнения. В частности, для повышения эффективности поиска в полевых условиях возможен подход, совмещающий уже известный (например корреляционный) метод с рассматриваемым в данной работе: сначала излучать последовательность зондирующих посылок с перестраиваемой длительностью импульсов, а затем находить «корреляционную свертку» зарегистрированных откликов. Последнее замечание говорит о необходимости сканирования антенны как вдоль направления x , о чем шла речь выше, так и вдоль дополнительного, перпендикулярного ему направления: по орту y , лежащему также в горизонтальной плоскости, которое обеспечит более полный обзор пространственного распределения дефектов в пласте породы.

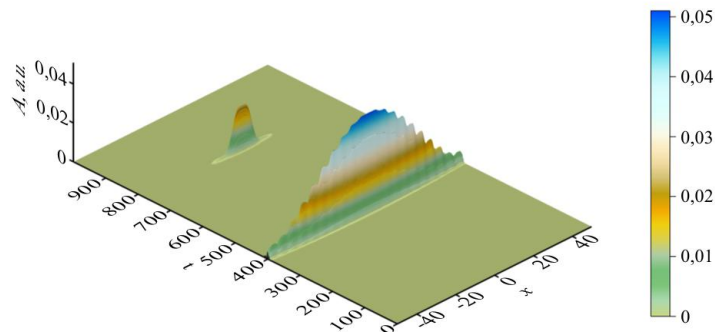


Рис. 5. Двумерное распределение уровня суммарного сигнала с длительность импульса $\tau_0 = 0,5$ на выходе антенны при волновом отражении от двух различающихся масштабами и глубиной залегания неоднородностей: экранирующей ($\rho = 0,5$, $\rho_0 = 3,5$, $h_1 = 9,75$) и целевой ($\rho = 1$, $\rho_0 = 0,25$, $h_2 = 19,5$)

4. Выводы

Для акустического исследования полупространства с целью поиска, обнаружения и идентификации вида локальных неоднородностей (карстовых полостей, провалов, каверн и других аномалий) выведены соотношения, с помощью которых анализируется суммарный эхо-сигнал на выходе приемной антенны, регистрирующей отклик, рассеянный локальной неоднородностью. При импульсном зондировании осадочной толщи предполагается применение приемной антенны, сканирующей полупространство по ограниченному горизонтальному линейному отрезку. В процессе обработки используется двумерное математическое описание суммарного эхо-сигнала, которое позволяет получить рельеф, образуемый суммарным сигналом на выходе антенны на плоскости «координата дискретно перемещаемого центра—время задержки» и рассматривать его в качестве информативного признака для распознавания вида профиля неоднородности.

Результаты численного моделирования демонстрируют случаи расположения локальных неоднородностей на различных глубинах под свободной границей обследуемого полупространства. Проведена количественная оценка зависимости пространственного разрешения при зондировании локальных неоднородностей, расположенных друг под другом на разных горизонтах. На иллюстрациях демонстрируется снижение пространственного разрешения по поперечной координате по мере увеличения глубины расположения неоднородности в среде с диссипативными потерями.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035-2019-0019).

Литература

1. Yaroslavtsev A.G., Bobrov V.Y., Zhikin A.A. Engineering 3D seismic survey on the potash mine territory // Proc. of the 13th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2017. Kislovodsk, Russia, April 24-28, 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700411>
2. Чернышов Г.С., Дучков А.А. Применение метода волновой томографии для обработки данных малоглубинной сейсморазведки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2017. Т. 2, № 4. С. 90-94.
3. Шишкина М.А., Фокин И.В., Тихоцкий С.А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии // Технологии сейсморазведки. 2015. №1. С. 5-21. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2015-1-5-21>
4. Романов В.В. Из опыта комплексного применения сейсморазведки и георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях на территории Москвы // Инженерные изыскания. 2015. № 5-6. С. 44-49.
5. Фокин И.В., Басакина И.М., Капустян Н.К., Тихоцкий С.А., Шур Д.Ю. Опыт применения сейсмической томографии для археологических исследований оснований и фундаментов зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38, № 2. С. 21-34. (English version <https://doi.org/10.3103/S074792391202003X>)
6. Сердюков А.С., Яблоков А.В. Многоканальный анализ поверхностных волн с фокусированием пространственно-временных спектров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2017. Т. 2, № 4. С. 53-57.
7. Давыдов В.А. Обнаружение подземных пустот антропогенного характера с помощью геофизических методов // Инженерные изыскания. 2013. № 7. С. 52-57.
8. Чугаев А.В. Практические аспекты изучения поверхностных волн, регистрируемых при малоглубинных сейсморазведочных исследованиях МОГТ // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Пермь: Изд-во Горн. ин-та УрО РАН, 2004. С. 172-174.
9. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. 1999. Vol. 64, No. 3. P. 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
10. Ковин О.Н., Андерсон Н., Титмакорн Т. 2-D многоканальный анализ поверхностных волн – эффективный метод изучения скоростей верхней части разреза // Горное эхо. 2005. №3 (21). С. 29-35
11. Мешбей В.И. Методика многократных перекрытий в сейсморазведке. М.: Недра, 1985. 264 с.
12. Гольдин С.В. Теория интерпретации в сейсморазведке и сейсмологии. Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2011. 357 с.
13. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 774 с.
14. Урупов А.К. Основы трехмерной сейсморазведки. М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 584 с.
15. Кондратьев О.К. Разрешающая способность сейсморазведки МОВ-ОГТ // Геофизика. 2006. № 2. С. 3-12.
16. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Изд. иностр. лит. 1973. 228 с.
17. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 928 с.

