

Полноволновая сейсмика

Выделение границ геологических слоев на высокопроизводительных вычислительных комплексах

Василий Голубев, Николай Хохлов, Игорь Петров, Инга Хромова

В статье приводится метод полноволнового моделирования процесса распространения сейсмических волн в геологических средах с криволинейными границами раздела слоев. Его применение позволяет с высокой степенью точности описать геометрию слоистой среды и визуализировать динамические процессы в виде волновых картин и поверхностных синтетических сейсмограмм. Использование высокопроизводительных вычислительных систем делает возможным оперативный расчет моделей реалистичного масштаба. Приведены результаты таких расчетов по участку слоистой среды, расположенному на территории Ненецкого автономного округа.

Ключевые слова: сейсмическая разведка, математическое моделирование, высокопроизводительные вычислительные системы, параллельные алгоритмы.

Основной задачей сейсморазведки как наиболее распространенного метода поиска и разведки нефти и газа является определение структуры подповерхностного пространства по данным наземных (в том числе скважинных) наблюдений. Важной составляющей решения данной задачи является описание процесса распространения сейсмических волн от источника вглубь геологической среды. Решение прямых задач сейсморазведки может быть использовано для уточнения запасов углеводородов в районах с большим числом эксплуатируемых скважин, построения синтетических сейсмограмм для нужд региональной сейсморазведки, уточнения присутствия углеводородов и их характеристик в известной геологической структуре.

С развитием вычислительных технологий (появление супер-ЭВМ, как на центральных процессорах, так и с использованием графических процессоров (GPU)) произошло значительное усложнение математических моделей, описывающих данный процесс, и повысилась точность его моделирования. К настоя-

щему времени разработано множество разнообразных подходов в области численного моделирования процесса распространения сейсмических волн в геологических средах [1, 2]. При этом чем выше порядок используемого численного метода, тем меньше численная вязкость схемы и с меньшими искажениями фронтов происходит распространение волн на расстояния порядка сотен и тысяч их длин. В связи с этим наиболее популярными в вычислительной геофизике стали разновидности конечно-разностного (FDM) и спектрального методов (SEM), а также разрывный метода Галеркина (DGM) [3, 4]. Параллельно с ними активно развивается сеточно-характеристический подход на структурированных [5, 6] и неструктурированных сетках [7], который позволяет проводить явное выделение контактных поверхностей раздела сред и различных неоднородностей.

В работе приведены результаты применения нового метода моделирования [5] сейсмических волн в геологических средах с произвольными границами раздела к участку слоистой среды, расположенному на севере Тимано-Печорского НГБ.

Таблица 1

Упругие параметры геологических слоев модели

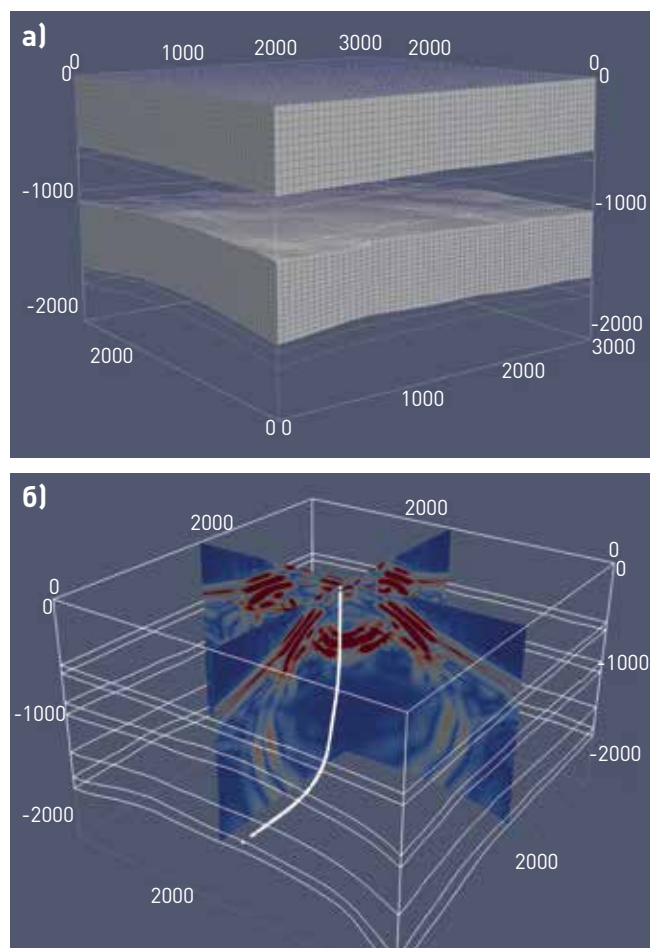
Номер слоя	V_p , м/с	V_s , м/с	ρ , кг/м ³
1	2170	674	2000
2	2130	795	2300
3	2500	1090	2200
4	2680	1220	2300
5	3000	1385	2400
6	5550	3144	2700
7	6000	1250	2800
8	6000	1550	2850

