

Анализ параметров вибрационного поля города методом ковариационного преобразования и аппроксимации

Вихоть А.Н., Лютоев В.А.

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, vikhot.anna@mail.ru, lutoev@geo.komisc.ru

Аннотация. Проведен анализ параметров вибрационного поля города на примере территории жилой застройки Сыктывкара. Исходным материалом послужили данные вибросейсмического мониторинга. Применяя переход к равномерным узлам сети наблюдений посредством двумерной интерполяции, дополнительные расчеты и методику ковариационного преобразования и аппроксимации получили оценки статистических параметров, провели дисперсионный анализ результатов гридинга методом F-теста и по критерию Кохрена. Построены графики тренда поведения вибрационного поля по виброскорости. Эмпирические уравнения: $y_x = 0.031x^{-1.65}$; $y_y = 0.004x^2 + 0.008x + 0.043$; $y_z = 0.092x^{-1.63}$. По компонентам x и z они определили распределение вектора эмпирического вибрационного поля города. Предложенный подход можно рекомендовать для анализа вибрационного поля городов и для научного обоснования экологических изысканий в области техногенной нагрузки.

Ключевые слова: вибрационное поле, гридинг, дисперсионный анализ, ковариационная матрица, случайные величины.

Analysis of vibration field parameters of the city by the method of covariance transformation and approximation

Vikhot A.N., Lutoev V.A.

Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktывkar, vikhot.anna@mail.ru, lutoev@geo.komisc.ru

Abstract. The analysis of parameters of the vibration field of the city was carried out on the example of the Syktывkar area. The source material was the vibroseismic monitoring data. We obtained estimates of statistical parameters, carried out a variance analysis of grid results by the F-test method and the Cochran test applying the transition to uniform nodes of the observation network by means of two-dimensional interpolation, additional calculations and the method of covariance transformation and approximation. The trend graphs of the vibration field behavior in terms on vibration velocity were constructed. Empirical equations: $y_x = 0.031x^{-1.65}$; $y_y = 0.004x^2 + 0.008x + 0.043$; $y_z = 0.092x^{-1.63}$. They determined the distribution of the vector of the empirical vibrational field of the city by the components x and z . The proposed approach can be recommended for the analysis of the vibrational field of cities and scientific substantiation of environmental survey in the field of technogenic impact.

Keywords: vibration field, gridding, variance analysis, covariance matrix, random variables.

Введение

Территория любого города подвергается физическому загрязнению окружающей среды: воздушной, водной и геологической – вследствие воздействия техногенных нагрузок, к которым относятся электрическое, магнитное, шумовое, вибрационное поля. Изучение параметров вибрационного поля в пространственном и временном измерении является важной практической задачей в геофизических, инженерно-геологических и геоэкологических исследованиях.

При обработке геофизических данных распространен вероятностно-статистический подход. Это обусловлено тем, что полученные данные рассматриваются как случайные величины или процессы, потому что в разное время любое физическое поле реализуется случайным образом, в частности вибрационное поле города. В нашей статье рассмотрены параметры вибрационного поля г.Сыктывкара, а именно виброскорости, т.к. в зарубежной (Watts, 1990; Zapfe et al., 2009; ISO 4866:1990; DIN 4150-3-2016) и отечественной литературе и нормативных документах (Чернов, 2006; ГОСТ P52892-2007 и др.) говорится о том, что основным параметром предельно допускаемой величины вибрации для грунтов и фундаментов зданий является пиковое и среднеквадратичное значения скорости и составляют 0.4×10^{-3} м/с.

Материалы и методология

Для определения параметров вибрационного поля была проведена вибросейсмическая съемка территории жилой части г. Сыктывкара цифровой сейсмической станцией ZET 048-С. Сбор данных осуществлялся в частотном диапазоне от 0.3 до 50 Гц, как достаточном для грунтов с относительно большим декрементом затуханий, в условиях постоянного движения автотранспорта. Рабочий цикл составлял 3 минуты с двойным повтором измерений. Скорость записи данных – 60000 знач/мин. Расчет среднеквадратического значения – автоматический с применением расчетной программы ZETLab Seismo. Шаг измерений составлял от 20 до 200 м. Оси x и y имели горизонтальные направления N-S и E-W соответственно, ось z - вертикально вниз. По результатам были построены схемы методом изолиний по параметрам V по трем компонентам x, y и z (рис. 1). Далее проведен анализ полученной информации методом ковариационного преобразования и аппроксимации.

