

ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ В ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

Дарья Леонидовна Пинигина

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, ассистент кафедры ВТ, тел. (923)157-55-95, e-mail: daria.pi789@gmail.com

Оксана Андреевна Копылова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, e-mail: okskplv@gmail.com

Марат Саматович Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: marat@opg.sscs.ru

В данной работе предложен подход к расчету и оценке локальных скоростей сейсмических Р-волн в вулканической зоне на основе использования сеточного метода. Численный алгоритм протестирован на экспериментально полученных временах вступления Р-волн от вибрационного источника типа СВ-10/100 для грязевого вулкана Гора Карabetова. Регистрация осуществлялась 35 регистраторами при зондировании из 5 пунктов расположения вибратора в диапазоне частот 10-60 Гц. Из результатов численного моделирования вытекает, что выделение нелинейности в годографе сейсмических Р-волн в области вулканической постройки возможно при количестве узлов сетки от 60x60 и более, что соответствует 31,2 м по оси Ох и 48,1 м по оси Оу. Полученные результаты распределения локальных скоростей согласуются с ранее полученной геологической структурой изучаемой области и свидетельствуют о наличии более высоких скоростей в области нахождения антиклинальной складки, проходящей через зону вулкана.

Ключевые слова: численный алгоритм, обратная задача, сеточный метод, вибрационное зондирование, грязевые вулканы

NUMERICAL ALGORITHM FOR ESTIMATING THE VELOCITY CHARACTERISTICS OF THE MEDIUM IN THE VOLCANIC ZONE

Daria L. Pinigina

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Assistant, phone: (923)157-55-95, e-mail: daria.pi789@gmail.com

Oksana A. Kopylova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, e-mail: okskplv@gmail.com

Marat S. Khairtdinov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, e-mail: marat@opg.sscs.ru

This paper proposes an approach to the calculation and assessment of local velocities of seismic P-waves in a volcanic zone based on the use of the grid method. The numerical algorithm is tested on the experimentally obtained arrival times of P-waves from a vibration source of the SV-10/100 type for the mount Karabetova mud volcano. Registration was carried out by 35 receivers during sounding from 5 points of the vibrator in the frequency range of 10-60 Hz. It follows from the results of numerical modeling that the selection of nonlinearity in the travel time curve of seismic P-waves in the area of a volcanic edifice is possible with the number of grid nodes from 60x60 or more, which corresponds to 31.2 m along the X-axis and 48.1 m along the Y-axis. The obtained results of the distribution of local velocities are consistent with the previously obtained geological structure of the study area and indicate the presence of higher velocities in the area of the anticlinal fold passing through the volcano zone.

Keywords: numerical algorithm, inverse problem, grid based method, vibration sounding, mud volcanoes

Введение

Одним из важных вопросов в решении обратных задач в сейсмологии, связанных с определением географических и энергетических характеристик источника, является получение априорных сведений о скоростях распространения сейсмических волн. Наряду с уровнями внешних шумов, геометрией расстановки регистрирующих датчиков и др., полнота наличия сведений о скоростных характеристиках определяет точность решения обратной задачи. Получение таких сведений осложняется по отношению к средам с резко выраженной гетерогенностью строения. Это характерно, в частности, для сред в районах вулканических построек, включая грязевые вулканы [1, с. 178-185]. Задача уточнения скоростной характеристики среды изучена на примере вулканической зоны грязевого вулкана гора Карabetова (Таманская грязевулканическая провинция).

Методы и материалы

Целью данной работы является построение численной модели локальных годографов сейсмических P-волн, характерных для областей грязевых вулканов, по экспериментально полученным временам вступлений P-волн от вибрационных источников.

