

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ**

УДК 550.837; 551.341

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(45-54)

**ИЗУЧЕНИЕ ТАЛИКА ПОД МАЛЫМ ВОДОТОКОМ  
МЕТОДОМ БЕСКОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ****Д.В. Копылов<sup>1,2</sup>, М.Р. Садуртдинов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ООО «Тюменский нефтяной научный центр», 625000, Тюмень, а/я 747, Россия; [kopylovdmitr@yandex.ru](mailto:kopylovdmitr@yandex.ru)<sup>2</sup>Институт криосферы Земли, Тюменский научный центр СО РАН,  
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; [mr\\_sadurtdinov@mail.ru](mailto:mr_sadurtdinov@mail.ru)

Приведены результаты применения метода бесконтактной электроразведки в комплексе инженерно-геокриологических исследований на территории объекта нефтегазовой промышленности. Установлено наличие несквозного талика под малым водотоком, который образовался в результате фильтрации подземных вод. Составлена схема строения талика на глубину до 12 м под руслом ручья. Выявлено, что в результате антропогенного изменения рельефа местности подрусловой талик в настоящее время существенно превышает ширину русла ручья. Показана эффективность применения метода бесконтактной электроразведки в условиях Заполярья.

*Бесконтактное измерение электрического поля, нефтегазовая инфраструктура, талик, электроразведка, индекс глубины исследований*

**THE STUDY OF TALIK UNDER A SMALL WATERCOURSE  
BY THE CAPACITIVE RESISTIVITY METHOD****D.V. Kopylov<sup>1,2</sup>, M.R. Sadurtdinov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Tyumen Petroleum Research Center, P/O box 747, Tyumen, 625000, Russia; [kopylovdmitr@yandex.ru](mailto:kopylovdmitr@yandex.ru)<sup>2</sup>Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS,  
86, Malygina str., Tyumen, 625026, Russia; [mr\\_sadurtdinov@mail.ru](mailto:mr_sadurtdinov@mail.ru)

The results of application the method of capacitive resistivity prospecting in the complex of engineering-geocryological studies on the territory of the oil and gas industry area are presented. The presence of a closed talik under a small watercourse, formed as a result of groundwater filtration, has been established. A diagram of the talik structure has been compiled up to the depth of 12 m under the stream bed. It has been revealed that, as a result of anthropogenic changes in the terrain, the talik depth now significantly exceeds the stream channel width. The effectiveness of the application of the method of contactless electrical prospecting in the conditions of the Polar region has been demonstrated.

*Capacitive resistivity survey method, oil and gas infrastructure, talik, electrical prospecting, index depth of investigation*

**ВВЕДЕНИЕ**

Электроразведка методом сопротивления в геофизике криолитозоны занимает лидирующее место среди других методов геофизической разведки. Метод наиболее разработан и широко применяется для решения различных инженерно-геокриологических задач. Накоплен большой практический и научный опыт применения электроразведки для исследования многолетнемерзлых пород [Фролов, 1998; Зыков, 2007; Якунов, 2008; Sjoberg et al., 2014]. От первых электромагнитных исследований мерзлых пород в Забайкалье в 1934 г. до настоящего времени сформировалось большое количество методик полевых работ, а также способов обработки и интерпретации полученных данных [Хмельевской, 1984; Огильви, 1990].

Активное освоение нефтегазовых месторождений Арктики обуславливает увеличивающийся объем инженерно-геокриологических исследований на объектах нефтегазовой инфраструктуры. По данным И.Г. Яценко [2017], 38 % от общего числа месторождений России размещены в областях с островным, прерывистым или сплошным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), однако по объемам запасов нефти территория криолитозоны существенно богаче. Это обстоятельство определяет необходимость проектирования и строительства большого количества трубопроводов, кустовых площадок и других сооружений нефтегазовой инфраструктуры с обеспечением их высокой надежности в процессе экс-

плуатации. В связи с этим сформирован ряд инженерно-геокриологических задач нефтегазового комплекса, для решения которых перспективно применять электроразведку и как самостоятельный метод, и в комплексе с другими методами геофизики и инженерно-геокриологическими исследованиями.

