

# СБОРНИК ТЕЗИСОВ

**ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА**  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ **2021**

Москва  
2021



**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ  
НА ОБЪЕКТЕ «КРИСТАЛЛ» (ЯКУТИЯ) В 2019 Г.**

Шеин А.Н.<sup>1,2,3</sup>, Артамонова С.Ю.<sup>4</sup>, Потапов В.В.<sup>1,3</sup>,  
Кожевников Н.О.<sup>1</sup>, Ушницкий В.Е.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимук СО РАН,  
г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюг, 3;*

<sup>2</sup>*Научный центр изучения Арктики, ЯНАО, г. Салехард, ул. Республики, д. 20;*

<sup>3</sup>*Забайкальский государственный университет, г. Чита,  
ул. Александровская, д.30;*

<sup>4</sup>*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболев СО РАН,  
г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюг, 3;*

<sup>5</sup>*г. Якутск, ул. Полярков, д. 21/1*

**Реферат**

В работе приводятся предварительные результаты измерений методом электротомографии (ЭТ) в 2019 г. на объекте мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл», который был проведен в 1974 г. на глубине 98 м в многолетнемерзлых кембрийских карбонатных породах. Прослежено современное геоэлектрическое состояние геологической среды на глубину до 80 м. Несмотря на помехи, создаваемые фрагментами обсадной трубы боевой скважины и другими погребенными металлическими обломками, под эпицентром взрыва выявлена крупная проводящая аномалия, природу которой еще предстоит устанавливать с помощью математического моделирования и дополнительных исследований.

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

**MEASUREMENTS BY THE METHOD OF ELECTRICAL RESISTIVITY  
TOMOGRAPHY AT THE «CRYSTAL» (YAKUTIA) SITE IN 2019**

Shein A.N.<sup>1,2,3</sup>, Artamonova S.Yu.<sup>4</sup>, Potapov V.V.<sup>1,3</sup>,  
Kozhevnikov N.O.<sup>1</sup>, Ushnitskii V.E.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3,  
Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk;*

<sup>2</sup>*Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District,  
20 Respubliki st., Salekhard;*

<sup>3</sup>*Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita;*

<sup>4</sup>*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3,  
Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk;*

<sup>5</sup>*21/1, Poyarkova, Yakutsk*

### Abstract

The paper presents the preliminary results of 2019, obtained by measurements by electrical resistivity tomography (ERT) at the site of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal», which was provided in 1974 at the 98 m of depth in frozen Cambrian limestone and dolomite. Contemporary state of host geological environment at depths down to 80 m is studied. Even though irrelevant information induced by buried metal technical fragments, including fragments of emplacement hole casing, however, the large conducting anomaly was revealed under the epicenter of the explosion. The nature of this anomaly is supposed to be recognized with the using of mathematical modeling and additional research.

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

### Введение

В 1974 г. в 8 км от г. Удачный (Якутия) был проведен мирный подземный ядерный взрыв (ПЯВ) «Кристалл», отнесенный к аварийным. Начиная с 1990 г. объект ПЯВ «Кристалл» изучался рядом научных и производственных организаций [Буцев и др., 2004; Микуленко и др., 2006]. На объекте «Кристалл» ведется радиоэкологический мониторинг [Ramzaev et al., 2009, Собкин и др., 2010, Артмонов и др., 2012].

В 2008 г. с целью изучения состояния геотехногенной системы «ПЯВ – геологическая среда» были проведены работы методом зондирования становлением (ЗС), которые позволили выявить признаки воздействия взрыва на вмещающие горные породы и водоносные горизонты [Артмонов и др., 2012; Козhevnikov et al., 2012; Artamonova et al., 2013]. А в 2019 г. с помощью наземной магнитной съемки сотрудниками ИГМ СО РАН и ИНГГ СО РАН проведена детализация расположения погребенных железных технических конструкций и их обломков под насыпью щебнистого материала, перекрывающей устье боевой скважины [Артмонов и др., 2020]. Теперь эти железные объекты можно учесть при исследованиях другими электромагнитными методами. Кроме того, нужно будет учитывать влияние забора из металлических труб, соединенных колючей проволокой, которым обнесена площадка ПЯВ «Кристалл».

Целью нашей работы было построение двумерных геоэлектрических моделей верхней части геологической среды под эпицентром ПЯВ «Кристалл» и его окрестностей на основе полевых замеров кажущегося удельного электрического сопротивления по профилям методом электротомографии (ЭТ).

### Методик измерений

Полевые измерения методом ЭТ, являющейся модификацией метода сопротивлений [Балков и др., 2012], выполнялись многоэлектродной электроразведочной станцией «СКАЛА 48» (производство КБ «Электрометрия» и ИНГГ СО РАН, Новосибирск) по 7-ми выбранным профилям в 2019 г. (рис. 1). Коммутатор аппаратуры, к которой подключаются многожильные кабели (электроразведочные косы), автоматически переключает по заданной

схеме соответствующие электроды, в виде заземленных в грунт железных штырей, соединенных с 48-ью выводами на косах. Межэлектродный шаг составлял 5 м, при этом использовалась поле-дипольная (трёхэлектродная) установка, с выносом удалённого электрода на 1 км перпендикулярно профилям. На профиле 3 для оценки качества и сравнения разрешающей способности использовалась диполь-дипольная установка. Первая установка позволяет достигать глубинности до 80 м, вторая – 40 м. Общий объем работ методом ЭТ составил 3805 п.м., в том числе 300 п.м. контрольных измерений.