Геология исследуемого участка

В административном отношении изучаемый участок расположен на северо-востоке Европейской части Российской Федерации, на территории Ненецкого автономного округа, севернее Полярного круга, практически на берегу Баренцева моря. В тектоническом отношении исследуемый район находится в северной части вала Сорокина, который является западным ограничением крупнейшего надпорядкового элемента Печорской плиты – Варандей-Адзвинской структурной зоны.

Рисунок 1

Гексаэдральная сетка, состоящая из отдельных геологических слоев и покрывающая расчетную область (а) и волновая картина в фиксированный момент времени (б)



Фундамент территории относится к зоне байкалида, разделяющих блоки раннепротерозойского эпикарельского фундамента Восточно-Европейской платформы, подвергшихся частичной переработке на этапе байкальской складчатости. В строении осадочного чехла принимают участие терригенно-карбонатные отложения фанерозоя: преимущественно карбонатные палеозойские и терригенные отложения мезозоя-кайнозоя.

Модель, участвующая в расчетах, охватывает верхнюю часть осадочного чехла — от дневной поверхности до кровли карбонатного палеозойского комплекса. Самая нижняя часть модели включает карбонатные отложения верхнего отдела каменноугольной системы, ассельского, сакмарского и артинского ярусов нижнего отдела пермской системы. Этот интервал охарактеризован тремя структурными поверхностями и заключенными между ними пластами с упругими свойствами высокоскоростных карбонатных пород: скорости продольных волн 5550–6000 м/с, скоро-

Василий Голубев — к. ф.-м. н., старший научный сотрудник.

Николай Хохлов — к. ф.-м. н., старший научный сотрудник.

Игорь Петров — д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН, ведущий научный сотрудник.

Сферы профессиональных интересов первых трех авторов: компьютерное моделирование, численные методы, параллельные алгоритмы, сейсмическая разведка. Место работы: лаборатория прикладной вычислительной геофизики МФТИ.

Инга Хромова — к. г.-м. н., эксперт, независимый консультант (ИП Хромова И. Ю.). Сферы профессиональных интересов: геология, карбонатные резервуары, интерпретация сейсмических данных.

FULL WAVEFORM SEISMIC

Explicit description of geological layers boundaries using high-performance computing systems

The article describes a full waveform modelling method for seismic wave propagation in geological media with curvilinear bedding interfaces. Its use makes it possible to describe, with a high degree of accuracy, the geometry of the layered media and to visualize dynamic processes in the form of wave patterns and surface synthetic seismograms. The use of high-performance computing systems makes computations of models of a realistic scale possible. The results of such computations for a layered media section in the Nenets Autonomous District are presented.

Key words: seismic survey, mathematical modelling, high-performance computing systems, parallel algorithms.

Vasily Golubev, Nikolay Khokhlov, Igor Petrov, Inga Khromova

сти поперечных волн 1250–3150 м/с, плотность 2700–2850 г/см³. Информация о значениях упругих свойств пород извлечена из данных широкополосного акустического каротажа, проведенного во многих скважинах вала Сорокина. Высокая вариабельность скоростей поперечных волн обусловлена резкой литологической изменчивостью пород, сформировавшихся в различных фациальных обстановках осадконакопления.