На территории Русского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) с целью детального изучения геокриологического строения разреза, обнаружения и картирования талых грунтов в зоне взаимодействия с нефтегазовой инфраструктурой были выполнены электроразведочные исследования, некоторые результаты которых изложены в статье.

### ОПЫТ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В современной научной литературе имеются немногочисленные публикации по применению электроразведки и геофизических исследований в целом при инженерно-геокриологических работах на объектах нефтегазовой инфраструктуры. Кроме того, современные российские нормативные документы не обязывают, а рекомендуют выполнять геофизические исследования при инженерно-геологических изысканиях [СП 11-105-97, 2004], за исключением определения коррозионной агрессивности грунтов к углеродистой и низколегированной стали и определения “блуждающих” токов для металлических сооружений [ГОСТ 9.602-2016, 2016].

Необходимо отметить работу [Смилевец, 2003], в которой обобщается многолетний опыт ее автора по выполнению геофизических исследований на нефтегазовых объектах Западной Сибири. В ней акцентируется внимание на неоднородном блоковом строении верхней части разреза криолитозоны с наличием переходных зон, рекомендуется изучение ММП геофизическими методами круглогодично для выявления изменений физико-механических свойств грунтов оснований зданий и сооружений, а также описываются новые способы изучения ММП, в том числе с помощью аппаратуры для бесконтактных измерений электромагнитного поля. Однако недостатком этой работы является то, что интерпретация результатов геофизических исследований выполнялась в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели.

В настоящее время при инженерно-геокриологических исследованиях активно применяют электротомографию [Бобачев, Горбунов, 2005; Оленченко и др., 2019; Yanhui et al., 2013; Sjoberg et al., 2014; Christophe et al., 2018]. Под электротомографией понимается современная модификация метода сопротивлений с определенной методикой полевых наблюдений, приемами обработки и ин-

терпретации в рамках двумерной и трехмерной моделей [Бобачев и др., 2006; Loke, 2009]. С помощью электротомографии с высокой детальностью решается широкий круг инженерно-геокриологических задач на объектах нефтегазовой инфраструктуры:

- выявление области растепления ММП вблизи добывающих и нагнетательных скважин на кустовых площадках [Сергеев и др., 2015];

- оконтуривание подземных льдов и высокольдистых грунтов, изучение криогенных процессов и их динамики по трассам линейных сооружений и площадочным объектам [Оленченко, 2015; Копылов, Садуртдинов, 2019];

- оценка льдистости и пористости грунтов на территории месторождения [Котелевец, Скобелев, 2016];

- дифференциация мерзлых и охлажденных пород разной степени засоления, выявление структурных особенностей строения изучаемого разреза на территории месторождения [Квон и др., 2019];

- проведение электротомографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы, где рассматривается кустовая площадка месторождения, на которой в качестве помех выступают металлические трубы (сваи сооружений, обсадные трубы скважин) [Сергеев и др., 2015; Мариненко и др., 2019].

К существенным ограничениям электротомографии на сегодняшний день можно отнести необходимость использования гальванического заземления электродов, что сложно выполнить в зимний сезон на неосвоенной территории криолитозоны и невозможно осуществить на застроенной территории (мерзлая песчаная отсыпка кустовых площадок, автодорог и т. д.). Выполнение полевых работ возможно либо в короткий летний сезон, либо в зимний сезон, но с дополнительным оборудованием для организации гальванического заземления электродов (перфоратор, генератор и др.) [Пригара, Татаркин, 2012], что существенно увеличивает стоимость работ и трудозатраты. Для условий, когда невозможно произвести гальваническое заземление электродов, был разработан метод бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) [Сапожников, 1982, 1985]. В работе [Груздев, 2017] определены области применения бесконтактной технологии методом сопротивлений, влияния снежного покрова на бесконтактные измерения, представлены результаты сравнения метода сопротивлений с гальваническим заземлением и бесконтактным методом при измерениях современной аппаратурой как отечественного производства, так и импортного.