Результаты и обсуждение

Схемы с изолиниями построены с помощью программы Surfer 8.09.2391. Вследствие плотной городской застройки зданиями получены значения картируемого параметра из нерегулярных точек. Для статистического анализа данных необходимо перейти к равномерным узлам сетки посредством двумерной интерполяции. Для этого с помощью гридинга была задана сетка определенного размера, в узлах которой рассчитаны значения параметра V. Геометрия сетки составила $n \times N = 15 \times 15$ (225) точек (табл. 1), она соотносится $\approx 1:1$ с плотностью точек исходных данных (212). Полученные значения коэффициента вариации по трем компонентам составили более 33 %: по x – 75 %, по y – 60 %, по z – 97 % (табл. 2). Это свидетельствует о том, что на картах изолиний по компонентам x и z возможно более тщательно отследить участки грунтов с высоким коэффициентом затухания колебаний, в частном случае территории г.Сыктывкара, обусловленных песчаными отложениями (Вихоть, 2018). В целом, размах данных такого порядка характерен для переменного вибрационного поля города с непостоянным превышением допустимого уровня вибрации (Лютоев, Вихоть, 2019).

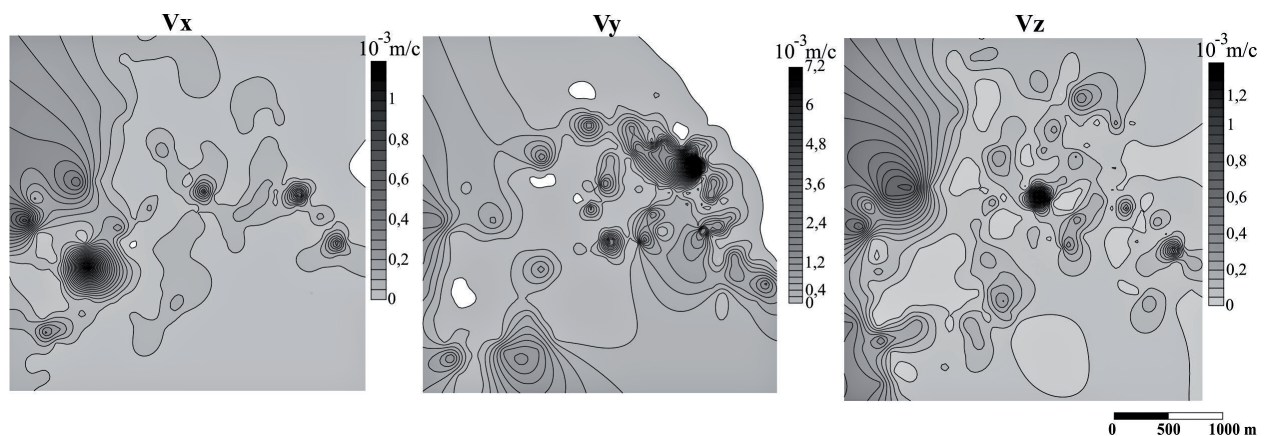


Рис. 1. Схемы вибрационного поля методом изолиний по параметрам виброскорости по компонентам x, y, z, г. Сыктывкар.

Fig. 1. Contour diagrams of the vibration field by the isoline method for the V parameters by x, y, z components, Syktyvkar.

Оценки общей средней, дисперсии, среднеквадратического отклонения были найдены по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$
$$D(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$
$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$$

Таблица 1. Виброскорости в узлах сетки гридинга данных вибросейсмического мониторинга, г. Сыктывкар, 10^{-3} м/с.

