

КРИВЫЕ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ ИМПУЛЬСНЫМИ ТОКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЯХ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

Вишнев В.С., Горшков В.Ю. – Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Выполнены расчеты теоретических и экспериментальных кривых кажущегося сопротивления метода электроразведки, основанного на использовании техногенного импульсного поля электрической железной дороги. Выяснено, что экспериментальные кривые этого параметра, построенные по одним и тем же исходным материалам, но при разных соотношениях погонных сопротивлений рельсов и погонных сопротивлений перехода рельс – земля, так же, как и теоретические, отличаются друг от друга, практически везде, только по уровню. Сделан вывод, что неравномерность заземления рельсов не является препятствием для количественной интерпретации рассматриваемых кривых.

Железная дорога, помехи, импульсы, полезный сигнал, модель, параметры, поле, кривые, кажущееся сопротивление

Введение

Ранее установлено, что из совокупности измерений техногенного импульсного поля тяговой сети электрической железной дороги (ЭЖД) можно выделять однотипные по структуре источника (полезные) сигналы. Их распределения по профилям, направленным перпендикулярно преимущественному простиранию рельсовых путей, могут быть преобразованы в кривые кажущегося удельного электрического сопротивления геологической среды $\rho_{k,mc}^y$, $\rho_{k,mc}^x$ (тс – тяговая сеть) и интерпретированы, как на качественном, так и на количественном уровне. Однако при осуществлении пересчета надо задаваться моделью источника полезных сигналов. В качестве ее прототипа предпочтительно считать бесконечно длинную, равномерно заземленную, прямолинейную электрическую железнодорожную ветку, на которой работает только один не перемещающийся, но изменяющий свой режим энергопотребления, электровоз (эффектами от движения тяговых потребителей, как вытекает из соответствующих оценок, можно пренебречь). Модель довольно проста и описывается всего четырьмя параметрами, три из которых зависят от линейных размеров используемого участка ЭЖД, четвертый – от условий заземления рельсового пути. Линейные параметры отыскать довольно просто, в частности, прямыми измерениями, если не на местности, то на топографическом планшете или топографической карте (Вишнев, 2012). А для определения четвертого параметра – k ,

равного $(r_p/r_n)^{1/2}$, где r_p , r_n – соответственно, погонные сопротивления рельсов и перехода рельс – земля (грунт), приходится решать своего рода обратную задачу, используя измерения магнитного поля токов ЭЖД в базисном пункте наблюдения, или задавать его интуитивно, исходя из вещественного состава балласта, времени года производства геофизических работ, изношенности рельсов и т.п. Естественно, ошибки выбора этого параметра могут быть значительными.

Работа посвящена выяснению степени влияния условий заземления железнодорожного полотна на ход практических кривых $\rho_{k,tc}$.

Исходные данные

Качество заземления рельсовых путей на любой железнодорожной ветке характеризуется (численно) соотношениями погонных сопротивлений рельсов и погонных сопротивлений перехода рельс – земля. Переходное сопротивление рельс – земля в первую очередь зависит от типа балласта (песок, гравий, щебень, супесь), а сопротивление рельса – от площади сечения (S) его профиля. На отечественных ЭЖД применяют три типа рельсов (Марквард, 1965). Погонное сопротивление одного рельсового пути (r_p) с учетом стыков и размеров S ориентировочно равно 0,0155 (при $S=82,9$), 0,0195 (при $S=65,8$), 0,0224 Ом/км (при $S=57,0$ см²), погонное переходное (r_n) – колеблется (от сезона года к сезону и состояния изношенности железнодорожного полотна) между 0,15 и 100 Ом·км, но при