К сожалению, в немногих публикациях рассматривается бесконтактное измерение электрического поля на территории распространения

ММП для решения инженерно-геокриологических задач [Груздев и др., 2013; Hauck, Kneisel, 2006], хотя в настоящее время при постоянно растущих темпах строительства нефтегазовой инфраструктуры на территории криолитозоны требуется изучение геокриологической обстановки круглогодично.

### ОБЪЕКТ И ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Территория исследований относится к Ямало-Ненецкому автономному округу и расположена в северо-восточной части Западно-Сибирской равнины на Пур-Тазовской возвышенности (рис. 1).

В геокриологическом отношении участок расположен в северной геокриологической зоне, в подзоне сплошного распространения ММП. Мощность многолетнемерзлых пород в районе работ более 300 м, мощность сезонного талого слоя (СТС) около 1 м. Тундровая равнина представляет собой низменность с возвышающимися над ней на 50–100 м холмами и грядами. Для этой местности характерны заболоченные участки с волнистой поверхностью и краевые ледниковые образо-

вания – следы зырянского оледенения [Андреева, 1978]. В геологическом строении принимают участие верхнеплейстоценовые озерно-ледниковые отложения ермаковского горизонта, представленные песками, супесями, суглинками, глинами, перекрытые современными болотными отложениями, представленными торфами. Гидрографическая сеть района характеризуется наличием рек, озер и болотных комплексов, которые относятся к бассейну Карского моря (левобережная часть бассейна р. Таз). Наиболее крупным водотоком, пересекающим месторождение в меридиональном направлении, является р. Пяндымыха – левый приток третьего порядка р. Таз с множеством впадающих в него небольших безымянных рек и ручьев. Изучаемый район бассейна р. Пяндымыха представляет собой обширную, заболоченную (на 70 %) равнину. Реки тундровой зоны имеют небольшие размеры. Вследствие равнинного рельефа и близкого залегания к земной поверхности кровли многолетнемерзлых толщ реки имеют мелкие долины, неглубокие и очень извилистые русла и низкие берега. Преобладают малые и средние по размерам озера с площадью акватории до 1 км<sup>2</sup>, расположенные среди недренированных плоско-