Средняя часть модели построена четырьмя структурными поверхностями и заключенными между ними пластами с терригенными породами среднего и верхнего отдела пермской системы, триасовой и юрской систем. В упругих параметрах наблюдается закономерное увеличение значений сверху вниз по мере уплотнения пород с погружением: скорости продольных волн увеличиваются от 2130 до 3000 м/с, скорости поперечных волн возрастают от 795 до 1385 м/с, плотности возрастают от 2200 до 2400 г/см³. Небольшая инверсия плотностей, наблюдаемая вверху описываемого

интервала, обусловлена преимущественно песчаным составом верхнего пласта относительно преимущественно глинистого пласта, расположенного под ним. Для этой части модели информация о значениях упругих свойств пород также извлечена из данных широкополосного акустического каротажа, замеренного на этом участке.

Верхняя часть модели заключена между дневной поверхностью и первой структурной поверхностью модели, то есть является самым первым слоем модели. Этот слой выделен в силу того, что в нем наблюдаются повышенные значения скоростей продольных волн относительно подстилающего слоя 2170 м/с, то есть под ним наблюдается инверсия скорости, что является следствием влияния многолетнемерзлых пород. Вторая причина заключается в том, что информация об упругих свойствах в этом интервале взята из скважины, расположенной в сотнях километров от изучаемого участка. Как правило, широкополосный акустический каротаж не проводится в первых 500 м от поверхности земли из-за недопустимо большого для этого метода диаметра скважины на этой глубине. Поэтому такие замеры крайне редки и производятся только в уникальных, специально пробуренных пилотных стволах. Авторы посчитали возможным использовать замеры от удаленной скважины для этой части модели, исходя из предположений об интегральной выдержанности литологического состава меловых и четвертичных отложений и повсеместном распространении многолетнемерзлых пород на больших территориях Тимано-Печорского НГБ.

Математическая модель

Модель, описывающая участок геологического массива, состояла из восьми трехмерных слоев с криволинейными границами. Для описания динамических процессов использовалась математическая модель линейно-упругого изотропного тела с явным выделением контактных границ слоев. Динамическое поведение бесконечно малого объема среды описывается уравнениями упругости (1).

Таблица 2

Технические характеристики счетных узлов кластера НРС2

Параметр	Значение
Количество процессоров на узел	2
Количество ядер на узел	8
Оперативная память на узел, Гб	16
Оперативная память на ядро, Гб	2
Локальная дисковая память на узел, Гб	120
Общее количество узлов	1280
Общее количество процессоров	2560
Общее количество ядер	10 240
Общая пиковая производительность, TFlop/s	122,9

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = q_{ijkl} \frac{\partial e_{kl}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$q_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}),$$

где ρ — плотность среды, V — скорость среды, σ — тензор деформаций, x — координата, q — тензор четвертого порядка, определяющий реологию среды, e — тензор деформаций, δ — символ Кронекера, λ и μ — упругие параметры Ламе.

Упругие параметры всех геологических слоев представлены в таблице 1 (номер слоя возрастает с глубиной его залегания). Отметим, что, в отличие от распространенного на практике акустического приближения геологической среды, решение полной упругой системы позволяет получить все типы волн: объемные продольные и поперечные, поверхностные (Рэлея и Лява), отраженные, рассеянные, дифрагированные.

В качестве источника возбуждения использовался поверхностный взрыв, расположенный в центре области (горизонтальная проекция), моделируемый вертикальной нагрузкой поверхности со временной зависимостью в виде импульса Риккера с частотой 30 Гц. Время физического эксперимента составляло 2 с и было достаточным для того, чтобы зарегистрировать на поверхности отклики от контактных границ.

Численный метод

Аналитическое решение системы (1) может быть получено только в простейших случаях (однородная или параллельно-слоистая среда, точечный источник возбуждения или плоская волна). На практике такие случаи встречаются крайне редко. В нашем случае решение системы уравнений (1) возможно только численными методами. Расчеты проводились на гексаэдральных сетках. На каждый слой модели была построена криволинейная структурная сетка таким образом, что вся модель содержала порядка 150 миллионов расчетных узлов (601x601x421 по осям соответственно). Дневная поверхность считалась плоской, а нижняя граница модели соответствовала глубине 2100 м. Для устранения нефизических границ (нижняя и боковые) на них использовалось условие поглощения, позволяющее эффективно подавить отражение от них.