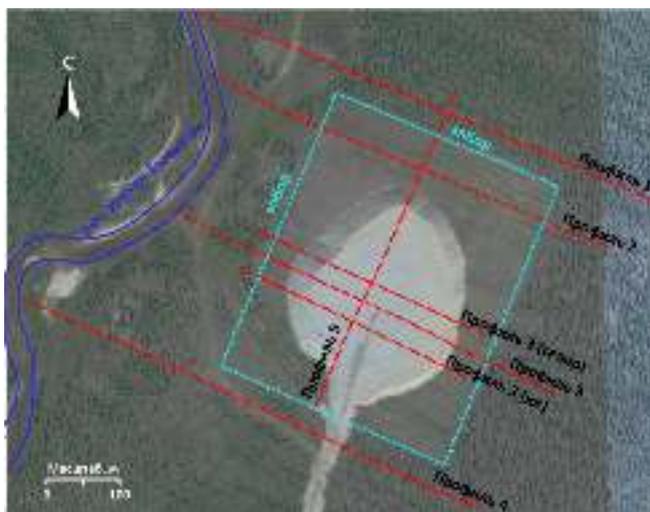


Рис. 1. Схема расположения профилей ЭТ на объекте ПЯВ «Кристалл» в 2019 г.

Первичные данные распределения кажущегося удельного электрического сопротивления по глубине вдоль профиля измерений обрабатывались программой Res2Dinv с учётом влияния рельефа, с использованием робастной инверсии со стандартным методом Гаусса-Ньютона. Эта двумерная автоматическая инверсия данных кажущегося электрического сопротивления позволяет определить соответствующие удельные электрические сопротивления слоев и построить двумерные геоэлектрические модели –разрезы изучаемого участка на глубину до 80 м.

### Результаты измерений

Рассмотрим профиль 1 длиной 715 м, пройденный по таежному участку за забором площадки ПЯВ «Кристалл» в 300 м к северу от устья боевой скважины (рис. 1).

Первый электрод находился на склоне высотой около 330 абс. м. Заканчивался профиль на берегу руч. Улахан-Бысыттах на высоте 300 абс. м. В результате инверсии полученных данных был построен двумерный геоэлектрический разрез с учётом рельефа (рис. 2).

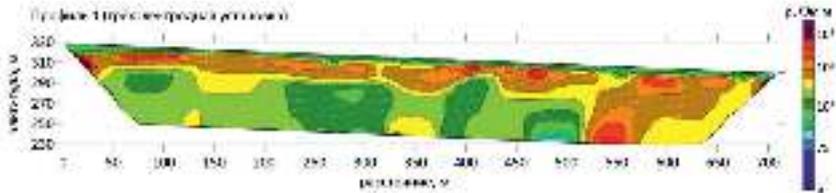


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю 1 полученный в результате измерений методом электротомографии трёхэлектродной установкой

Используемые при построении точечные данные удельного электрического сопротивления (УЭС) приведены на рисунке белыми маркерами. 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, который на глубине 30–40 м сменяется на более проводящий слой с УЭС около  $10^3$  Ом·м, распространенный на всю глубину профиля на всем протяжении склонового участка профиля длиной до 500 м. В конце профиля на промежутке 500–715 м в долине руч. Улахан-Бысыттах наблюдается высокоомная зона ( $10^4$  Ом·м и больше), которую связываем с мерзлыми отложениями около и под руслом ручья. В целом, по УЭС профиля 1 на исследуемых глубинах явные последствия влияния взрыва не прослеживаются.

Рассмотрим данные УЭС на геоэлектрическом разрезе профиля 3 длиной 595 м, проходящего от участка нетронутой тайги на высоте 330 м через центр насыпи, расположенной над устьем боевой скважины, и заканчивающегося у русла руч. Улахан-Бысыттах, с двойным пересечением металлического забора (рис. 3).

Как и на профиле 1, в верхней части разреза четко выделяется выдержанный СТС мощностью 2–3 м, где УЭС изменяются от десятков до сотен Ом·м. Такими же УЭС выделяется обломочный материал насыпи. Влияние металлического забора отражается через аномальные понижения УЭС до 5–10 Ом·м, при этом ширина этих аномалий в 30–40 м кажется преувеличенной и не соответствует действительной (см. отметки 120 м и 440 м по профилю, рис. 3). За забором около руч. Улахан-Бысыттах (промежуток 450–550 м по профилю, см. рис. 3) присутствует проводящая зона, которая связана с обводнённой талой зоной с низкими УЭС 50–500 Ом·м, природу которой предстоит установить.