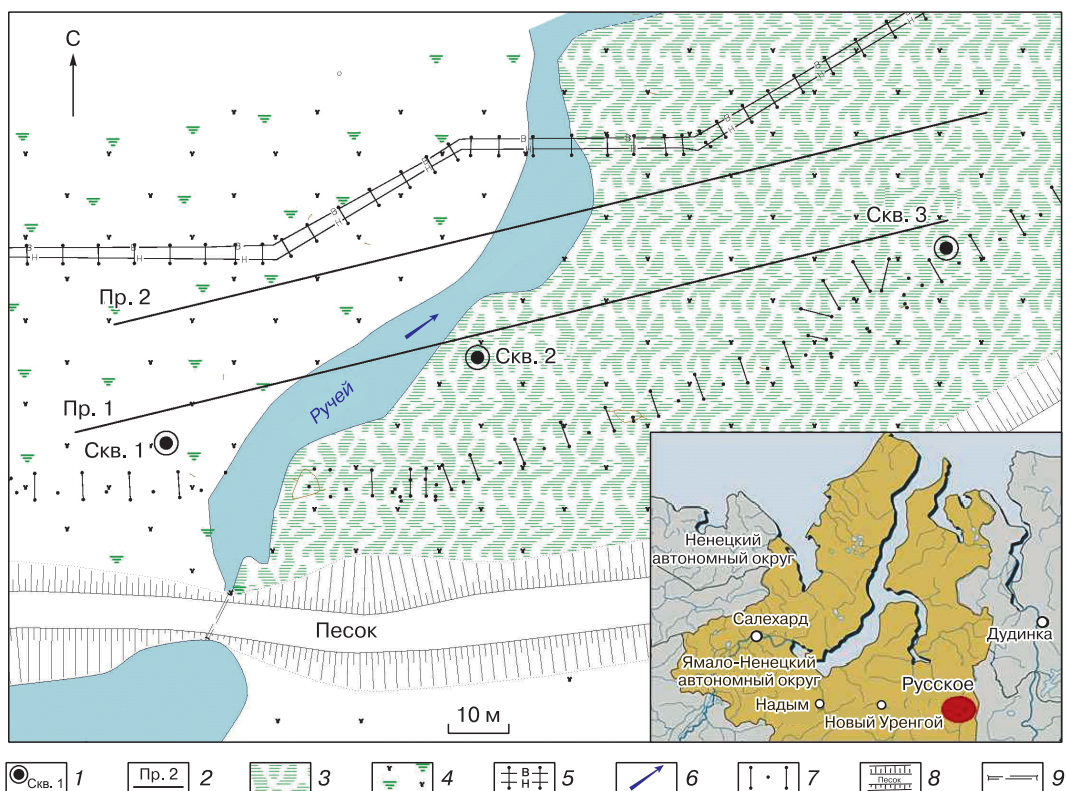


Рис. 1. Местоположение месторождения и схема участка работ.

1 – инженерно-геологическая скважина, ее номер; 2 – электроразведочный профиль, его номер; 3 – заболоченные земли; 4 – растительность; 5 – эстакада трубопроводов (в – водовод, н – нефтепровод); 6 – направление течения водотока; 7 – опоры эстакады; 8 – автомобильная дорога; 9 – водопропускная труба.

бугристых торфяников. По причине мелководности основная масса озер зимой промерзает.

Исследования проводились в верхней части разреза в пределах малого водотока (ручья) на территории месторождения Русское (см. рис. 1). Ручей вытекает из озера, имеет протяженность 7.8 км и глубину до 1 м. Площадь водосбора ручья 26.7 км<sup>2</sup>, заболоченность бассейна 65 %, заозеренность 25 %. Долина неясно выражена, пойма узкая, местами не прослеживается совсем. Русло слабоврезанное, зимой ручей полностью перемерзает. В связи с тем что водотоки находятся в районе нефтяного месторождения, они испытывают значительную антропогенную нагрузку [Бешенцев, Павлова, 2012]. Исследования выполнены на участке, где водоток пересекают две параллельные автомобильные дороги с установленными водопропускными трубами. Также на участке проходят две эстакады внутрипромысловых трубопроводов на металлических сваях, заглубленных в грунт на 12 м. Сооружения оказывают большую техногенную нагрузку на многолетнемерзлые грунты в непосредственной близости от водотока. Кроме того, в летнее время наблюдается существенное затопление прилегающей к автодорогам территории в районе водопропускных труб.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На территории месторождения в пределах ручья выполнен комплекс инженерно-геокриологических исследований, в состав которых входили рекогносцировочное обследование, буровые работы и геофизические исследования. Были пробурены три скважины глубиной 17 м, в которых выполнены термометрические наблюдения. Буровые работы выполнялись в октябре, когда СТС имел максимальную мощность или только начал промерзать. Для картирования и оконтуривания области распространения талых грунтов был применен метод БИЭП. Выбор методики бесконтактных измерений связан с выполнением исследований в зимний период (деятельный слой начал промерзать), когда применение гальванического заземления затруднительно. В качестве регистрирующей применялась электроразведочная аппаратура БИКС, разработанная в ОАО «СКБ СП» [Электроразведочная аппаратура..., 2012]. Измерения



Рис. 2. Схема используемой установки.

АВ – длина питающей линии, MN – длина приемной линии, OO\* – расстояние между центрами диполей.