References

1. Yaroslavtsev A.G., Bobrov V.Y., Zhikin A.A. Proc. of the 13th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2017. Kislovodsk, Russia, April 24-28, 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700411>
2. Chernyshov G.S., Duchkov A.A., Serdyukov A.S. Application of wave-equation travelttime inversion for near surface geophysics studies. *Interexpo GEO-Sibir' – Interexpo GEO-Siberia*, 2017, vol. 2, no. 4, pp. 90-94.
3. Shishkina M.A., Fokin I.V., Tikhotskiy S.A. Resolution of cross-well travel-time tomography. *Tekhnologii seysmorazvedki – Seismic Technologies*, 2015, no. 1, pp. 5-21. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2015-1-5-21>
4. Romanov V.V. On the experience of combined application of seismic prospecting and ground penetrating radar for engineering-geological surveys in the territory of Moscow. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2015, no. 5-6, pp. 44-49.
5. Fokin I.V., Basakina I.M., Kapustyan N.K., Tikhotskii S.A., Schur D.Yu. Application of travel-time seismic tomography for archaeological studies of building foundations and basements. *Seism. Instr.*, 2012, vol. 48, pp. 185-195. <https://doi.org/10.3103/S074792391202003X>
6. Serdyukov A.S., Yablokov A.V. Surface waves multichanel analysis using time-spatial power spectrum focusing. *Interexpo GEO-Sibir' – Interexpo GEO-Siberia*, 2017, vol. 2, no. 4, pp. 53-57.
7. Davydov V.A. Detection of anthropogenic underground cavities by means of geophysical methods. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2013, no. 7, pp. 52-57.
8. Chugayev A.V. Prakticheskiye aspekty izucheniya poverkhnostnykh voln, registriruyemykh pri maloglubinnykh seysmorazvedochnykh issledovaniyakh MOGT [*Practical aspects of the study of surface waves recorded during shallow seismic surveys of the MOGT*] // Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov [Strategy and processes for the development of geo-resources]. Perm', Izd-vo Gorn. in-ta UrO RAN, 2004. Pp. 172-174.
9. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 1999, vol. 64, no. 3, pp. 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>

10. Kovin O.N., Anderson N., Titimakorn T. 2-D mnogokanal'nyy analiz poverkhnostnykh voln – effektivnyy metod izucheniya skorostey verkhney chasti razreza [2-D multichannel analysis of surface waves - an effective method for studying the velocities of the upper part of the section]. *Gornoye echo*, 2005, no.3 (21), pp. 29-35
11. Meshbey V.I. *Metodika mnogokratnykh perekrytiy v seysmorazvedke* [Multiple overlap technique in seismic exploration]. Moscow, Nedra, 1985. 264 p.
12. Gol'din S.V. *Teoriya interpretatsii v seysmorazvedke i seysmologii* [Interpretation theory in seismic and seismology]. Novosibirsk, INGG SO RAN, 2011. 357 p.
13. Boganik G.N., Gurvich I.I. *Seysmorazvedka* [Seismic exploration]. Tver', AIS, 2006. 774 p.
14. Urupov A.K. *Osnovy trekhmernoy seysmorazvedki* [Basic 3D seismic]. Moscow, FGUP Izd-vo «Nef' i gaz» RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2004. 584 p.
15. Kondrat'yev O.K. Razreshayushchaya sposobnost' seysmorazvedki MOV-OGT [The resolution of seismic exploration MOV-OGT]. *Geofizika – Russian Geophysics*, 2006, no. 2, pp. 3-12.
16. Dwight H.B. *Tables of integrals and other mathematical data*. N.Y., The MacMillan Company, 1961. 288 p.
17. Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Nauka, 1976. 928 p.

Поступила в редакцию 04.09.2019; после доработки 18.11.2019; принята к опубликованию 18.11.2019