Table 1. Velocity values at grid nodes of vibration monitoring data, Syktyvkar, 10^{-3} m/s.

| профиль № ПК | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>Компонента x</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.37 | 0.309 | 0.237 | 0.159 | 0.083 | 0.044 | 0.046 | 0.049 | 0.045 | 0.038 | 0.031 | 0.024 | 0.017 | 0.014 | 0.014 |
| 2 | 0.384 | 0.318 | 0.243 | 0.161 | 0.08 | 0.045 | 0.046 | 0.051 | 0.045 | 0.038 | 0.03 | 0.022 | 0.015 | 0.011 | 0.012 |
| 3 | 0.4 | 0.327 | 0.249 | 0.166 | 0.077 | 0.049 | 0.047 | 0.057 | 0.045 | 0.039 | 0.031 | 0.022 | 0.013 | 0.008 | 0.01 |
| 4 | 0.416 | 0.332 | 0.255 | 0.179 | 0.063 | 0.05 | 0.048 | 0.065 | 0.04 | 0.043 | 0.032 | 0.024 | 0.011 | 0.006 | 0.01 |
| 5 | 0.434 | 0.33 | 0.252 | 0.206 | 0.084 | 0.027 | 0.05 | 0.059 | 0.03 | 0.05 | 0.033 | 0.027 | 0.009 | 0.004 | 0.011 |
| 6 | 0.457 | 0.317 | 0.23 | 0.254 | 0.074 | 0.074 | 0.058 | 0.024 | 0.034 | 0.046 | 0.043 | 0.03 | 0.007 | 0.003 | 0.014 |
| 7 | 0.511 | 0.298 | 0.175 | 0.374 | 0.036 | 0.065 | 0.059 | 0.038 | 0.033 | 0.054 | 0.071 | 0.023 | 0.012 | 0.007 | 0.02 |
| 8 | 0.636 | 0.141 | 0.122 | 0.099 | 0.145 | 0.004 | 0.042 | 0.052 | 0.07 | 0.058 | 0.042 | 0.087 | 0.066 | 0.019 | 0.031 |
| 9 | 0.501 | 0.061 | 0.134 | 0.1 | 0.042 | 0.013 | 0.035 | 0.054 | 0.057 | 0.037 | 0.028 | 0.076 | 0.259 | 0.049 | 0.047 |
| 10 | 0.305 | 0.095 | 0.204 | 0.341 | 0.146 | 0.022 | 0.04 | 0.047 | 0.036 | 0.028 | 0.029 | 0.084 | 0.174 | 0.079 | 0.063 |
| 11 | 0.165 | 0.082 | 0.269 | 0.647 | 0.221 | 0.033 | 0.05 | 0.053 | 0.031 | 0.021 | 0.028 | 0.088 | 0.126 | 0.087 | 0.077 |
| 12 | 0.057 | 0.05 | 0.263 | 0.87 | 0.172 | 0.037 | 0.056 | 0.058 | 0.024 | 0.014 | 0.019 | 0.061 | 0.069 | 0.074 | 0.077 |
| 13 | 0.082 | 0.052 | 0.186 | 0.257 | 0.036 | 0.041 | 0.051 | 0.049 | 0.011 | 0.005 | 0.008 | 0.02 | 0.023 | 0.053 | 0.062 |
| 14 | 0.091 | 0.104 | 0.104 | 0.039 | 0.029 | 0.054 | 0.043 | 0.011 | -0.001 | -0.002 | -0.001 | 0.009 | 0.016 | 0.037 | 0.049 |
| 15 | 0.066 | 0.041 | 0.046 | 0.012 | 0.027 | 0.039 | 0.028 | 0.005 | -0.008 | -0.009 | -0.007 | 0.001 | 0.01 | 0.026 | 0.036 |
| <i>Компонента y</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.856 | 0.624 | 0.405 | 0.228 | 0.101 | 0.027 | -0.025 | -0.101 | -0.191 | -0.282 | -0.35 | -0.388 | -0.404 | -0.412 | -0.419 |
| 2 | 0.897 | 0.635 | 0.396 | 0.215 | 0.098 | 0.051 | 0.01 | -0.065 | -0.158 | -0.26 | -0.33 | -0.37 | -0.38 | -0.386 | -0.396 |
| 3 | 0.943 | 0.641 | 0.379 | 0.198 | 0.09 | 0.082 | 0.061 | -0.018 | -0.106 | -0.229 | -0.298 | -0.331 | -0.34 | -0.351 | -0.367 |
| 4 | 0.998 | 0.636 | 0.35 | 0.183 | 0.063 | 0.107 | 0.137 | 0.033 | -0.028 | -0.189 | -0.24 | -0.275 | -0.282 | -0.305 | -0.333 |
| 5 | 1.067 | 0.612 | 0.303 | 0.183 | 0.076 | 0.037 | 0.252 | 0.052 | 0.033 | -0.153 | -0.132 | -0.18 | -0.191 | -0.247 | -0.293 |
| 6 | 1.164 | 0.55 | 0.228 | 0.212 | 0.146 | 0.097 | 0.295 | 0.28 | 0.526 | -0.134 | 0.008 | 0.031 | -0.057 | -0.182 | -0.248 |
| 7 | 1.333 | 0.416 | 0.132 | 0.351 | 0.144 | 0.113 | 0.121 | 0.518 | 0.773 | -0.008 | 0.352 | 0.629 | 0.085 | -0.118 | -0.199 |