проводились с помощью дипольно-осевой установки МNAB, переносимой по прямолинейному профилю. Расстояние между М и N, А и В (параметр  $a$ ) принималось равным 2.5, 5 и 10 м, коэффициент разделения диполей (параметр  $n$ ) изменялся от 3 до 13, максимальный разнос OO\* равен 130 м (рис. 2). Исследования выполнялись с рабочей частотой 16.6 кГц.

Работы производились по двум параллельным профилям длиной 160 м, расположенным вдоль эстакад трубопроводов (см. рис. 1). Расстояние между профилями составляло 16 м, шаг измерений по профилю – 5 м. Выбор метода электроразведки обусловлен большим различием в величине удельного электрического сопротивления (УЭС) у талых и мерзлых пород. Понижение температуры и увеличение содержания льда в грунтах приводит к соответствующему росту УЭС мерзлого грунта [Фролов, 1998; Якунов, 2008]. В результате полевых измерений получен массив данных со значениями кажущегося электрического сопротивления, разносов, номеров пикетов и профилей. Кажущееся сопротивление ( $\rho_k$ ) вычислялось по формуле

$$\rho_k = \frac{KU_{\text{вх}}}{I},$$

где  $K$  – коэффициент измерительной установки, м;  $U_{\text{вх}}$  – амплитудное значение напряжения, поступающего на вход приемника, В;  $I$  – амплитудное значение выходного тока излучателя, А.

Коэффициент измерительной установки вычислялся по формуле

$$K = 2\pi L \left\{ \ln \left[ \left( \frac{b^2}{b^2 - 1} \right)^{2b} \left( \frac{b^2 + 2b}{(b+1)^2} \right)^{b+2} \left( \frac{b^2 - 2b}{(b-1)^2} \right)^{b-2} \right] \right\}^{-1},$$