Определяющая система является гиперболической, и для ее решения в работе использовался сеточно-характеристический метод. После расщепления по направлениям и перехода в пространство инвариантов Римана задача сводится к последовательному решению набора одномерных уравнений

переноса. В работе использовалась сеточно-характеристическая схема третьего порядка точности по пространству, которая для одномерного уравнения переноса

$u_t + au_x = 0, a > 0, \sigma = at/h,$
 где τ — шаг по времени, h — шаг по координате, имеет вид:

$$u_m^{n+1} = u_m^n + \sigma(\Delta_0 + \Delta_2)/2 + \sigma^2(\Delta_0 - \Delta_2)/2 + \frac{\sigma(\sigma^2 - 1)}{6}(\Delta_1 - 2\Delta_0 + \Delta_2),$$

$$\Delta_0 = u_{m-1}^n - u_m^n,$$

$$\Delta_1 = u_{m-2}^n - u_{m-1}^n,$$

$$\Delta_2 = u_m^n - u_{m+1}^n.$$

Схема устойчива для чисел Куранта, не превышающих единицу, имеет третий порядок точности по координате и времени. Для монотонизации используется сеточно-характеристический критерий монотонности, опирающийся на характеристическое свойство точного решения:

$$\min\{u_m^n, u_{m-1}^n\} \leq u_m^{n+1} \leq \max\{u_m^n, u_{m-1}^n\}$$

В местах выполнения данного критерия порядок схемы падает до второго.

Для явного выделения границ между геологическими слоями после каждого шага вычислительного алгоритма, рассчитывающего значения в точках, лежащих внутри слоев, производится дополнительная корректировка в узлах на контактной границе. При полном слипании скорости v на обеих поверхностях контакта совпадают, кроме того, выполняется третий закон Ньютона:

$$v^a = v^b = v, f^a = -f^b, \quad (3)$$

где верхние индексы a и b относятся к разным сторонам контакта.

Корректировка заключалась в выставлении скорости на границе контакта, чтобы после использования формул (1) – (3) выполнялись условия полного слипания. Скорость v определяется по формуле:

$$v = \frac{1}{\rho_a c_{a2} + \rho_b c_{b2}} \{ \rho_a [(n v_a)(c_{a1} - c_{a2})n + c_{a2} v_a] + \rho_b [(n v_b)(c_{b1} - c_{b2})n + c_{b2} v_b] - (\sigma_a - \sigma_b)n - \frac{\rho_a(c_{a1} - c_{a2}) + \rho_b(c_{b1} - c_{b2})}{\rho_a c_{a1} + \rho_b c_{b1}} n(n \cdot [\rho_a c_{a1} v_a + \rho_b c_{b1} v_b - (\sigma_a - \sigma_b)n]) \}, \quad (4)$$

в которой c_1, c_2 — соответственно продольная и поперечная скорости звука в средах, ρ — плотность среды, n — направление нормали от границы a к границе b .

Использованные вычислительные ресурсы

Все расчеты проводились на кластере НРС2 центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских уста-

новок мегакласса», созданного на базе Курчатовского центра обработки данных (<http://computing.kiae.ru>). Высокопроизводительный вычислительный кластер НРС2 второго поколения с пиковой производительностью 122,9 TFlop/s сдан в эксплуатацию в сентябре 2011 года. В 15-й редакции российского рейтинга суперкомпьютеров top50

(<http://top50.supercomputers.ru/?page=rating>) он занимает позицию № 2. Кластер состоит из 1280 счетных двухпроцессорных узлов (Intel Xeon E5450, 3,00 ГГц, 4 ядра), объединенных высокопроизводительной сетью передачи данных и сообщений

InfiniBand DDR, имеет суммарную оперативную память 20,5 Тбайт и систему хранения данных на 144 Тбайт. На счетных узлах кластера установлена операционная система Linux (CentOS). Система хранения данных построена на параллельной файловой системе Lustre 2.0. Для управления распределением ресурсов и выполнением счетных заданий используется менеджер ресурсов SLURM. Параметры использованного вычислительного кластера представлены в таблице 2.

Результаты расчетов

В работе был проведен полномасштабный расчет распространения сейсмических волн в описанной модели от дневной поверхности вглубь среды. На рисунке 1а представлена изометрия модели с расчетной сеткой. Для наглядности число узлов в каждой сетке значительно снижено. На рисунке 1б представлена волновая картина (распределение по пространству модуля скорости) в среде. Белой линией также показана траектория скважины, по измерениям в которой определялась часть упругих свойств в модели.

