

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ В СЛОЖНЫХ ГЕОТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА МИРНОГО ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА «КРИСТАЛЛ» (ЯКУТИЯ)**

### ***Александр Николаевич Шеин***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Научный центр изучения Арктики, 629008, Россия, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, д. 20, ведущий научный сотрудник; Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, Забайкальский край, г. Чита, ул.Александро-Заводская, д.30, доцент, e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

### ***Светлана Юрьевна Артамонова***

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

### ***Владимир Владимирович Потанов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, д.30, доцент, тел. (383) 330-41-22, e-mail: PotanovVV@ipgg.sbras.ru

### ***Николай Олегович Кожевников***

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

### ***Владислав Егорович Ушницкий***

677000, Россия, г. Якутск, ул. Пояркова, д. 21/1, e-mail: ushnitski@mail.ru

В работе приводятся результаты применения в 2019 г. метода электротомографии на площадке боевой скважины мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл», проведенного в 1974 г. на глубине 98 м в многолетнемерзлых кембрийских карбонатных породах, и прилегающем лесном участке. Забор из металлических столбов и колючей проволоки, которым обнесена площадка, и погребенные фрагменты обсадной колонны боевой скважины создавали значительные помехи при замерах. Для устранения шума проведена детальная ручная чистка измеренных данных кажущегося удельного электрического сопротивления. Инверсия данных проведена в программе Res2Dinv с получением геоэлектрических моделей – двумерных разрезов верхней части геологической среды на глубину до 80 м. Для уточнения моделей проводилось прямое моделирование с использованием программы ZondRes2D.

**Ключевые слова:** электротомография, мирный подземный ядерный взрыв, Якутия, геологическая среда, многолетняя мерзлота, геотехногенная система, геоэкологические исследования

## THE ELECTROTOMOGRAPHY SURVEY IN DIFFICULT GEOTECHNOGENIC CONDITIONS AT THE PEACEFUL UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSION "CRYSTAL" SITE

### *Alexandr N. Shein*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher; Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, 20 Respubliki st., Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Tyumen region, 629008, Russia, Research Scientist; Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia, Associate Professor; e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

### *Svetlana Yu. Artamonova*

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Akademika Koptyuga Prosp., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, D. Sc., Senior Researcher; tel. (383)333-27-92, e-mail: artam@igm.nsc.ru

### *Vladimir V. Potapov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher; Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia, Associate Professor, tel. (383) 333-41-22, e-mail: PotapovVV@ipgg.sbras.ru

### *Nikolay O. Kozhevnikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Scientist, tel. (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

### *Vladislav E. Ushnitskii*

Poyarkova str., 21/1, Yakutsk, 677000, Russia, e-mail: ushnitski@mail.ru

The paper presents the results of measurements in 2019 by electrotomography at the site of the emplacement hole of the peaceful underground nuclear explosion "Crystal", carried in 1974 at a depth of 98 m in permafrost Cambrian carbonate rocks, and the neighboring forest area. The fence made of metal poles and barbed wire around the site, and the buried fragments of the casing of the emplacement hole create significant interference of measurements. To avoid the electromagnetic noise, the measured data of the apparent electrical resistivity was cleaned manually. Data inversion was performed in the Res2Dinv program. Geoelectric models, namely two-dimensional sections of the upper part of the geological environment to a depth of up to 80 m, were obtained. To verify the models, forward modeling was performed using the ZondRes2D program.

**Keywords:** electrical resistivity tomography, peaceful underground nuclear explosion, Yakutia, geological environment, permafrost, geotechnogenic system, geocological research

### *Введение*

Во второй половине XX века во всём мире активно использовали ядерную энергию для осуществления «мирных» задач. Мирный подземный ядерный взрыв (ПЯВ) «Кристалл» был проведен в 1974 г. в 8 км от г. Удачный (Якутия) для создания навала для плотины нового хвостохранилища. Поставленная «мирная» задача не была решена, а взрыв, заложенный на глубину 98 м, признали

аварийным. Начиная с 1990 г. объект ПЯВ «Кристалл» и вызванные им последствия изучаются рядом научных и производственных организаций [1-5].