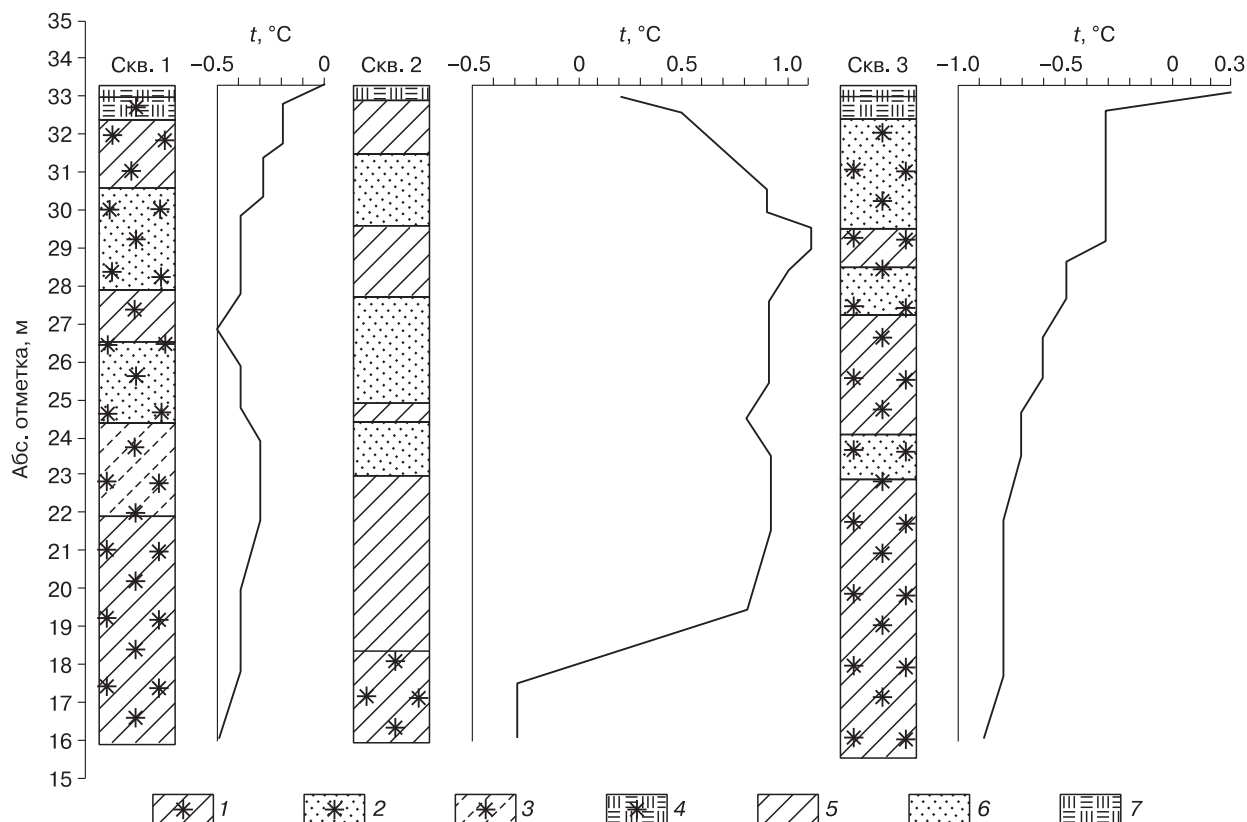
$$b = \frac{R}{L},$$

где  $L$  – длина диполя, м;  $R$  – расстояние между излучателем и приемником, м.

Обработка, качественная и количественная интерпретация полученных данных выполнялись в программе ZondRes2d [Каминский, 2012], в результате чего получены геоэлектрические разрезы и схема распределения УЭС на глубине заложения нижнего конца свай эстакады (12 м).

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

В ходе рекогносцировочного обследования территории выявлено техногенное затопление участка поверхностными водами в районе расположения водопропускной трубы насыпной автодороги. При строительстве промышленных объектов (эстакад трубопроводов, насыпей дорог и кустовых площадок) природный рельеф видоизменяется. Появляются положительные формы



**Рис. 3. Геологические колонки скважин 1–3 и распределение по глубине температуры грунтов.**

1 – суглинок мерзлый льдистый; 2 – песок твердомерзлый слабольдистый; 3 – супесь твердомерзлая слабольдистая; 4 – торф мерзлый сильнольдистый; 5 – суглинок талый; 6 – песок талый водонасыщенный; 7 – торф талый.  $t$  – температура грунта, °C (11.10.2019 г.).

рельефа антропогенного характера, которые меняют поверхностный и подземный сток в летний сезон и увеличивают снегонакопление в зимний. В связи с этим происходит затопление больших территорий, которое может привести к активизации опасных инженерно-геокриологических процессов. Зимой из-за большой мощности снега уменьшается глубина промерзания ММП, а летом в результате затопления увеличивается глубина их оттаивания вследствие отепляющего влияния поверхностных вод.

По данным инженерно-геологических скважин 1 и 3 (рис. 3) установлено, что разрез представлен чередованием твердомерзлых слабольдистых песков и твердомерзлых льдистых суглинков с температурой от  $-0.2$  до  $-0.9$  °C. По скв. 2 разрез представлен чередованием водонасыщенных песков и мягкопластичных суглинков с температурой от  $+0.1$  до  $+1.1$  °C.

В результате качественной интерпретации получен псевдоразрез наблюдаемых кажущихся сопротивлений по профилю Пр. 1 (рис. 4). По нему выполнен анализ пространственного изменения

кажущихся электрических сопротивлений, что позволило определить закономерности распределения кажущегося сопротивления, выделить области аномально повышенных и пониженных значений.