На рисунке 2 приведены синтетические сейсмограммы [8], построенные по значениям вектора скорости, зарегистрированным на поверхности.

Использовалась линейная установка из 301 трехкомпонентного сейсмоприемника с шагом 10 м вдоль оси ОХ (центральный профиль). Слева представлена вертикальная компонента,

справа — горизонтальная. Поскольку амплитуда источника намного превышает амплитуду сейсмических откликов на сейсмограммах, сигнал обрзан по уровням 1% и 99%.

На обеих картинах видны сейсмические отклики, пришедшие к поверхности на временах порядка: 0,7 с, 1,0 с и 1,4 с. Хотя на горизонтальной компоненте они и видны, но со значительно меньшей амплитудой, что можно объяснить

незначительным отклонением геологических границ от горизонтали. Кроме того, четко видна волна Рэлея, распространяющаяся от источника вдоль дневной поверхности. Таким образом, прямым численным расчетом показана возможность построения синтетических сейсмограмм, содержащих все физические волны, в слоистых средах с криволинейными границами.

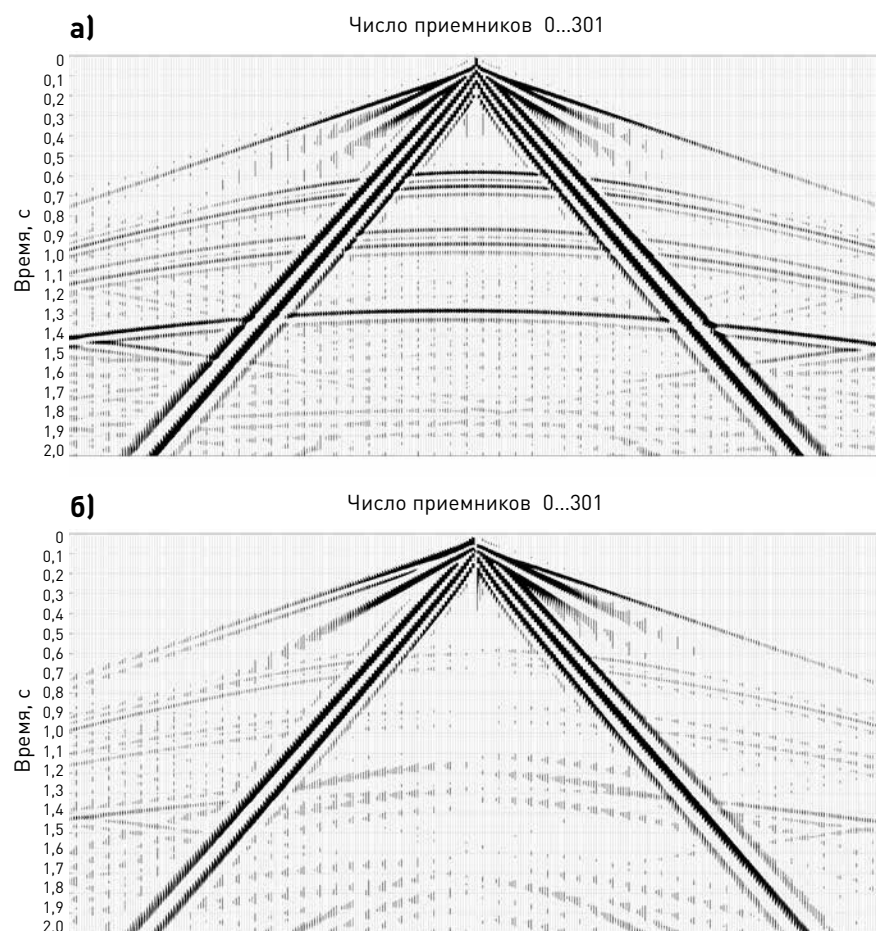
Необходимо отметить, что распространен подход, когда численный расчет проводится на кубических сетках без явного выделения контактных границ. При этом используются разностные схемы, которые приспособлены для расчетов в ситуации, когда параметры материалов среды меняются от узла к узлу расчетной сетки. Данный метод получил название «метод сквозного счета». При этом очевидно, что при описании криволинейной границы (то есть задания положения одного материала над поверхностью раздела и другого под ней) в рамках данного метода точность задания ее положения будет составлять порядка шага ячейки, а сама граница раздела будет выглядеть «шероховатой». Для оценки того, насколько данная «неточ-

ность» модели существенна, был проведен расчет на кубической сетке с использованием той же разностной схемы, что использовалась в описываемом в работе методе.