В дополнение уже выполненных работ на объекте «Кристалл» [6, 7], в 2019 г. были проведены измерения методом электротомографии (ЭТ). На площадке боевой скважины «Кристалл» сложные геотехногенные условия для замеров ЭТ обусловлены присутствием погребенных на глубине фрагментов обсадной колонны боевой скважины, и забора из металлических столбов и колючей проволоки, возведённого вокруг площадки боевой скважины (рис. 1, салатный контур), создающих значительные помехи. На площадке боевой скважины растительный покров нарушен, поросль молодых невысоких деревьев и кустов наблюдается только на ее юго-западном участке. За забором сохраняется природный таежный ландшафт.

Целью нашей работы было построение двумерных геоэлектрических моделей верхней части геологической среды под эпицентром ПЯВ «Кристалл» и верификация полученных моделей с помощью численного моделирования.

### *Методика измерений*

Полевые измерения методом ЭТ, являющейся модификацией метода сопротивлений [8], выполнялись многоэлектродной электроразведочной станцией «СКАЛА 48» (производство КБ «Электрометрия» и ИНГГ СО РАН, Новосибирск) по 7-ми выбранным профилям в 2019 г. (рис. 1). Межэлектродный шаг составлял 5 м, при этом использовалась поле-дипольная прямая и обратная (трёхэлектродная) установка, с выносом удалённого электрода на 1 км перпендикулярно профилям. Глубинность исследования достигала 80 м. Общий объем работ методом ЭТ составил 3805 п.м., в том числе 300 п.м. контрольных измерений.

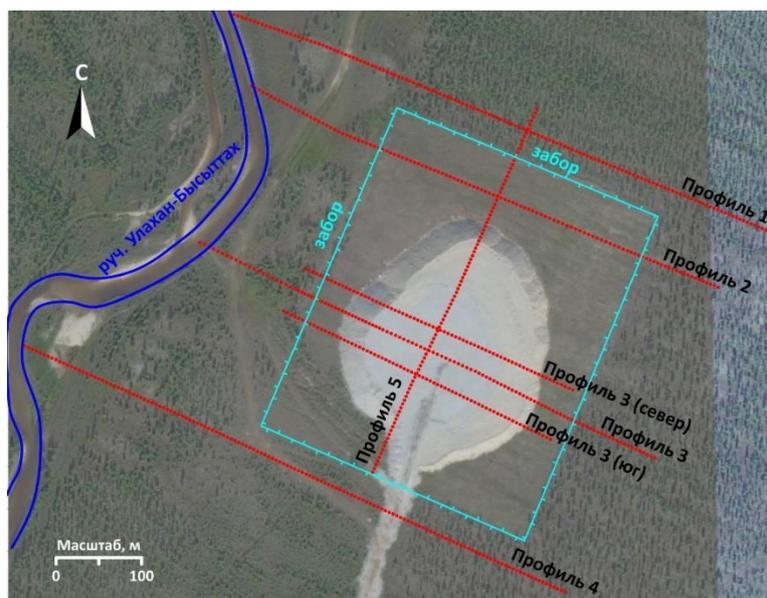


Рис. 1. Схема расположения профилей ЭТ на объекте «Кристалл» в 2019 г.

## Методика обработки данных и моделирования

Массив первичных данных кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) обрабатывался в ручную с отбраковкой anomalно низких значений, по нашему мнению, главным образом, обусловленных влиянием металлического забора и погребенных фрагментов обсадной колонны боевой скважины. Кроме того, проводилась отбраковка выбивающихся значений кажущегося УЭС на разных уровнях (зависимость значений УЭС от глубины относительно среднего значения). Затем проводилась инверсия в программе Res2DInv с учётом влияния рельефа, с использованием робастной инверсии со стандартным методом Гаусса-Ньютона. Использовалась более густая расчётная сетка, что позволило улучшить детальность неоднородной, в том числе из-за присутствия забора, верхней части разреза [9].