| 8 | 1.561 | 0.148 | 0.052 | 0.64 | 0.037 | 0.013 | 0.016 | 0.17 | 0.545 | 0.051 | 0.521 | 0.552 | 0.117 | -0.052 | -0.145 |
| 9 | 1.322 | 0.046 | -0.007 | 0.099 | 0.01 | 0.034 | 0.068 | 0.964 | 1.017 | 0.231 | 0.577 | 0.444 | 0.183 | 0.043 | -0.085 |
| 10 | 1.068 | 0.136 | -0.053 | -0.018 | 0.029 | 0.041 | 0.163 | 0.763 | 0.702 | 0.393 | 0.508 | 0.272 | 0.196 | 0.195 | -0.025 |
| 11 | 0.978 | 0.127 | -0.074 | -0.027 | 0.121 | 0.052 | 0.196 | 0.399 | 0.423 | 0.442 | 0.493 | 0.166 | 0.306 | 0.428 | 0.019 |
| 12 | 1.03 | 0.057 | -0.065 | -0.005 | 0.396 | 0.054 | 0.171 | 0.092 | 0.209 | 0.449 | 0.648 | 0.392 | 0.316 | 0.726 | 0.042 |
| 13 | 0.655 | 0.027 | -0.001 | 0.237 | 0.074 | 0.144 | 0.029 | 0.175 | 0.454 | 0.722 | 0.582 | 0.589 | 0.851 | 0.851 | 0.207 |
| 14 | 0.605 | 0.213 | 0.136 | 0.424 | 1.378 | 0.196 | 0.2 | 0.096 | 0.222 | 0.463 | 0.671 | 0.556 | 0.633 | 0.754 | 0.334 |
| 15 | 0.753 | 0.048 | 0.325 | 1.059 | 1.559 | 0.587 | 0.332 | 0.229 | 0.3 | 0.479 | 0.622 | 0.584 | 0.625 | 0.656 | 0.398 |
| <i>Компонента z</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.592 | 0.529 | 0.428 | 0.297 | 0.164 | 0.101 | 0.115 | 0.122 | 0.121 | 0.117 | 0.107 | 0.094 | 0.081 | 0.072 | 0.07 |
| 2 | 0.614 | 0.555 | 0.45 | 0.304 | 0.167 | 0.115 | 0.119 | 0.126 | 0.122 | 0.12 | 0.107 | 0.092 | 0.076 | 0.067 | 0.066 |
| 3 | 0.634 | 0.583 | 0.476 | 0.316 | 0.165 | 0.139 | 0.126 | 0.135 | 0.121 | 0.125 | 0.107 | 0.09 | 0.07 | 0.061 | 0.063 |
| 4 | 0.651 | 0.613 | 0.504 | 0.336 | 0.124 | 0.146 | 0.131 | 0.145 | 0.109 | 0.138 | 0.102 | 0.088 | 0.063 | 0.055 | 0.06 |
| 5 | 0.658 | 0.642 | 0.522 | 0.378 | 0.129 | 0.059 | 0.138 | 0.129 | 0.073 | 0.15 | 0.08 | 0.082 | 0.056 | 0.049 | 0.059 |
| 6 | 0.644 | 0.67 | 0.501 | 0.447 | 0.146 | 0.87 | 0.155 | 0.073 | 0.064 | 0.111 | 0.036 | 0.05 | 0.05 | 0.045 | 0.061 |
| 7 | 0.61 | 0.723 | 0.4 | 0.614 | 0.046 | 0.199 | 0.142 | 0.067 | 0.147 | 0.092 | 0.053 | 0.048 | 0.053 | 0.044 | 0.068 |
| 8 | 0.617 | 0.392 | 0.242 | 0.196 | 0.051 | 0.011 | 0.092 | 0.056 | 0.138 | 0.098 | 0.048 | 0.101 | 0.108 | 0.056 | 0.082 |
| 9 | 0.473 | 0.094 | 0.118 | 0.029 | 0.011 | 0.043 | 0.068 | 0.069 | 0.199 | 0.083 | 0.047 | 0.139 | 0.375 | 0.092 | 0.103 |
| 10 | 0.324 | 0.08 | 0.056 | -0.002 | 0.014 | 0.079 | 0.084 | 0.067 | 0.114 | 0.079 | 0.062 | 0.146 | 0.243 | 0.129 | 0.128 |
| 11 | 0.246 | 0.079 | 0.045 | 0.002 | 0.021 | 0.129 | 0.122 | 0.07 | 0.086 | 0.069 | 0.067 | 0.15 | 0.143 | 0.139 | 0.153 |
| 12 | 0.228 | 0.123 | 0.06 | 0.034 | 0.031 | 0.154 | 0.187 | 0.07 | 0.065 | 0.055 | 0.052 | 0.103 | 0.052 | 0.124 | 0.147 |
| 13 | 0.321 | 0.061 | 0.086 | 0.169 | 0.036 | 0.134 | 0.23 | 0.043 | 0.04 | 0.043 | 0.041 | 0.069 | 0.039 | 0.099 | 0.122 |
| 14 | 0.4 | 0.19 | 0.107 | 0.172 | 0.074 | 0.108 | 0.187 | 0.049 | 0.03 | 0.037 | 0.041 | 0.076 | 0.059 | 0.082 | 0.106 |
| 15 | 0.397 | 0.223 | 0.121 | 0.136 | 0.115 | 0.129 | 0.145 | 0.07 | 0.035 | 0.037 | 0.043 | 0.065 | 0.063 | 0.076 | 0.094 |