Геометрия расчетной области представляла собой куб размерами 3000x3000x2100 м, покрытый кубической расчетной сеткой с шагом 5 м. В диапазонах глубин, соответствующих каждому из слоев модели, задавались упругие параметры среды (табл. 1). Сравнительный анализ полученных результатов (табл. 3) выявил следующие закономерности:

- синтетические сейсмограммы, построенные обоими методами, содержат одинаковые типы волн, приходящих в те же самые моменты времени, и визуально совпадают;
- время расчета методом сквозного счета примерно в 9 раз меньше времени расчета с явным выделением границ;
- в то время как времена прихода сейсмических откликов совпадают с хорошей степенью точности, разница в регистрируемой амплитуде сигнала может достигать 30%.

Рисунок 2
Вертикальная V_z (а) и горизонтальная V_x (б) компоненты скорости



Заключение

Приведенный метод полномасштабного моделирования процесса сейсмической разведки является более точным способом генерации синтетических сейсмограмм в условиях геологического массива с границами слоев произвольной формы. Его применение к данным по исследуемому участку позволило корректнее оценить амплитуду сейсмических откликов. Поскольку современные методы миграции и инверсии (решения обратной задачи сейсмической разведки) работают не только со временами прихода сигналов, но и с их амплитудной составляющей, использование описанного метода на этапе расчета прямой задачи может повысить точность построения геологических моделей. Отметим также, что, хотя использование данного метода повышает вычислительную сложность задачи, при современном уровне развития высокопроизводительных вычислительных систем этот факт не должен являться решающим при выборе подходящего инструмента для промышленных расчетов. ♦

Таблица 3
Сравнение метода с явным выделением границ и сквозного счета

Характеристика	Метод расчета	
	Сквозной счет	Явное выделение границ
Время расчета (2000 ядер), с	815	7415
Использованная память, Гб	21,7	47,5
Разница в максимальной амплитуде 1 отражения (V_z)	22%	
Разница в максимальной амплитуде 2 отражения (V_z)	26%	
Разница в максимальной амплитуде 3 отражения (V_z)	30%	

Литература

1. Carcione José M., Herman Gérard C., ten Kroode A. P. E. Y2K Review Article. Seismic modeling // *Geophysics*, Т. 67, No 4, 2002. – С. 1304–1325.
2. Virieux Jean, Calandra Henri, Plessix René Édouard. A review of the spectral, pseudo-spectral, finite-difference and finite-element modelling techniques for geophysical imaging // *Geophysical Prospecting*, Т. 59, No 5, 2011. – С. 794–813.
3. Etienne V., Chaljub E., Virieux J., Glinsky N. An hp-adaptive discontinuous Galerkin finite-element method for 3D elastic wave modelling // *Geophys. J. Int.*, Т. 183, No 2, 2010. – С. 941–962.
4. Hermann Verena, Káser Martin, Castro Cristóbal E. Nonconforming hybrid meshes for efficient 2-D wave propagation using the Discontinuous Galerkin Method // *Geophys. J. Int.*, Т. 184, No 2, 2011. – С. 746–758.
5. Голубев В.И., Петров И.Б., Хохлов Н.И. Моделирование волновых процессов внутри планеты с помощью гибридного сеточно-характеристического метода // *Математическое моделирование*, Т. 27, № 2. 2015. – С. 139–148.
6. Голубев В.И., Петров И.Б., Хохлов Н.И., Шульц К.И. Численный расчет волновых процессов в трещиноватых средах на гексаэдральных сетках сеточно-характеристическим методом // *Журнал вычислительной математики и математической физики*, Т. 55, № 3, 2015. – С. 512–522.
7. Kvasov I.E., Pankratov S.A., Petrov I.B. Numerical simulation of seismic responses in multilayer geologic media by the grid-characteristic method // *Mathematical Models and Computer Simulations*, Т. 3, No 2, 2011. – С. 196–204.
8. Голубев В.И. Методика отображения и интерпретации результатов полноволновых сейсмических расчетов // *Труды МФТИ*, Т. 6, № 1, 2014. – С. 154–161.