Задача оценивания неизвестных локальных скоростей сейсмических волн в неоднородной среде сводится к решению нелинейной системы уравнений:

$$\vec{t} = \vec{\eta}(X, \theta) + \vec{\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\vec{t} = (t_1, t_2, \dots, t_N)$ — вектор времен вступлений сейсмических волн, $\vec{\eta}(X, \theta)$ — N -мерный вектор вычисляемых времен пробега (теоретический годограф) или функция регрессии, $\vec{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N)^T$ — вектор ошибок, $\vec{\theta} = \left[\begin{matrix} (x_i^*, y_i^*), \vec{V}(v) \end{matrix} \right]^T$, где (x_i^*, y_i^*) — координаты точек излучения ($i = 1, 2, \dots, M$ — количество точек излучения), \vec{V} — вектор средних значений скоростей сейсмических волн в среде, v —

вектор локальных скоростей сейсмических волн; $X = (\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N)$ — матрица координат датчиков, N — число датчиков. При известных (x_i^*, y_i^*) в качестве оцениваемых параметров выступают локальные скорости сейсмических волн \vec{v} .

При оценивании параметров пользуются сведениями о распределении ошибок $\varepsilon_i = t_i(\vec{x}_i, \vec{\theta}) - \eta(\vec{x}_i, \vec{\theta})$. Предполагается, что ε_i — взаимно независимые случайные величины, имеющие распределение с нулевым средним и заданными дисперсиями: $E\varepsilon_i = 0$, $E\varepsilon_i\varepsilon_j = \sigma_i^2\delta_{ij}$, $\sigma_i = \sigma(\vec{x}_i)$, δ_{ij} — символ Кронекера, $i = 1, 2, \dots, N$. В случаях затруднений с заданием дисперсий принимают их равными и получают несмещенную оценку дисперсии наблюдения с единичным весом по ходу решения задачи.

Решение уравнения (1) сводится к решению обратной задачи геофизики [2–4]. Точность решения зависит от таких факторов, как ошибки оценивания вектора времен $\vec{t} = (t_1, t_2, \dots, t_N)$, невязок $\vec{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N)^T$, выбор геометрии расстановки датчиков на дневной поверхности Земли и др. Решение уравнения (1) основано на минимизации невязки между экспериментальным и теоретическим годографами методом наименьших квадратов:

$$\vec{\theta} = \arg \min_{\vec{\theta} \in \Omega} Q(\vec{\theta}), \quad Q(\vec{\theta}) = \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} (t_i - \eta(\vec{x}_i, \vec{\theta}))^2. \quad (2)$$

Существует множество строгих итерационных методов решения задачи (2), такие как метод Гаусса-Ньютона [5], метод обобщенного обращения на основе сингулярного разложения (SVD – разложения) [5, 6], адаптивный метод Качмажа [7] и др. Применение подобных методов осложнено ввиду большой размерности параметров в виде времен вступления волн $\vec{t} = (t_1, t_2, \dots, t_N)$ в задачах мониторинга гетерогенных зон. Упрощение решения такой задачи может быть достигнуто на основе использования эвристического алгоритма при сохранении допустимой точности решения.

В качестве такого метода решения задачи (1) предлагается подход для уточнения скоростных характеристик сложнопостроенных сред на основе разбиения исследуемой области среды на участки, в которых вычисляются локальные скорости сейсмических волн. Уравнение определения средневзвешенной скорости сейсмической волны V_{cell_j} по k -му участку профиля зондирования (на плоскости) выражается формулой [8]:

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \vec{V}_{ij} \cdot \frac{L_{ijk}}{L_{ij}}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{L_{ijk}}{L_{ij}}}, \quad (3)$$

где \vec{V}_{ij} — средняя скорость сейсмической волны от пункта вибрационного зондирования i до регистратора j , L_{ij} — расстояние, пройденное сейсмической вол-

ной от пункта вибрационного зондирования i до регистратора j , L_{ijk} – расстояние, пройденное сейсмической волной от пункта вибрационного зондирования i до регистратора j в k -ом участке профиля зондирования.