Для верификации полученных моделей проводилось численное моделирование с использованием программы ZondRes2D и Res2DInv. В первой решалась прямая задача, а во второй проводилась инверсия полученных синтетических данных.

### Результаты измерений

Рассмотрим профиль 2 длиной 595 м, который проходил от участка нетронутой тайги на высоте около 330 абс. м и заканчивающегося у русла руч. Улахан-Бысыттах на высоте 300 абс. м., с двойным пересечением металлического забора (рис. 2). В результате инверсии измеренных данных кажущегося УЭС был построен двумерный геоэлектрический разрез с учётом рельефа (рис. 2).

В верхней части разреза прослеживается сезонно-талый слой (СТС) мощностью 2–3 м, где УЭС меняются от десятков до сотен Ом·м. Ниже наблюдается существенное возрастание УЭС до  $10^3$ – $10^4$  Ом·м. Мощность этого слоя на площадке боевой скважины составляет около 20 м, а в нетронутом таежном участке забором простирается на всю глубину разреза (80 м). В пределах площадки боевой скважины этот высокоомный слой ниже сменяется на проводящий слой с УЭС до 10 Ом·м. Можно допустить, что в нашей геоэлектрической модели именно помехи от металлического забора приводят к «появлению» этого проводящего слоя. Тем более, что влияние забора очевидно прослеживается на 100 м и 425 м профиля 2 (рис. 2, оттенки синего) на глубину до 60 м. С целью выяснения природы этого слоя и/или подтверждения ложности его anomalно низких УЭС проведено численное моделирование данных ЭТ для геоэлектрических моделей, сформированных на основании априорной информации (геология и забор).

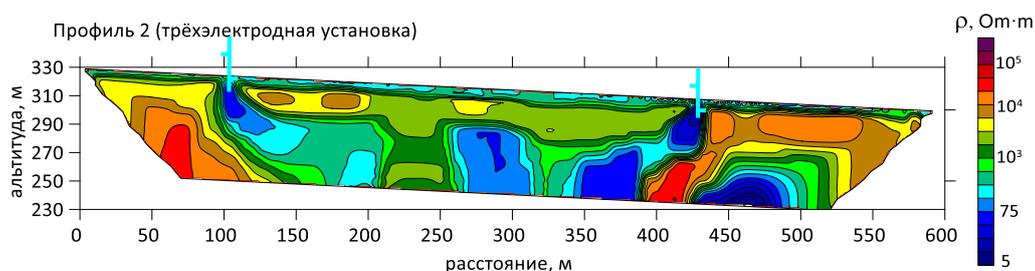


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю 2 полученный в результате измерений методом электротомографии трёхэлектродной установкой

## Результаты моделирования

Прежде всего, мы проверили влияние забора на результат инверсии. Для этого была составлена горизонтально-слоистая модель, соответствующая разрезу нетронутого таежного участка (рис. 3), в которой выделили верхний слой мощностью 2 м с УЭС 100 Ом·м, соответствующий сезонно-талому слою. Под ним был задан второй 20- метровый слой с УЭС 10 кОм·м, а его подстилал третий слой с УЭС 2 кОм·м. В верхнем слое задали два объекта, имитирующих металлический забор, размером каждого 4х2 м с УЭС 0.1 Ом·м.

