

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ,
ВЫЗВАННЫХ ПОДЗЕМНЫМ ЯДЕРНЫМ ВЗРЫВОМ,
НА ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
(ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ)**

Александр Николаевич Шеин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики; Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30, доцент, тел. (383)330-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Светлана Юрьевна Артамонова

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-27-92, e-mail: artam@igm.nsc.ru

В работе обсуждаются результаты 3D моделирования индукционных переходных характеристик над средой, изменённой в результате подземного ядерного взрыва. Рассмотрено несколько геоэлектрических моделей последствий ПЯВ. Показано, что метод ЗС позволяет определить латеральное распределение последствия взрыва. Вертикальные размеры нарушения среды определяются лишь при некоторых допущениях (форма зоны разрушения, глубина залегания заряда и др.).

Ключевые слова: численное моделирование, зондирование становлением поля, подземный ядерный взрыв.

**EFFECT OF CHANGES OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT
BY THE UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS TO THE INDUCTION
TRANSIENT CHARACTERISTICS (RESULTS OF 3D MODELING)**

Alexandr N. Shein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher; Transbaikal State University, 30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, 672039, Russia, Associate Professor, phone: (383)333-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Nickolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Svetlana Yu. Artamonova

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Senior Researcher, phone: (383)333-27-92, e-mail: artam@igm.nsc.ru

The paper presents the results of 3D modelling of transient induction responses under the medium with consequences of underground nuclear explosions (UNE). Several geoelectrical models of the consequences of explosions are considered. It is shown that the TEM method allows to determine lateral distribution of the consequences of surfactants. The vertical dimensions of the medium disturbance are determined only under certain assumptions (the shape of the fracture zone, the depth of the charge, etc.).

Key words: numerical modeling, transient electromagnetic sounding, underground nuclear explosion.

Подземные ядерные взрывы оказывают воздействие на состояние и состав верхних горизонтов литосферы, представленных как скальными породами, так и мощными толщами рыхлых отложений [1-5]. Вызванные взрывом разрушения приводят к загрязнению окружающей среды вследствие прорыва радионуклидов в момент проведения ПЯВ и их последующей миграция, в том числе с подземными водами [2]. Однако, до сих пор слабо изучены последствия ПЯВ на окружающую, особенно геологическую, среду.

Любые изменения геологической среды, тем более такие ощутимые как от ПЯВ, сказываются на физических полях. Это отражается на данных, полученных геофизическими методами, в том числе электромагнитными. Это показано на полевых примерах, в частности, для метода зондирования становлением (ЗС) поля [2, 3].

Представляет интерес оценка возможностей индукционных нестационарных зондирований при изучении зон влияния ПЯВ. Такая оценка может быть сделана с помощью численного моделирования. Объект исследования – зона разрушения геологической среды под действием ПЯВ, является трёхмерным, поэтому необходимо проводить трёхмерное моделирование нестационарных электромагнитных полей. Такие расчёты выполнены нами с помощью программы Modem3D (авторы Кремер И.А, Иванов М.И.) [7]. Для создания сеток использовалась программа-генератор – Gmsh [8]. Тестирование программы Modem3D на моделях простых геометрических объектов и горизонтально слоистых сред показало, что для широкого класса моделей расчёты выполняются с приемлемой точностью [9]. Считают, что в районе взрыва формируется несколько шарообразных зон воздействия [3,6], поэтому модель, описывающая изменённую под действием взрыва среду, относится к простым.

Выбор параметров геоэлектрической модели последствий ПЯВ (радиус и сопротивление) для оценки возможностей метода ЗС основывался на результатах изучения последствий ПЯВ «Кристалл» [1-2] (в Далдыно-Алакитском районе Якутии). В таблице приведена одномерная геоэлектрическая модель вмещающей среды в районе взрыва.

Тестовая модель горизонтально-слоистой среды

№ слоя	ρ , Ом·м	h, м
1	100	100
2	8	380
3	1	

После ряда тестов были подобраны оптимальные параметры сетки для расчёта нестационарных сигналов над одномерной трёхслойной моделью. Проверка корректности сетки проводилась сравнением полученных с помощью программ Modem3D и UnvQQ (одномерное моделирование, автор Антонов Е.Ю.) сигналов. Моделировался процесс становления соосной петлевой установки: квадратная генераторная петля 100x100 м и соосная с ней приёмная (50x50 м). Относительные отклонения двух переходных процессов (полученных с помощью программ Modem3D и UnvQQ) говорят о том, что их отличия не превышают 1% (рис. 1, слева, чёрная кривая).