Таблица 2. Оценки статистических параметров реализации вибрационного поля по параметрам виброскорости по компонентам x, y, z, г. Сыктывкар.

Table 2. Estimates of statistical parameters of vibrational field realization for the V parameters by x, y, z components, Syktyvkar.

| | x | y | z |
|-----------|-------|-------|-------|
| \bar{x} | 0.096 | 0.235 | 0.164 |
| D | 0.016 | 0.155 | 0.029 |
| σ | 0.128 | 0.393 | 0.169 |
| V, % | 75.22 | 59.81 | 96.77 |

В геометрии сетки имеем одинаковые объемы выборок и 15 групп сравнения – профилей, поэтому осуществили дисперсионный анализ результатов гридинга методом F-теста, или ANOVA, как отношение межгрупповой дисперсии к внутригрупповой, которые были определены по формулам:

$$\sigma_{\text{мг}}^2 = \frac{\sum(\bar{x}_i - \bar{x})^2 n_i}{\sum n_i};$$

$$\sigma_{\text{вг}}^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x}_i)^2 n_i}{\sum n_i}$$

Установили, что все полученные значения статистики по заданному уровню значимости $\alpha = 0.05$ и числам степеней свободы $f_1 = 14$ и $f_2 = 14$ меньше $F_{\text{кр}} = 2.48$:

$$F_x = \frac{0.000586}{0.068704} = 0.0085;$$

$$F_y = \frac{0.004993}{0.16285} = 0.0307;$$

$$F_z = \frac{0.001325}{0.054639} = 0.0243.$$

Следовательно, можно сделать заключение, что наблюдения независимы и в разное время реализуются случайным образом, выборочные распределения средних значений признака по всем профилям нормальны, дисперсия значений во всех группах одинакова.