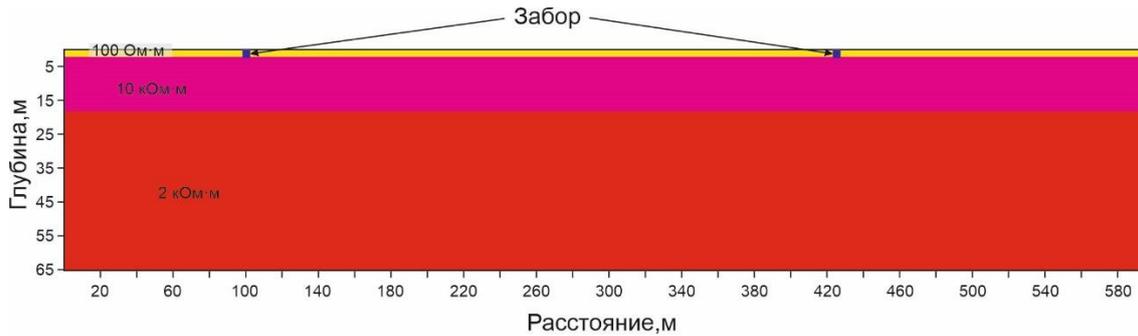


Рис. 3. Геоэлектрическая модель среды с проводящими включениями, имитирующими забор

Прямая задача ЭТ решалась в программе ZondRes2D для трёхэлектродной установки с параметрами, которые соответствуют полевым измерениям (межэлектродный шаг 5 м, длина профиля 595 м). Были получены синтетические данные кажущегося УЭС, которые подвергли инверсии в программе Res2DInv. В результате получена синтетическая двумерная геоэлектрическая модель (рис. 4), которая показала распространение аномалий низких УЭС, генерируемых заданным «металлическим забором», на всю глубину разреза. При сравнении с геоэлектрической моделью, полученной на основе измеренных данных ЭТ на профиле 2 (рис. 2), ясно увидим схожесть аномалий низких УЭС заданного «металлического забора» и участков пересечения реального металлического забора на площадке объекта «Кристалл». При этом несомненно явные различия этих геоэлектрических моделей прослеживаются в их центральной части.

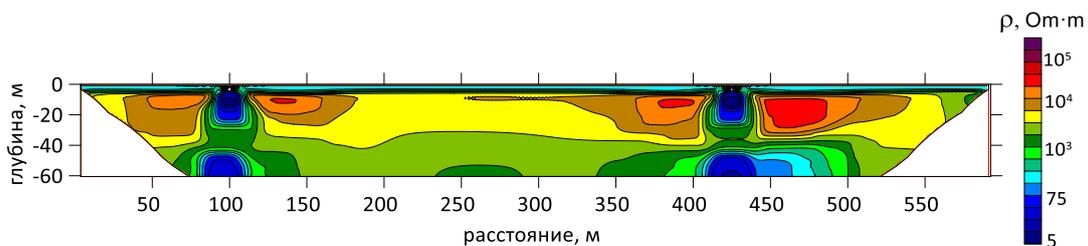


Рис. 4. Геоэлектрический разрез полученный в результате инверсии данных рассчитанных для модели с проводящими включениями, имитирующими забор

Следующим шагом синтетическую модель осложнили вводом на разные глубины ее центральной части несколько проводящих объектов различной формы с низкими УЭС (1.8; 3 и 11 Ом·м) (рис. 5).

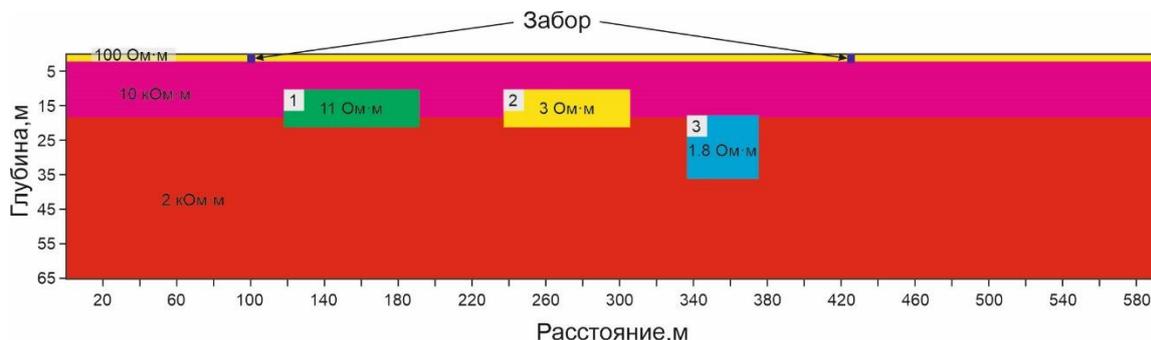


Рис. 5. Геоэлектрическая модель среды с включениями, имитирующими забор и проводящими объектами