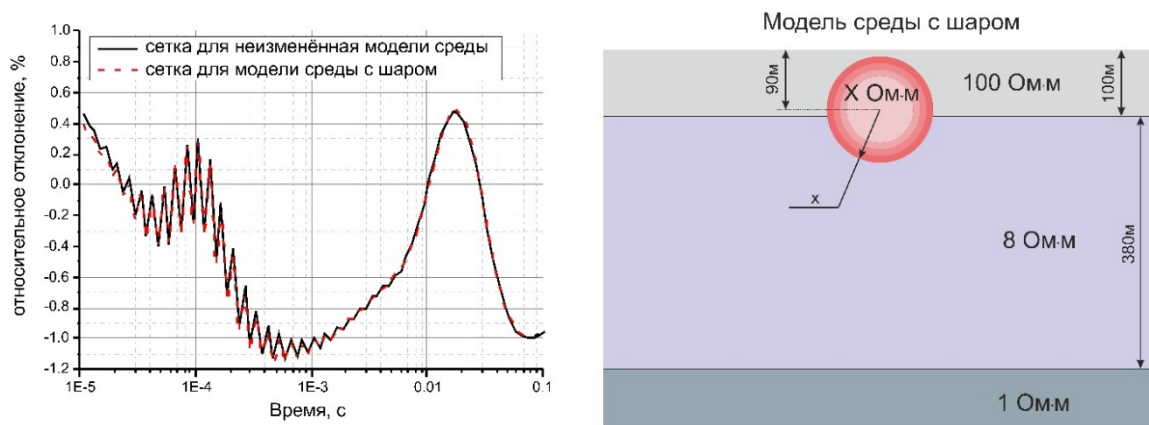


Рис. 1. Относительное отклонение сигналов, полученных с помощью программ Modem3D и UnvQQ (слева) и модель среды (справа)

На следующем этапе была построена модель среды с шаром, который находится в первом и втором слое и имитирует зону, изменённую в результате ПЯВ (рис. 1, справа). Если условно провести верхнюю границу вмещающей среды через шар, она разделит его на 2 части. Центр шара располагается на глубине 90 м, как и место заложения заряда ПЯВ «Кристалл». Для описанной модели была сгенерирована соответствующая тетраэдральная сетка. Расчёты для случая слоистой среды (шар принимает значения сопротивлений вмещающей среды) тестировались и сравнивались с сигналами, полученными с использованием программы UnvQQ (рис. 1, слева, красная пунктирная кривая). Кроме этого проверялась достаточность разбиения шара: оно продолжалось до тех пор, пока изменение сигнала не уменьшилось до 1%. В результате определены оптимальные параметры сетки простейшей модели ПЯВ – шара.

Расчётные сетки для модели вмещающей среды и модели после ПЯВ позволяют получать сигналы над зоной взрыва и оценивать влияние его последствий на переходные характеристики. Мы сделали это, изменяя параметры шара (радиус и сопротивление), получая соответствующие кривые в программе Modem3D и сравнивая их с переходными характеристиками над слоистой (неизменённой) средой. Полученные оценки о влиянии изменений геологической среды под воздействием ПЯВ на индукционные переходные характеристики позволили дать рекомендации по использованию данного метода при картировании таких объектов.

ПЯВ «Кристалл» был произведен в верхнекембрийских карбонатных породах маркокинской свиты на участке, расположенном на восточной окраине Тунгусской синеклизы Сибирской платформы. Криолитозона в районе ПЯВ «Кристалл» имеет трехъярусное строение. Подмерзлотная часть разреза, насыщена солеными водами и рассолами, минерализация которых может достигать 400 г/дм^3 . Гидравлическая связь между комплексами возможна через проницаемые зоны тектонических нарушений в осадочных толщах и кимберлитовых телах [2, 10]. Анализ гидро-геологической ситуации позволил провести оценку параметров зоны разрушения: максимально возможные размеры воздействия взрыва $\sim 90 \text{ м}$ (радиус) [3, 6], а сопротивления могут варьироваться от 0.1 до $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [2].

Рассмотрены два случая. Сначала приняли, что сопротивление шара равно $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, при этом радиусы изменялись: 50 , 60 и 70 м . Затем зафиксировали радиус ($R=60 \text{ м}$) и изменяли сопротивление шара: 0.1 , 1 и $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В результате были получены кривые становления в эпицентре взрыва, которые мы сравнили с сигналом становления над трёхслойной вмещающей (неизменённой) средой путём вычисления относительного отклонения на каждом времени. На рис. 2 представлены графики, которые иллюстрируют насколько (в %) изменяется кривая после воздействия ПЯВ в зависимости от степени разрушения (радиус) и материала полости (сопротивление).