Оценивание точности алгоритма сводится к сопоставлению теоретического годографа из формулы (1) с полученным в эксперименте вектором времен вступлений сейсмических волн. Каждый элемент вектора теоретического годографа \vec{t}^* вычисляется по формуле:

$$\vec{t}_i^* = \sum_{k=1}^L \frac{L_{ijk}}{v_k}. \quad (4)$$

Результаты

На рис. 1, *а* приводится карта области грязевого вулкана Гора Карabetова, для профиля вибрационного зондирования (пункты зондирования Т1, Т3, Т5, Т6, Т8 и регистраторы А1-Ф7 или №1-35), а также схема связей «источник–приемник» в декартовых координатах [9] (рис. 1, *б*) в предположении прямолинейности пути волны от источника до приемника. Желтым цветом на рис. 1, *б* указаны регистраторы № 18-23 в зоне вулкана, на которых годограф Р-волн ведет себя нелинейно для всех пунктов зондирования (см. рис. 2).

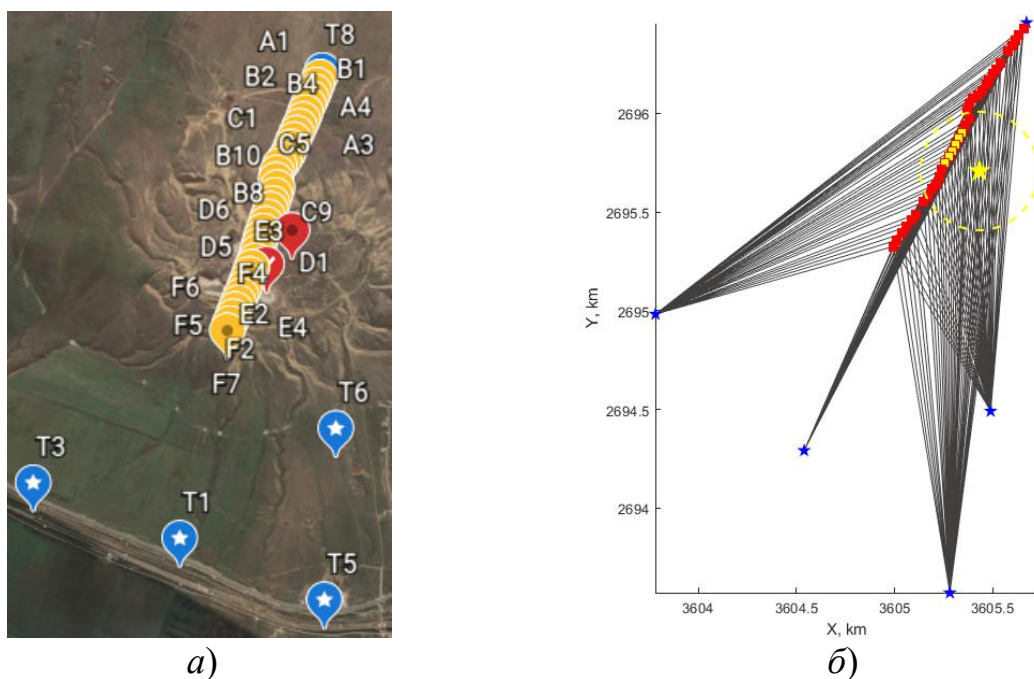


Рис. 1. Карта области грязевого вулкана «Гора Карabetова» в экспериментах по его вибрационному просвечиванию:

а) снимок поверхности Земли; положение регистраторов обозначено желтыми флажками, сейсмоисточников – голубыми флажками, зона области вулкана – красным флажком; *б*) схема связей источник-приемник в декартовой системе координат; положение регистраторов обозначено квадратами, сейсмоисточников – звездами, центр вулкана – желтой звездой