Выполним анализ данных в таблице 1 на однородность дисперсий каждого профиля, для этого установим её по критерию Кохрена:

$$G = \frac{\sigma_{\text{max}}^2}{\sigma_1^2 + \dots + \sigma_i^2}.$$

Подставив данные в формулу, получили:

$$G_x = \frac{0.0494}{0.116} = 0.4261;$$

$$G_y = \frac{0.2229}{1.5739} = 0.1416;$$

$$G_z = \frac{0.0606}{0.2085} = 0.2904.$$

По таблице распределения значений G при уровне значимости $\alpha = 0.05$ и числе степеней свободы $n = 14$ и $k = 2$ $G_{\text{кр}} = 0.7521$. $G_x < G_{\text{кр}}$, $G_y < G_{\text{кр}}$, $G_z < G_{\text{кр}}$, полученный результат указал на равномерность распределения данных в сетке, значит, для характеристики поведения вибрационного поля города приемлемо строить графики распределения дисперсий по профилям из главной диагонали ковариационных матриц. Данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. Главные диагонали ковариационных матриц.
 Table 3. Main diagonals of covariance matrices.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| <i>Компонента x</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.033 | 0.015 | 0.004 | 0.049 | 0.003 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0003 | 0.001 | 0.005 | 0.001 | 0.001 |
| <i>Компонента y</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.062 | 0.064 | 0.031 | 0.073 | 0.223 | 0.019 | 0.011 | 0.087 | 0.124 | 0.106 | 0.156 | 0.145 | 0.144 | 0.197 | 0.064 |
| <i>Компонента z</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.024 | 0.061 | 0.036 | 0.03 | 0.003 | 0.038 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.008 | 0.001 | 0.001 |

Характер изменения дисперсии амплитуды виброскорости и тренд параметров вибрационного поля города по компоненте x, y и z представлен на рисунке 2. Исходя из подбора максимальных значений коэффициента детерминации, получены аппроксимирующие функции: по компоненте x и z – степенные, по y – полиномиальная. Эмпирические уравнения:

- 1) $y_x = 0.031x^{-1.65}$;
- 2) $y_y = 0.004x^2 + 0.008x + 0.043$;
- 3) $y_z = 0.092x^{-1.63}$.