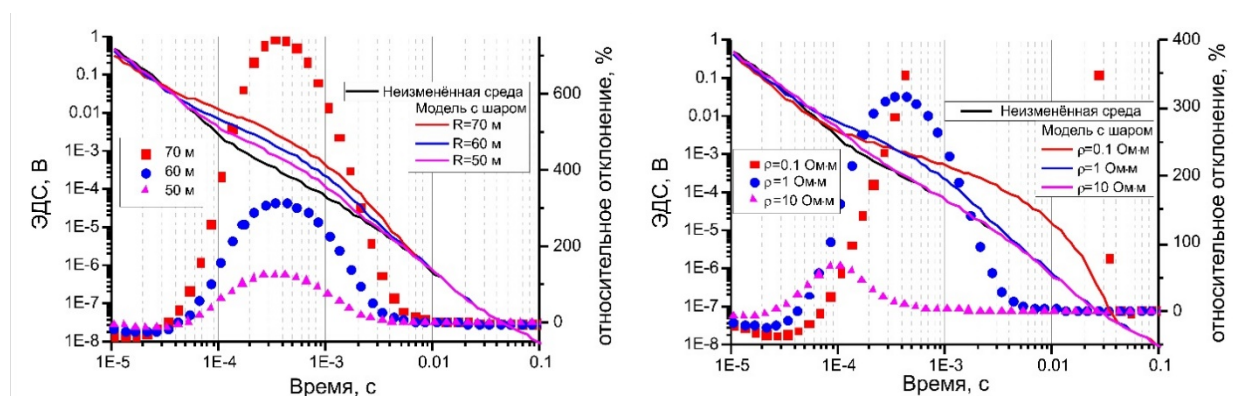


Рис. 2. Рассчитанные кривые становления (сплошные линии) и отклонения относительно сигнала над одномерной средой (точечные графики) для различных радиусов (слева) и сопротивлений (справа) шара

На рис. 2 представлены кривые становления в эпицентре взрыва (сплошные линии) и отклонения относительно переходного процесса над вмещающей средой (точечные графики). Видно, что при увеличении радиуса шара с фиксированным сопротивлением (рис. 2, слева), отклонения возрастают, а временной диапазон влияния взрыва остаётся неизменным ($3 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ с). При уменьшении сопротивления шара радиуса 60 м увеличивается отклонение, при этом изменяется интервал времён: он становится шире, а при значении 0.1 Ом·м практически вся кривая искажена. Таким образом, даже при относительно небольших изменениях геологической среды ($R=60$ м, $\rho = 10$ Ом·м) изучаемый объект проявился в данных ЗС.

Такой важный параметр последствий ПЯВ как радиус зоны разрушения (шара) возможно оценить с помощью профилирования. Мы рассчитали несколько кривых становления вдоль профиля, начинающегося в эпицентре взрыва с параметрами $R=60$ м, $\rho = 1$ Ом·м. Вычисления проводились с равномерным шагом по профилю (50 м). Анализ этих данных, позволил определить границы области влияния последствий ПЯВ на сигнал. Там, где кривая становления приблизилась к сигналу над одномерной средой на величину инструментальной погрешности (5%), влияние объекта стало незначительным. На рис. 3 (слева) схематично изображён шар (серый сектор). Кроме этого, представлены средние значения относительного отклонения переходных характеристик над трёхмерной моделью и вмещающей средой на рассматриваемом интервале времён. Такая величина получена для каждой точки профиля (чёрные квадраты) и проведена их интерполяция (рис. 3, слева, сплошная красная линия). Видно, что на удалении 140-160 м от эпицентра среднее значение отклонений становится меньше 5%. Таким образом, при выходе контура генераторной петли за пределы шара, вызванная им аномальная составляющая, уменьшается до уровня шума (5%). То же самое видно на переходных характеристиках (рис. 3, справа): при удалении от эпицентра сигнал, искажённый изменениями, вызванными ПЯВ (цветные кривые), приближается к сигналу становления над одномерной средой (чёрная кривая) и на удалении 200 м совпадает с ней.

Вычисления с другими параметрами шара, показали, что латеральные размеры последствий ПЯВ можно определить с помощью метода ЗС.