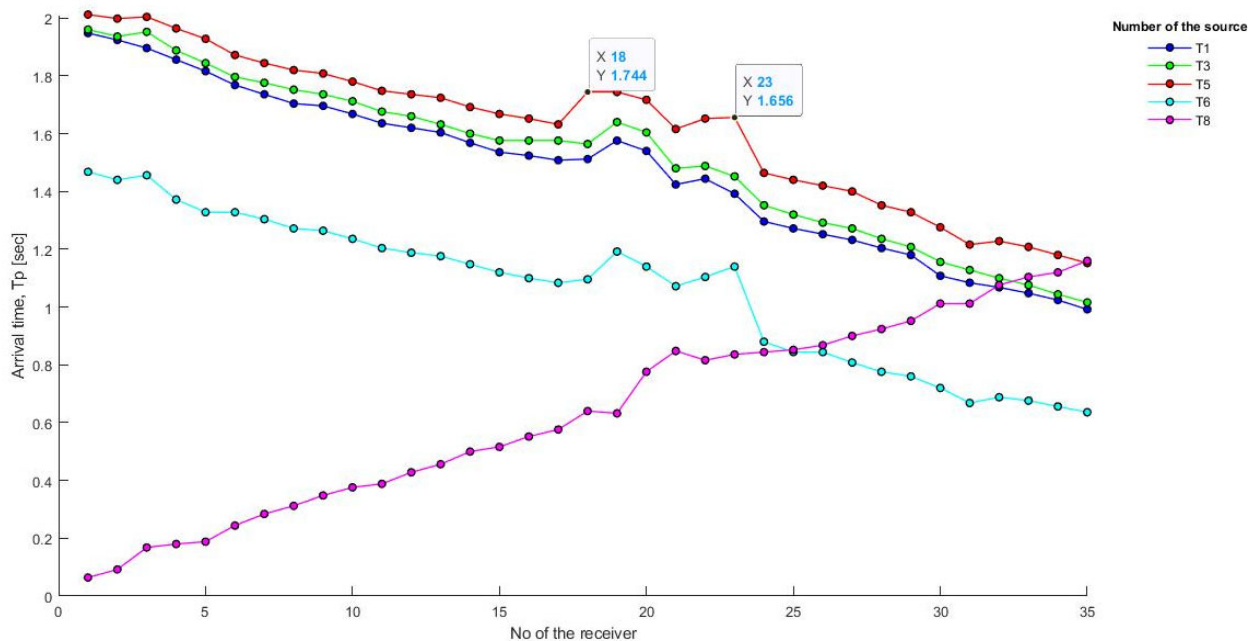


Рис. 2. Годограф Р-волн, полученный из натурального эксперимента, для всех пунктов зондирования

Для определения средневзвешенной скорости Р-волны для всех участков профиля зондирования была выбрана прямоугольная сетка с равномерным количеством узлов по обеим осям декартовой плоскости с параметрами, указанными в таблице.

Параметры выбранных сеток

№ сетки	Количество узлов по X и по Y	Шаг сетки по X, км	Шаг сетки по Y, км	Угол поворота системы координат, °
1	10x10	0,1889	0,2888	0
2	10x10	0,2058	0,2380	45
3	30x30	0,0630	0,0963	0
4	30x30	0,0686	0,0793	45
5	45x45	0,0420	0,0642	0
6	45x45	0,0457	0,0529	45
7	60x60	0,0315	0,0481	0
8	60x60	0,0343	0,0397	45
9	80x80	0,0236	0,0361	0
10	80x80	0,0257	0,0298	45

Результаты определения средневзвешенной скорости по выбранным участкам Земли в области вулкана для сеток № 1, 2, 3 и 9 показаны на рис. 3 и 4. На рис. 3, в указан перечень цветов для соответствующих диапазонов локальных скоростей \vec{v}_k , указанных на рис. 3 и 4.