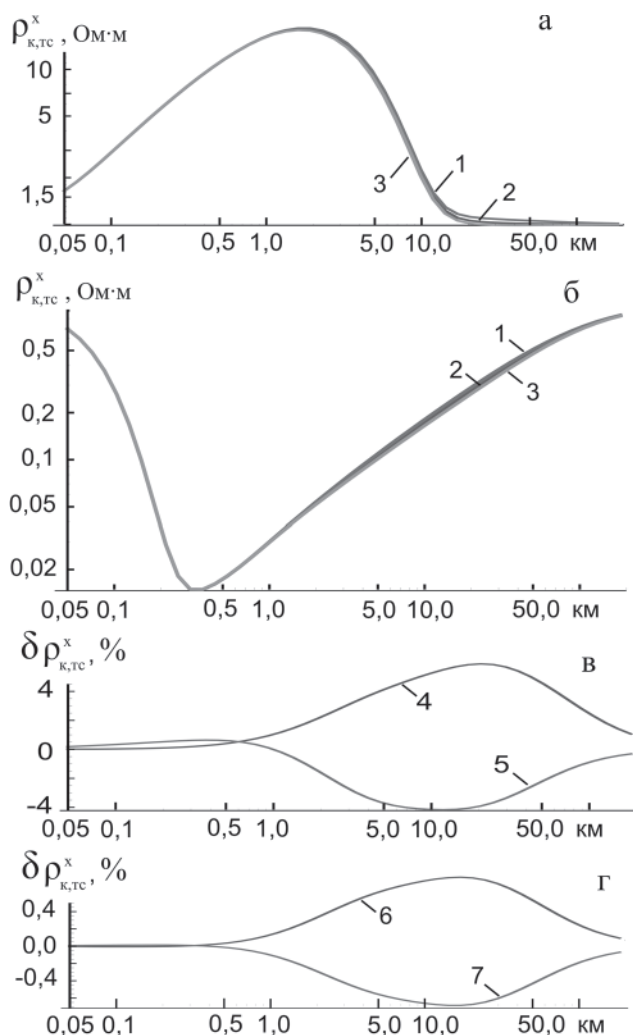


Рис.1. Особенности хода теоретических кривых $\rho_{k,mc}^x$ при ошибке задания величины корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k \pm \Delta k = (r_p/r_n)^{1/2} \pm \Delta k$), а – трехслойный геоэлектрический разрез типа «К»: $\rho_1=100 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_1=0,05 \text{ км}$; $\rho_2=100 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_2=0,5 \text{ км}$; $\rho_3=1 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_3=\infty \text{ км}$; б – трехслойный геоэлектрический разрез типа «Н»: $\rho_1=1 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_1=0,05 \text{ км}$; $\rho_2=0,01 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_2=0,5 \text{ км}$; $\rho_3=1 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_3=\infty \text{ км}$ (1 – при $\Delta k = -0,07 \text{ км}^{-1}$, 2 – при $\Delta k = 0 \text{ км}^{-1}$, 3 – при $\Delta k = +0,14 \text{ км}^{-1}$); в, г – графики относительных погрешностей значений $\rho_{k,mc}^x(x)$ (4 – при $\Delta k = -0,07 \text{ км}^{-1}$, 5 – при $\Delta k = +0,14 \text{ км}^{-1}$, 6 – при $\Delta k = -0,014 \text{ км}^{-1}$, 7 – при $\Delta k = +0,014 \text{ км}^{-1}$). Параметры модели источника ЭЖД и координаты точек расчета: $l_0=8 \text{ км}$, $k \pm \Delta k = (0,14 \pm \Delta k) \text{ км}^{-1}$, $L=20 \text{ км}$, $x = 0,05 \div 183 \text{ км}$, $y=7,5 \text{ км}$

плюсовой температуре не превосходит первые единицы Ом·км. То есть величина k , тождественная $(r_p/r_n)^{1/2}$, может изменяться от 0,0124 до 0,3864 км⁻¹. Однако при отсыпке же-