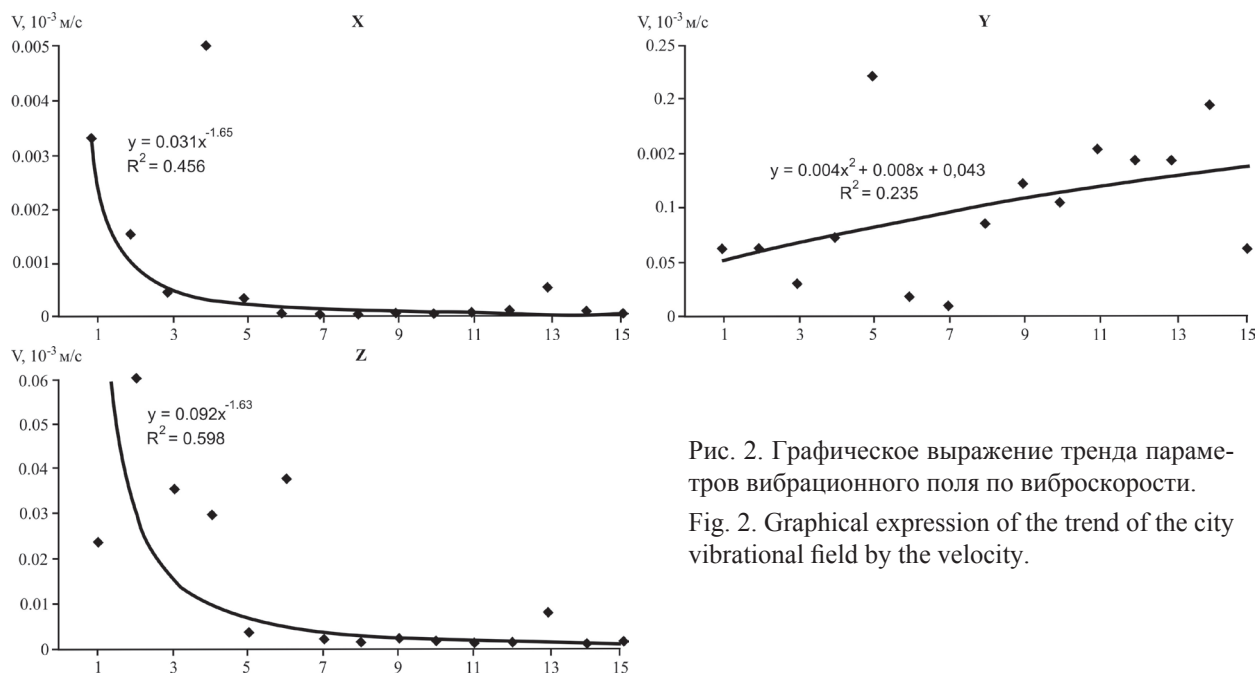


Рис. 2. Графическое выражение тренда параметров вибрационного поля по виброскорости.
 Fig. 2. Graphical expression of the trend of the city vibrational field by the velocity.

Заключение

В результате проведенных статистических расчетов и анализа вибрационного поля г. Сыктывкара методом ковариационного преобразования и аппроксимации получены следующие результаты:

- наблюдения независимы и в разное время реализуются случайным образом, выборочные распределения средних значений признака по всем профилям нормальны, дисперсия значений во всех группах одинакова и однородна;
- среднее значение вибрационного поля города составило 0.096×10^{-3} , 0.235×10^{-3} м/с по горизонтальным компонентам и 0.164×10^{-3} м/с – по вертикальной, это свидетельствует о распределении поля в пределах нормы с локальными превышениями в среднем в 2 раза, разбросы вокруг среднего – 0.128×10^{-3} ; 0.393×10^{-3} и 0.169×10^{-3} м/с соответственно;
- на схемах изолиний по компонентам x и z возможно более точно отследить участки грунтов с высоким коэффициентом затухания колебаний;

- приемлемо строить графики распределения дисперсий по профилям из главной диагонали ковариационных матриц;
- графики и уравнения по компонентам x и z определяют распределение вектора эмпирического вибрационного поля города, чего нельзя сказать для компоненты y ввиду неудовлетворительного коэффициента детерминации;
- таким образом, предложенный подход можно рекомендовать для анализа вибрационного поля города, для научного обоснования экологических изысканий в области техногенной нагрузки.

Литература

1. Вихоть А.Н. Применение сейсмометрического метода в выявлении участков опасности осадочно-просадочных процессов в грунтовой толще оснований фундаментов зданий в условиях г. Сыктывкара // Проблемы геологии и освоения недр. Томск. 2018. Т. 1. С. 756–758.
2. Лютоев В.А., Вихоть А.Н. Влияние оползневых процессов и природно-техногенной микросейсмичности на геологическую среду города Сыктывкара. Сыктывкар. 2019. 84 с.
3. Чернов Ю.Т. Вибрации строительных конструкций. М. Изд-во: АСВ. 2006. 288 с.
4. Watts G.R. Traffic induced vibrations in buildings // Research report of The Transport and Road research Laboratory. Department of Transport. 1990. 31 p.
5. Zapfe J.A. Ground-Borne Noise and Vibration in Buildings Caused by Rail Transit: report / J.A. Zapfe, H.J. Saurenman, S.A. Fidell. 2009. 200 p.
6. ГОСТ Р52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М. Изд-во: стандартов. 2008. 16 с.
7. BS 7385-1: 1990. ISO 4866:1990. Evaluation and measurement for vibration in buildings. BSI. 1990. 40p.
8. DIN 4150-3-2016. Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Berlin : German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung). 2016. 20 p.