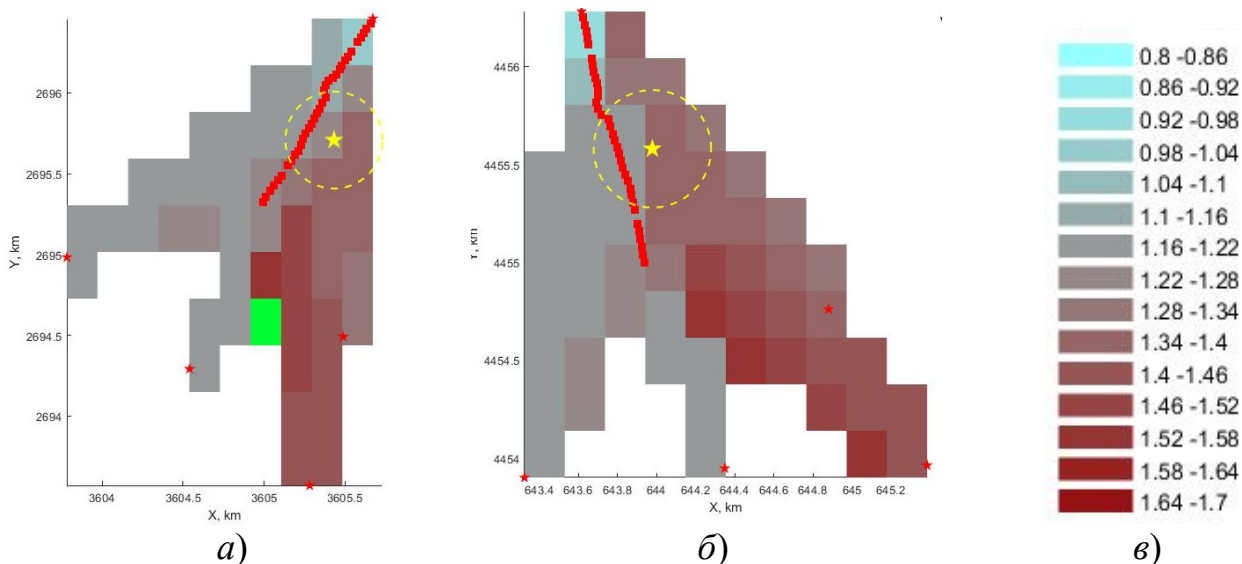


Рис. 3. а) определение средневзвешенной скорости в области вулкана для сетки 10x10 узлов (сетка № 1); б) 10x10 узлов с поворотом системы координат на 45° (сетка № 2); в) распределение диапазона вычисленных локальных скоростей \vec{v}_k [км/с] по цветам