лезнодорожного основания r_n стараются приблизить к значению 1 Ом·км. Следовательно, если все измерения производить в одно и то же время года, например, летом, и на участке, где состояние дороги нормальное, то интервал возможных значений k будет намного уже предельного. Можно положить его равным 0,07 – 0,28 км⁻¹, что также значительно шире, чем на магистральных дорогах в реальности, а в качестве наиболее вероятного k взять число 0,14 км⁻¹, то есть $(0,0195/1)^{1/2}$. Эти значения были использованы нами при математическом моделировании возможных искажений кривых $\rho_{k,tc}$ под воздействием ошибок задания параметра k . На теоретических примерах установлено, что искажения кривых $\rho_{k,mc}^x$ (ось x декартовых координат и линия MN измерительной установки полезных сигналов - перпендикулярны дороге), даже при абсолютных ошибках, больших или меньших величины k в два раза, нигде не превосходят $\pm 10\%$ (рис. 1 в, графики 5, 4). Кривые же $\rho_{k,mc}^y$ (MN – вдоль преимущественного простирания дороги) ведут себя иначе. На расстояниях от ЭЖД вплоть до нескольких первых километров их отклонения от нормального хода очень большие (рис.2) и только далее 3 км становятся меньше 10%. Но, если Δk снизить до 5–10%, то интервал пригодных для электроразведки значений $\rho_{k,mc}^y$ будет сильно расширен и охватит все практически значимые участки расчетного профиля. Это подтверждается графиками 6, 7 рис.2.

Однако, указанные выводы получены по итогам расчетов только для случая, когда рельсовый путь равномерно заземленный и неветвящийся, то есть, когда на всем протяжении дороги $k=\text{constant}$. В реальности же ни r_p , ни r_n не могут быть неизменными. Действительно, даже в пределах одной секции контактного провода, питающей электровозы (инициирующие полезные сигналы) по односторонней схеме энергоснабжения тяговых потребителей, есть, как минимум, одна железнодорожная станция, где рельсы разветвляются. Значит, и эквивалентное погонное сопротивление рельсового пути и эквивалентное погонное сопротивление перехода рельсовый путь – земля могут отличаться на этом участке от соответствующих величин соседних участков дороги. Необходимо установить, сильно ли влияют подобные отличия на профильный

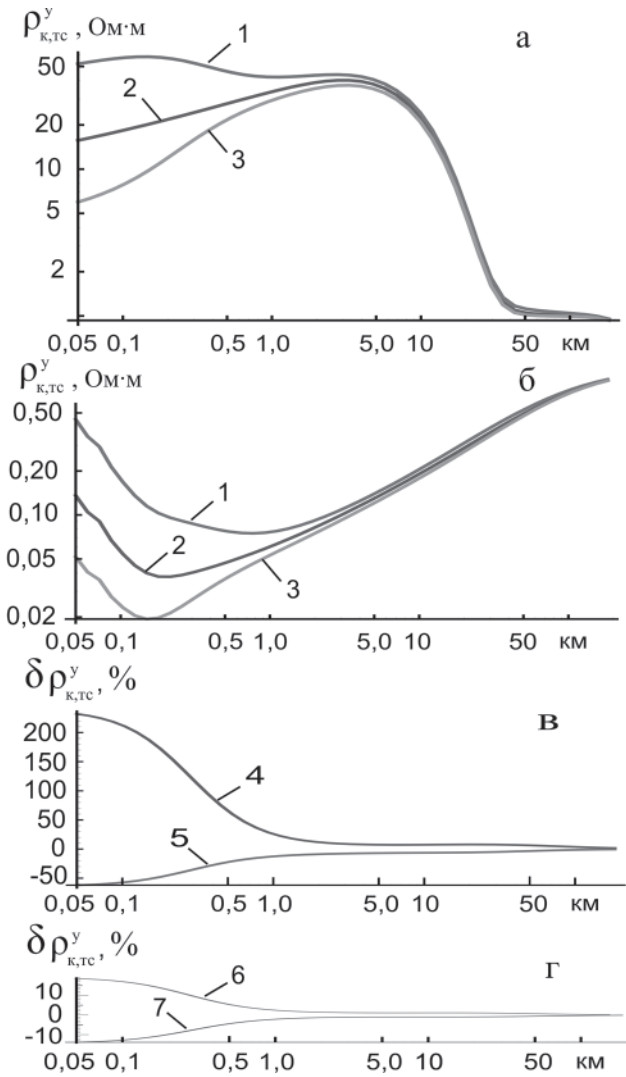


Рис.2. Особенности хода теоретических кривых $\rho_{k,mc}^y$ при ошибке задания величины корня квадратного из отношения погонного сопротивления рельсов к погонному сопротивлению перехода рельс – земля ($k \pm \Delta k = (r_p/r_n)^{1/2} \pm \Delta k$).