Затем снова повторили процедуру прямого моделирования в программе ZondRes2D с последующей обратной инверсией полученных синтетических данных в программе Res2DInv и получили соответствующую геоэлектрическую модель (рис. 6). Согласно этой модели, объекты 1 и 2, находящиеся практически полностью во втором слое, формируют аномалию низких УЭС на всю глубину разреза. При этом влияние объекта 3, погруженного полностью в третий слой, на геоэлектрическую модель в целом оказалось незначительным, несмотря на более низкие исходно заданные УЭС по сравнению с объектами 1 и 2 (1.8 Ом·м вместо 11 и 3 Ом·м). Полученная синтетическая геоэлектрическая модель оказалась подобной модели, полученной при инверсии измеренных данных. Что дает основание предположить, что выявленные аномалии низких УЭС в центральной части профиля 2 (рис. 2) не связаны с помехами, вызванными металлическим забором, их источниками являются другие объекты, возможно талые пласты, насыщенные соленой водой, или металлические (железные) электропроводящие фрагменты. Согласно нашего предположения, проводящая зона в центральной части разреза профиля 2 могла возникнуть вследствие деградации многолетнемерзлых отложений на глубинах до 20 м.

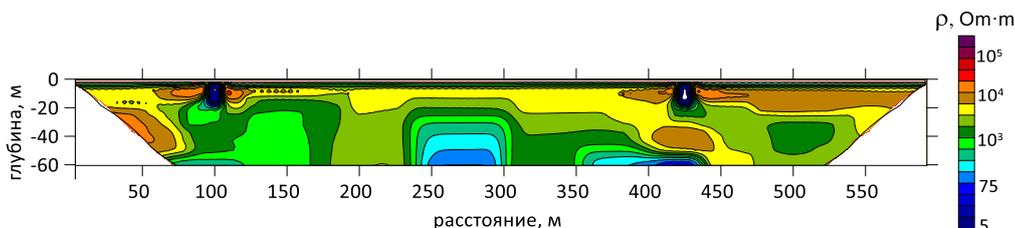


Рис. 6. Геоэлектрический разрез полученный в результате инверсии данных рассчитанных для модели с включениями, имитирующими забор и проводящими объектами

## **Выводы**

Металлические объекты: забор и погребенные фрагменты обсадной колонны боевой скважины затрудняют интерпретацию данных ЭТ, создавая геоэлектрические аномалии сверхнизких УЭС. Вместе с тем, индивидуальный подход к каждому набору первичных данных кажущегося УЭС позволяет выполнить инверсию на хорошем уровне.

Эффективным инструментом для верификации полученной в результате инверсии геоэлектрической модели является прямое моделирование с последующей инверсией синтетических данных.

## **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-45-140020, по государственному заданию ИГМ СО РАН, по государственному заказу № Ф.2019.473808 в рамках программы «Обеспечение экологической безопасности, рационального природопользования и развитие лесного хозяйства Республики Саха (Якутия) на 2018 – 2022 гг.».