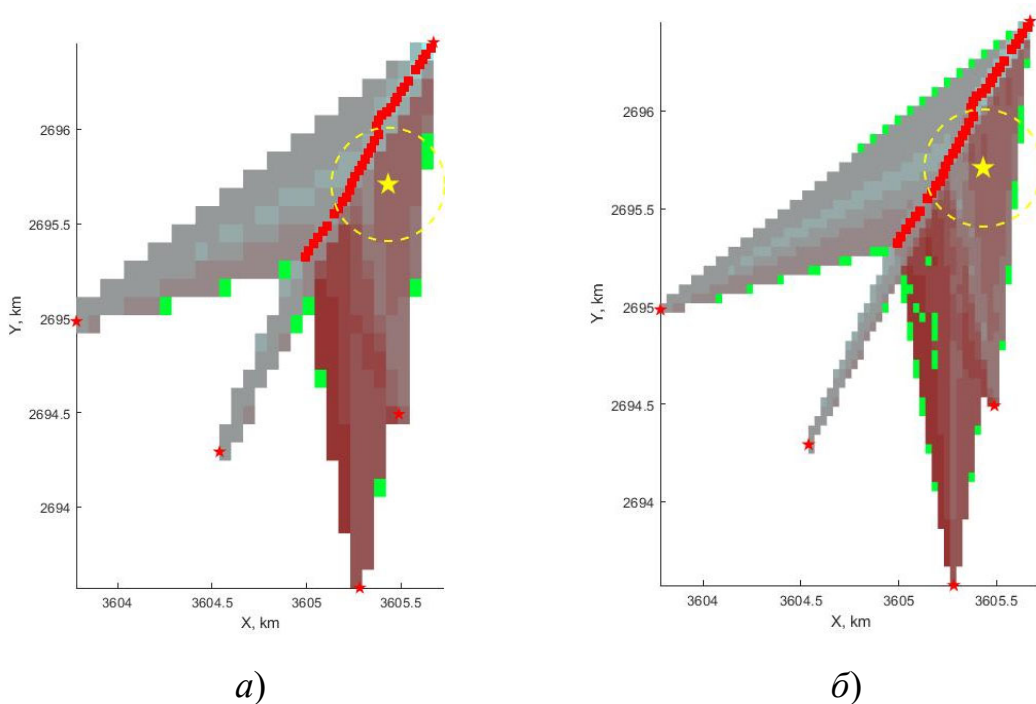


Рис. 4. а) определение средневзвешенной скорости в области вулкана для сетки 30x30 узлов (сетка № 3); б) 80x80 узлов (сетка № 9)

На рис. 5 показано распределение ошибок вычисления теоретического годографа для всех точек регистрации сигнала из пункта зондирования Т8 для всех типов сеток из таблицы.

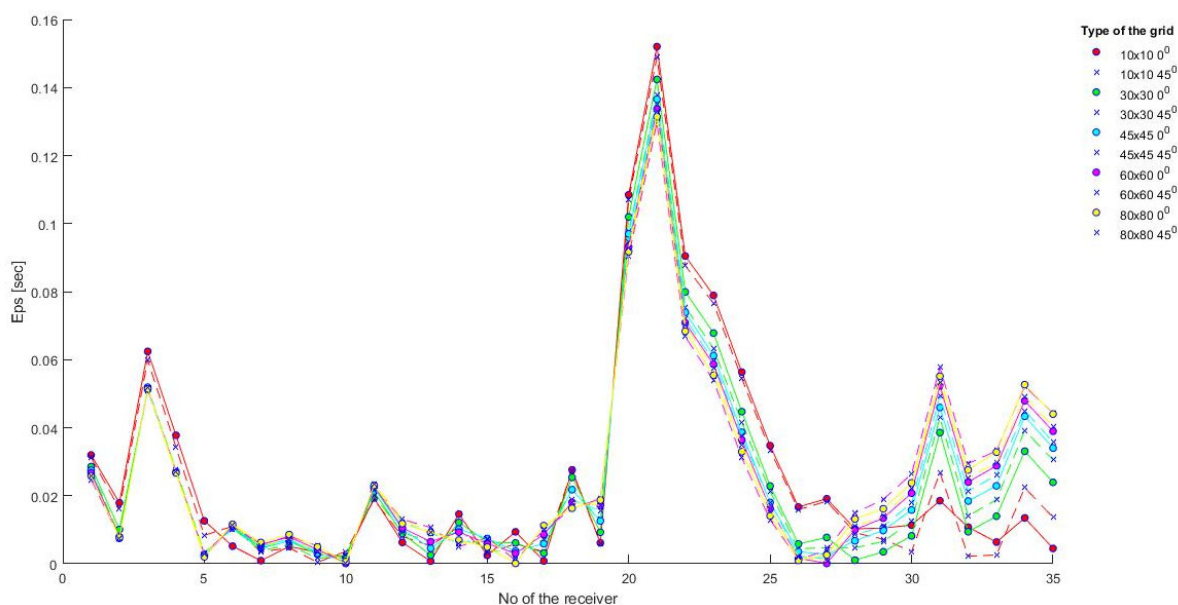


Рис. 5. Распределение ошибок вычисления теоретического годографа из пункта зондирования Т8 по всем регистраторам для всех типов сеток