а – трехслойный геоэлектрический разрез типа «К»: $\rho_1=1 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_1=0,05 \text{ км}$; $\rho_2=500 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_2=0,5 \text{ км}$; $\rho_3=1 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_3=\infty \text{ км}$;

б – трехслойный геоэлектрический разрез типа «Н»: $\rho_1=1 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_1=0,05 \text{ км}$; $\rho_2=0,01 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_2=0,5 \text{ км}$; $\rho_3=1 \text{ Ом} \times \text{м}$, $h_3=\infty \text{ км}$ (1 – при $\Delta k = -0,07 \text{ км}^{-1}$, 2 – при $\Delta k = 0 \text{ км}^{-1}$, 3 – при $\Delta k = +0,14 \text{ км}^{-1}$);

в, г – графики относительных погрешностей значений $\rho_{k,mc}^y(x)$ (4 – при $\Delta k = -0,07 \text{ км}^{-1}$, 5 – при $\Delta k = +0,14 \text{ км}^{-1}$, 6 – при $\Delta k = -0,014 \text{ км}^{-1}$, 7 – при $\Delta k = +0,014 \text{ км}^{-1}$).

Параметры источника БТ и координаты точек расчета: $l_0=7 \text{ км}$, $k \pm \Delta k = (0,14 \pm \Delta k) \text{ км}^{-1}$, $L=20 \text{ км}$, высота подвеса контактного провода – $0,006 \text{ км}$; $x=0,05 \div 183 \text{ км}$, $y=5 \text{ км}$

ход практических кривых $\rho_{k,mc}^{ij}$? Если сильно, то количественная интерпретация данных измерения помех от ЭЖД смысла не имеет.

О методике и технических средствах решения проблемы

Выяснение степени влияния неравномерности заземления рельсовых путей на практические кривые $\rho_{k,mc}$ производилось с помощью сравнения этих кривых, рассчитанных по одним и тем же полевым материалам, но при существенно различных значениях параметра k , предполагая, что, если упомянутое влияние сильное, то на каких-то участках профиля измерения при разных значениях k оно создаст неодинаковые по интенсивности дополнительные экстремумы (ложные аномалии), если же слабое, то экстремумы сольются с фоном или не появятся (рис. 3).

Общая формула, по которой рассчитывались значения $\rho_{k,mc}$, имеет вид:

$$\rho_{k,mc}^{ij} = \frac{G_0^j}{P_0^i} \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta H_j}, \quad i = x, y, \quad j = x, y, z,$$

где G_0^j / P_0^i – соотношение, играющее роль коэффициента электроразведочной установки; ΔE_i – составляющая по оси x или y прямолинейных координат импульса напряженности электрического поля, измеренного на рядовом пункте; ΔH_j – составляющая по оси x , y или z импульса напряженности магнитного поля, измеренного на базисном либо том же рядовом пункте наблюдения.

Различные значения параметра k подставлялись в математические выражения величин G_0^j и P_0^i .