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бурцев, И. С., Степанова, С. К., Колодезникова, Е. Н., Архипов, Н. Д. Опыт работы по обследованию подземных ядерных взрывов и отвалов урансодержащих руд на территории Якутии // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия). Материалы II Республиканской научно-практической конференции. Якутск, ЯФГУ. – «Изд-во СО РАН», 2004 – С. 56–67.
2. Микуленко К.И., Чомчоев А.И., Готовцев С.П. Геолого-географические условия проведения и последствия подземных ядерных взрывов на территории Республика Саха (Якутия). Якутск. – Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006 – 196 с.
3. Ramzaev V., Mishine A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski V., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. – V. 100. – Issue 12. – P. 1092-1099.
4. Собакин П.И. Миграция  $^{137}\text{Cs}$  в мерзлотных почвах Якутии // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2010. – Т.50. – №5. – С. 590-598.
5. Артамонова, С. Ю., Бондарева, Л. Г., Антонов, Е. Ю., Кожевников, Н. О. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва Кристалл (Якутия). // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2. – 2012 – С. 143-158.
6. Kozhevnikov N. O., Antonov E. Y., Artamonova S. Y., Plotnikov A. E. The geoelectric structure at the site of “Crystal” underground nuclear explosion (Western Yakutia) from TEM data // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – Vol.53. – № 2. – P. 185-193.
7. Артамонова С. Ю., Шейн А. Н., Потапов В. В., Кожевников Н. О., Новикова П. Н., Ушницкий В. Е. Магнитные аномалии на площадке объекта мирного подземного ядерного взрыва "Кристалл"(Западная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. – 2020. – 331(12). – С. 158-172.
8. Балков, Е. В., Панин, Г. Л., Манштейн, Ю. А., Манштейн, А. К., Белобородов, В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. – №6 – 2012. — С. 54–63.
9. Manual for RES2DINV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geotomosoft.com/r2dimanu.zip> (дата обращения: 20.04.2021).

## REFERENCES

1. Burcev, I. S., Stepanova, S. K., Kolodeznikova, E. N., Arhipov, N. D. Opyt raboty po obsledovaniyu podzemnyh yadernyh vzryvov i otvalov uransoderzhashchih rud na territorii YAkutii // Radiacionnaya bezopasnost' Respubliki Saha (YAkutiya). Materialy II Respublikanskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. YAkutsk, YAFGU. – «Izd-vo SO RAN», 2004 – S. 56—67.
2. Mikulenko K.I., CHomchoev A.I., Gotovcev S.P. Geologo-geograficheskie usloviya provedeniya i posledstviya podzemnyh yadernyh vzryvov na territorii Respublika Saha (YAkutiya). YAkutsk. – Izd-vo YANC SO RAN, 2006 – 196 s.
3. Ramzaev V., Mishine A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski V., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. – V. 100. – Issue 12. – P. 1092-1099.
4. Sobakin P.I. Migraciya  $^{137}\text{Cs}$  v merzlotnyh pochvah YAkutii // Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2010. – T.50. – №5. – S. 590-598.
5. Artamonova, S. YU., Bondareva, L. G., Antonov, E. YU., Kozhevnikov, N. O. Geoeologicheskaya model' rajona mirnogo podzemnogo yadernogo vzryva Kristall (YAkutiya). // Geoeologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya, 2. – 2012 – S. 143-158.
6. Kozhevnikov N. O., Antonov E. Y., Artamonova S. Y., Plotnikov A. E. The geoelectric structure at the site of “Crystal” underground nuclear explosion (Western Yakutia) from TEM data // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – Vol.53. – № 2. – P. 185-193.
7. Artamonova S. YU., SHein A. N., Potapov V. V., Kozhevnikov N. O., Novikova P. N., Ushnickij V. E. Magnitnye anomalii na ploshchadke ob"ekta mirnogo podzemnogo yadernogo vzryva "Kristall"(Zapadnaya YAkutiya) // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2020. – 331(12). – S. 158-172.
8. Balkov, E. V., Panin, G. L., Manshtejn, YU. A., Manshtejn, A. K., Beloborodov, V. A. Elektrotomografiya: apparatura, metodika i opyt primeneniya // Geofizika. – №6 – 2012. — С. 54–63.
9. Manual for RES2DINV [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.geotomsoft.com/r2dimanu.zip> (data obrashcheniya: 20.04.2021).

© А. Н. Шейн, С. Ю. Артамонова, В. В. Потапов,  
Н. О. Кожевников, В. Е. Ушницкий, 2021