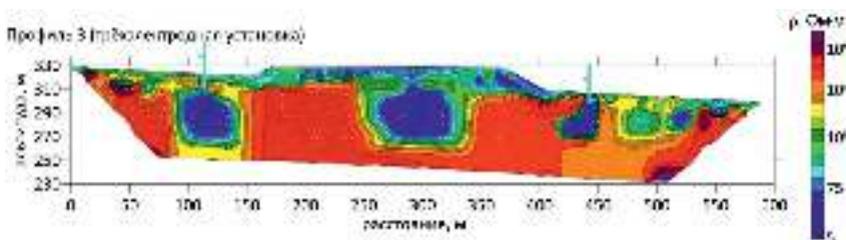


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю 3 полученный в результате измерений методом электротомографии трёхэлектродной установкой

Основной интерес представляет центральная проводящая аномалия (на промежутке 250–350 м профиля, рис. 3), которая, предположительно, обусловлена ослабленной флюидопроницаемой зоной вокруг ствола боевой скважины, возникшей в результате взрыва, так и влиянием железных фрагментов обсадной колонны боевой скважины. Наземная магнитная съёмка также здесь показала крупную сложную составную аномалию [Арт моно-в и др., 2020]. Наблюдается сходство размеров и интенсивности аномалий, сформированных под действием металлического забора, и центральной аномалии УЭС, что, по-видимому, указывает на несколько искаженные результаты инверсии измеренных данных. Поэтому для уточнения разреза и в качестве контроля, по профилю 3 были произведены измерения установкой диполь-диполь, которая более чувствительна к вертикальным границам, но её глубинность меньше в два раза по сравнению с трёхэлектродной установкой (до 40 м). Начало профилей совпадало, а контрольный профиль диполь-диполь был короче – 475 м. В результате был построен геоэлектрический разрез (рис. 4), который по большей части совпал с результатами основного измерения трехэлектродной установкой (рис. 3): СТС, талые отложения насыпи, центральная аномалия низких УЭС и аномалии пониженных УЭС, сформированные под влиянием металлического забора.

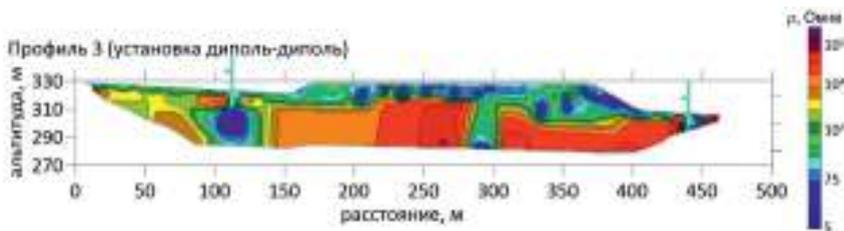


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю 1 полученный в результате измерений методом электротомографии установкой диполь-диполь

Центральная аномалия в варианте диполь-диполь ужалась по горизонтали и стала шириной всего 30 м вместо 100 м благодаря более высокой чувствительности диполь-дипольной установки к вертикальным границам. Вместе с тем ширина аномалий около заборов не изменилась, что дает пищу для дальнейших раздумий. Возможно, в этом проявляется снижение глубинности при замерах в установке диполь-диполь. Тем не менее, присутствие проводящей аномалии под центральной частью саркофага остаётся неоспоримым фактом. Для определения размеров и характера этой аномалии в дальнейшем необходимо использовать инверсию с фиксацией некоторых параметров модели, а для верификации полученной модели – провести многократное прямое моделирование для среды с аномально проводящими объектами.

### Выводы

В результате проведённых исследований методом ЭТ, показано, что влияние взрыва на глубинах до 80 м имеет локальный характер: на расстоянии 300 м от устья боевой скважины ПЯВ «Кристалл» в верхней части геологического разреза глубиной до 80 м явные изменения геологической среды техногенного характера, произошедшие под влиянием взрыва, не наблюдаются.

Выявлена проводящая аномалия УЭС у боевой скважины ПЯВ «Кристалл», пространственно совпадающая с ранее выявленной крупной изометричной магнитной аномалией [Арт моно в и др., 2020]. Металлические объекты: забор и погребенные фрагменты обсадной колонны боевой скважины затрудняют интерпретацию данных ЭТ. Для определения размеров и характера этой аномалии в дальнейшем необходимо использовать инверсию с фиксацией некоторых параметров модели, а для верификации полученной модели – провести многократное прямое моделирование для среды с аномально проводящими объектами.

### Бл год рности

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.».

### Литер тур

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.

Артамонова С. Ю., Шеин 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, 331(12), – 2020 – С. 158-172.

Балков, Е. В., Панин, Г. Л., Манштейн, Ю. А., Манштейн, А. К., Белобородов, В. А. Электромография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. № 6 – 2012 — С. 54-63.

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.

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.

Собакин П.И. Миграция  $^{137}\text{Cs}$  в мерзлотных почвах Якутии // Радиационная биология. Ради-оэкология. 2010. Т.50. № 5. С. 590-598.

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. Vol.54, № 5 – 2013 – Pp. 555-565.

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. . – Vol.53, № 2 – 2012– Pp. 185-193.

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.