Для случая двухстороннего питания электровозов

$$P_0^i = \frac{k}{4\pi} \left[\int_0^{l_0} Q_1 \frac{\lambda_1}{R^3} + \int_{l_0}^L Q_2 \frac{\lambda_1}{R^3} + \int_{-\infty}^0 Q_3 \frac{\lambda_1}{R^3} + \int_L^{\infty} Q_4 \frac{\lambda_1}{R^3} \right] dl,$$

$$G_0^j = \frac{k}{8\pi} \left[\int_0^{l_0} Q_1 \frac{\lambda_1}{r^2} + \int_{l_0}^L Q_2 \frac{\lambda_1}{r^2} + \int_{-\infty}^0 Q_3 \frac{\lambda_1}{r^2} + \int_L^{\infty} Q_4 \frac{\lambda_1}{r^2} \right] dl + J,$$

где

$$J = J_x = -\frac{h}{4\pi(x_1^2 + h^2)} \left\{ \frac{y_1(1-l_0/L)}{(x_1^2 + y_1^2 + h^2)^{1/2}} - \frac{(y_1-l_0)(1-l_0/L)}{[x_1^2 + (y_1-l_0)^2 + h^2]^{1/2}} - \frac{(y_1-l_0)(l_0/L)}{[x_1^2 + (y_1-l_0)^2 + h^2]^{1/2}} + \frac{(y_1-L)(l_0/L)}{[x_1^2 + (y_1-L)^2 + h^2]^{1/2}} \right\},$$

$$Q_1 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{+kl} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2},$$

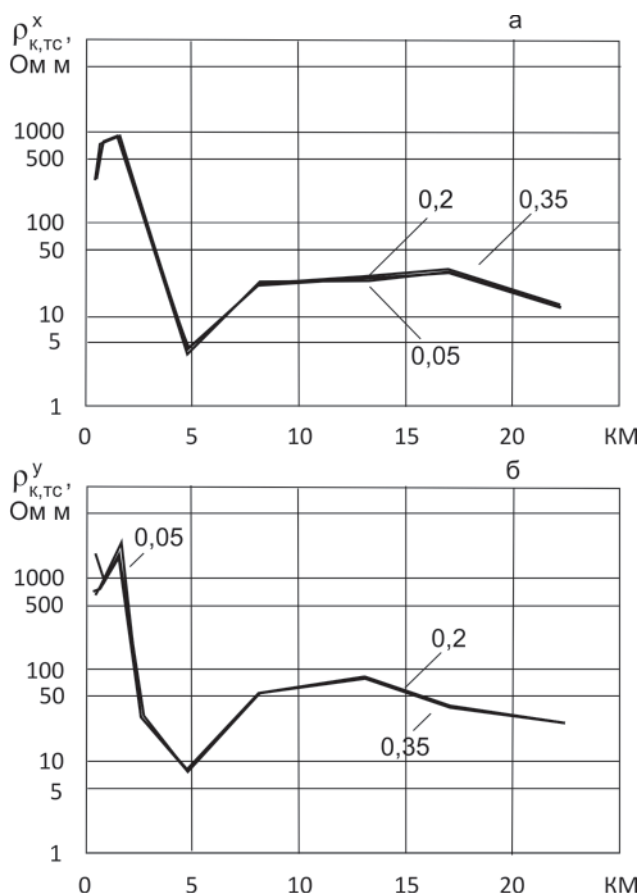


Рис. 3. Экспериментальные кривые $\rho_{k,mc}$ при различном задании параметра $k=(r_p/r_n)^{1/2}$: а – кривые $\rho_{k,mc}^x$, б – кривые $\rho_{k,mc}^y$, шифр – значения параметра k .

$$Q_2 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{-kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2},$$

$$Q_3 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{+kl} + e^{+kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{+kl_2},$$

$$Q_4 = \left(\frac{l_0}{L} - 1\right)e^{-kl} + e^{-kl_1} - \frac{l_0}{L}e^{-kl_2},$$

$$l_1 = l - l_0, l_2 = l - L, r = \{x_i^2 + (y_i - l)^2\}^{1/2},$$

$$R = \{x_i^2 + (y_i - l)^2 + z_i^2\}^{1/2}, k = (r_p/r_n)^{1/2},$$

x_m, y_m, z_m – прямоугольные декартовы координаты пункта наблюдения М с началом в точке подсоединения к рельсам одной из питающих электровоз (Э) тяговых подстанций, например, А, осью y , направленной от А к Э, осью z – вниз, перпендикулярно поверхности геоэлектрического разреза, h – высота подвеса контактного провода, l – текущая координата железнодорожного полотна, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – доли токов утечки различных участков рельсового пути, P_0^i и G_0^j – величины, характеризующие геометрию электрической и магнитной компо-

ненты поля ЭЖД, J_x – часть G_0^x , обусловленная токами секции контактного провода. При $j=y, \lambda_1 = x_m, J=0$; при $j=x, \lambda_1 = (y_m - l), J = J_x$, при $i=y, \lambda_1 = (y_m - l)$; при $i=x, \lambda_1 = x_m$; при $z_m=0, R=r$.