Рассматриваемая модель последствий ПЯВ в виде шара является упрощённой. Поэтому мы слегка усложнили её: эллипсоид вместо шара (рис. 4, справа), который располагается в первом и втором слое. Объёмы шара и эллипсоида (полуоси 100, 90 и 57 м) равны. Для такой модели была построена тетраэдральная сетка и проведены тесты (как и в случае шара), которые подтвердили корректность дальнейших расчётов.

Результаты моделирования нестационарных сигналов над средой с последствиями ПЯВ в форме эллипсоида показали, что в вертикальном направлении определить точную форму изменений геологической среды, вызванную ПЯВ, сложнее, чем в латеральном. На рис. 4 (слева) представлены кривые становления над геоэлектрическими моделями с постепенным погружением гипоцентра

взрыва (сплошные линии). Там же представлены отклонения сигналов над трёхмерной средой относительно расчёта для неизменной модели (точечные графики).

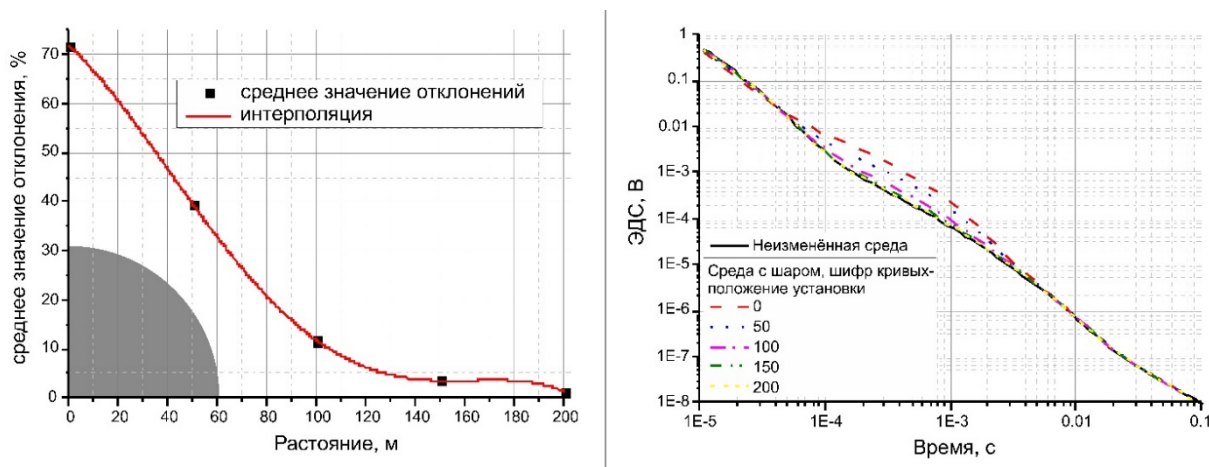


Рис. 3. Влияние последствий ПЯВ на нестационарный сигнал в зависимости от расстояния до эпицентра: среднее значение отклонения (слева) и сигналы (справа)

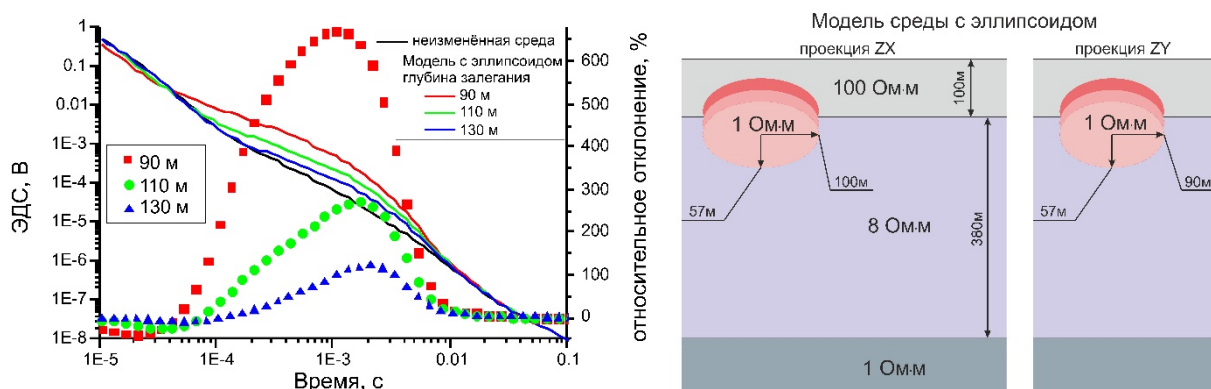


Рис. 4. Кривые становления (сплошные линии) и отклонения относительно переходного процесса над одномерной средой (точечные графики) для различной глубины залегания эллипсоида (справа) и модель среды с эллипсоидом (слева)