Обсуждение

Из рис. 3 и 4 видно, что в правой области исследуемой поверхности Земли преобладают более высокие скорости, что может быть вызвано нахождением в этой области антиклинальной складки, для которой характерна более плотная геологическая структура [10, с. 231]. Из рис. 5 видно, что наибольшую погрешность в определении теоретического годографа дают значения в зоне вулкана (датчики 18-23, см. рис. 1, б и рис. 2). Также видно, что чем меньше шаг сетки, тем точнее выделяются скоростные особенности в зоне вулкана. Оптимизация поворота системы координат позволяет сэкономить вычислительные ресурсы до 1,6 раза.

Заключение

Представлены численные алгоритм и модель, а также результаты их применения к оцениванию локальных скоростных характеристик и годографов Р-волн для грязевого вулкана гора Карабетова с учетом экспериментально полученных данных вибросейсмического зондирования. С помощью предложенного подхода выделена зона неоднородности, вносимая вулканом и ее ориентировочные геометрические размеры.

Серией численных экспериментов показано, что для практического выбора вычислительной сетки целесообразно применение шага вычислительной сетки начиная с 63 м до 31,2 м по оси Ох и с 96,3 м до 48,1 по оси Оу. Последний случай соответствует выделению особенностей, возникающих на годографе Р-волн в области вулканической постройки.

Полученные результаты распределения локальных скоростей сопоставлены с геологической структурой области грязевого вулкана Гора Карабетова. Показано, что преобладание более высоких локальных скоростей (более 1,7 км/с) соответствует расположенной в этой области антиклинальной складки.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-07-00861А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н. П. Лаверов; Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. — М.: «Наука», 2005. — 604 с.
2. Дмитриев В. И. Обратные задачи геофизики. Монография. М.: «МАКС Пресс». 2012. — 340 с.
3. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов. В. Я. Арсенин. — М.: «Наука». Гл. ред. ф. м. л., 1986. — 287 с.
4. Яновская Т. Б. Обратные задачи геофизики: учебное пособие / Т. Б. Яновская. Л. Н. Порохова. — Изд. С.-Петербургского университета. 2004. — 213 с.
5. Khairtdinov M. S. Restoration of borehole source coordinates and parameters of the near wellbore environment. / Khairtdinov M. S., Yushin V. I., Voskoboynikova G. M. // Proceedings of 14-th International Scientific technical Conference On Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2018), Novosibirsk. — 2018. — V. 1. — P. 4. — P. 447-450.
6. Каханер Д. Численные методы и программное обеспечение: Пер. с англ. / Д. Каханер, К. Моулер, С. Неш. — М.: «Мир». 2001. — 560 с.
7. Кочнев В. А. Адаптивные методы решения обратных задач геофизики: учеб. пособие / В. А. Кочнев; Краснояр. гос. ун-т. — Красноярск. 1995. — 130 с.
8. Тагиров Х. Ю. Определение средневзвешенной скорости сейсмической волны на участках Земли по пути ее распространения / Тагиров Х. Ю., Асланов Т. Г., Магомедов Х. Д. // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. 2017. — В. 11. — № 3. — С. 108–114.
9. Ключин Е. Б. Особенности преобразования декартовых координат в эллипсоидальные / Е. Б. Ключин, И. М. Кравчук, Х. Р. Гагаева // Изв. вузов “Геодезия и аэрофотосъемка”. 2018. — В. 62. — № 2. — С. 132–135.
10. Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы: монография: 8 В. / Пред. ред. кол.: Н.П. Лаверов. РАН. — М.: ИФЗ РАН. 2008. В. 1: Сейсмические процессы и катастрофы / Отв. ред. А.О. Глико. — М.: ИФЗ РАН. 2008. — 404 с.

© Д. Л. Пинигина, О. А. Копылова, М. С. Хайретдинов, 2021