Эта формула была запрограммирована в системе компьютерной математики – Mathematica 7. Расчеты кривых $\rho_{k,mc}$ выполнены на ПК Intel Core 2 Quad. В качестве полевого материала использована часть данных, полученных вблизи восточного участка Троицкого профиля глубинного сейсмического зондирования. Топографическую привязку и геологическую основу экспериментального материала можно найти в работе (Вишнев, 2018).

Обсуждение результатов и выводы

Результаты расчетов кривых $\rho_{k,mc}$ при различных значениях параметра k изображены на рис. 3. Они показывают, что экстремумов с сильно отличающимися амплитудами, наличие которых можно бы было связать с влиянием неравномерности заземления рельсовых путей, на кривых под шифрами 0,35; 0,2; 0,05, нет, хотя перепады в значениях параметра k , гораздо больше, чем при расчете одноименных теоретических кривых (рис. 1 и рис. 2). Резкие отклонения, наблюдающиеся в значениях $\rho_{k,mc}^y$ на малых удалениях от рельсов, не в счет. Они на тех же местах имеются и у теоретических кривых (рис 2), рассчитанных при $k=\text{constant}$.

Нечто подобное имеет место и на других участках геофизических работ, где в качестве носителя геологической информации используется техногенное поле магистральных электрических железнодорожных веток.

Следовательно, неравномерности заземления рельсовых путей больших искажений в профильные распределения значений $\rho_{k,mc}^j$ не вносят, значит, не являются фатальным препятствием для количественной интерпретации этих распределений.

Работа выполнена (частично) при поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН, проект № 15-5-5-38.

Литература

Вишнев В.С. О возможности осуществления глубинного электромагнитного зондирования Земли импульсными токами электрической железной дороги // Уральский

геофизический вестник. УрО РАН: Екатеринбург. 2018. № 3. С. 11 - 16.

Вишнеv В.С. Приемы полевых и камеральных работ в методе электроразведки блуждающими токами тяговой сети железной доро-

ги // Уральский геофизический вестник. УрО РАН: Екатеринбург. 2012. № 2 (20). С. 14 - 30.

Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965, 464 с.

APPARENT RESISTIVITY CURVES OF GEOPHYSICAL EXPLORATION BY PULSE CURRENTS OF ELECTRIC RAILWAY FOR DIFFERENT GROUNDING OF RAILS

Vishnev V.S., Gorshkov V.Yu. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The theoretical and experimental curves of the apparent resistivity of the electrical exploration method based on use of anthropogenic impulse field of an electric railway are calculated. It is found that the experimental curves of this parameter, built on the same source materials, but with different ratios of linear rail resistivity and linear resistivity of the rail – ground transition, as well as theoretical, differ from each other almost everywhere only in level. It is concluded that uneven grounding of rails is not an obstacle to quantitative interpretation of the curves.

The railways, noise, pulses, friendly signal, model, parameters, field, the apparent resistance curves

References

Vishnev V.S. On the possibility of deep electrical sensing of the Earth by pulse currents of the electric railway // Ural'skii Geofizicheskii Vestnik, 2018. № 3, pp 11 - 16.

Vishnev V.S. The field works and office studies techniques in stray currents geoelectrical

method // Ural'skii Geofizicheskii Vestnik, 2012. № 2 (20). pp 14 - 30.

Markvardt K.G. Energosnabzheniye elektricheskikh zheleznykh dorog. M.: Transport, 1965, 464 p.