Относительные отклонения показали, что интервал времён, где проявляется влияние эллипсоида при его погружении остаётся неизменным. Однако в сравнении с интервалом, возникающем в случае модели с шаром, он сдвигается: $7 \cdot 10^{-5} - 10^{-2}$ вместо $3 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$ с. Такое поведение сигнала даёт картину, эквивалентную той, что была при уменьшению радиуса шара. Очевидно, без априорных данных (мощность заряда, глубина заложения и т.д.), определить вертикальные параметры зоны разрушения затруднительно.

Для моделей нарушений геологической среды в результате ПЯВ помимо зон воздействия характерно присутствие ствола обрушения [2, 6]. Такой объект имитируется узким вертикальным эллипсоидом. Расчёты показали, что если ствол обрушения заполнен тем же материалом (или близким по сопротивлению), что и основная зона разрушения, то такой объект не оказывает заметного воздействия на сигнал становления. Если же, ствол заполнен проводником (например, остатками металлической обсадки), то это влияние будет значительное, но достаточно локальное, как это показано во многих работах [11, 12]. Поэтому при детальном исследовании такую помеху можно будет с уверенностью идентифицировать.

Заключение

В результате трёхмерного моделирования нестационарных сигналов с помощью программы Modem3D, на примере ПЯВ «Кристалл» показано, что при ожидаемых параметрах зоны нарушения ($R=60$ м, $\rho=10$ Ом·м), возникших в результате ПЯВ, метод ЗС позволяет определить латеральное распределение последствия ПЯВ. При некоторых допущениях (форма зоны разрушения, глубина залегания заряда и др.) возможно определить вертикальные размеры нарушения.

Трёхмерное моделирование целесообразно использовать при проектировании работ по исследованию последствий ПЯВ.

Полевые данные, полученные над изменённой в результате ПЯВ геологической средой, необходимо интерпретировать с использованием трёхмерного моделирования нестационарных индукционных сигналов.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0007 «Геоэлектрика в исследованиях геологической среды: технологии, полевой эксперимент и численные модели».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия) / С.Ю. Артамонова, Л.Г. Бондарева, Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2012. – № 2. – С. 143–158.
2. The geoelectric structure at the site of “Crystal” underground nuclear explosion (Western Yakutia) from TEM data / N.O. Kozhevnikov, E.Yu. Antonov, S.Yu. Artamonova, A.E. Plotnikov // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – Vol.53. – № 2. – P. 185-193.
3. Artamonova S.Y., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Permafrost and groundwater settings at the site of "Kraton-3" peaceful underground nuclear explosion (Yakutia), from TEM data // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – Vol.54. – № 5. – P. 555-565.
4. Воздействие подземных ядерных взрывов на природную среду Севера / В.П. Мельников, Н.Г. Оберман, И.А. Велижанина, Н.М. Давиденко // Геология и геофизика. – 2000. – т.41. – 2. – С. 280—291.
5. Стогний В.В. Локальный геофизический мониторинг мест проведения подземных ядерных взрывов в Якутии // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия). Мате-

риалы II Республиканской научно-практической конференции. Якутск, ЯФГУ «Изд-во СО РАН». – 2004. – С. 252—260.

6. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. М., Наука. – 2007. – 579 с.

7. Программное обеспечение Modem3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации / М.И. Иванов, В.А. Катешов, И.А. Кремер, М.И. Эпов // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 242 – 245.

8. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – Vol. 79. – №11 –P. 1309-1331.

9. Шеин А.Н. Особенности программы для расчёта нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах Modem3D // Материалы Всероссийской научной конференции в 2-х т. Т.2 / Старооскольский филиал ФГЮОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кириллица». – Старый Оскол, – 2013. – С. 99-104.

10. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск, Академическое изд-во «Гео». – 2009. – 319 с.

11. Кауфман А.А. Основы теории индуктивной рудной электроразведки. Новосибирск, Наука. – 1974. – 352 с.

12. Effects of borehole casing on TEM response / N.O. Kozhevnikov, E.Yu. Antonov, Ya.K. Kamnev, V.V. Olenchenko, A.E. Plotnikov, S.M. Stefanenko, A.N. Shein // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Vol. 55. – №11. – P. 1333–1339.

© А. Н. Шеин, Н. О. Кожевников, С. Ю. Артамонова, 2019