Значения кажущегося сопротивления на участке исследований лежат в пределах 48–2480 Ом·м. Нижнее значение характерно для талых водонасыщенных грунтов, верхнее – для мерзлых суглинисто-песчаных грунтов. По характеру распределения кажущегося сопротивления выделяется область относительно низких значений, характерных для талых дисперсных грунтов. Согласно классификации таликов области многолетнемерзлых горных пород [Романовский, 1972], область талых грунтов является несвязным таликом (тип – гидрогенный (подводно-тепловой), подтип – подрусловой, класс – грунтово-фильтрационный, подкласс – термальный). Гидрогенные (подводно-тепловые) подрусловые талики образуются под действием отепляющего влияния водотока на подрусловые грунты. Кроме того, происходит техногенное отепляющее воздействие на

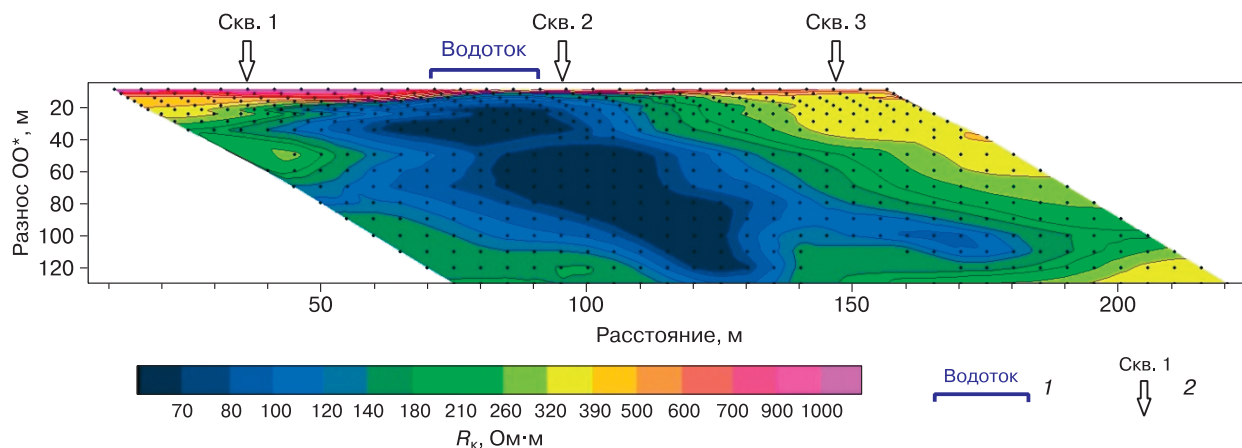


Рис. 4. Псевдоразрез наблюдаемых кажущихся сопротивлений ( $R_k$ ) по профилю Пр. 1.

1 – границы водотока; 2 – проекции скважин.

прилегающую к водотоку территорию в связи с затоплением ее в результате возведения насыпей автомобильных дорог, которые затрудняют естественный сток.

На рис. 5 представлен геоэлектрический разрез по профилю Пр. 1, построенный в результате 2D-инверсии. Верхняя часть разреза неоднородна по распределению УЭС. По левому берегу водотока в интервале профиля 0–70 м выделяется аномальная область с высоким УЭС до 3000 Ом·м, мощностью 2 м, приуроченная к торфу мерзлому, сильнольдистому. Грунты правого берега водотока в интервале профиля 90–160 м имеют относительно низкие УЭС (до 700 Ом·м) и также характеризуются наличием мерзлого торфа в верхней части разреза. Неоднородность грунтов правого и левого берегов по УЭС объясняется разной температурой промерзания верхней части разреза. В связи с тем что буровые работы и отбор керна

выполнялись в октябре, когда СТС находился в талом состоянии, а геофизические исследования – в декабре при промерзшем СТС, в районе скважин 1 и 2 наблюдаются повышенные значения УЭС верхней части геоэлектрического разреза, которые характерны для мерзлых грунтов.

В интервале профиля 40–140 м до абсолютной отметки 16 м выделяется аномально низкоомная область с УЭС от 30 до 100 Ом·м, которая характеризуется наличием талых суглинисто-песчаных грунтов. По данным скважин 1 и 2, талик приурочен к пескам, в которых происходит фильтрация подземных вод, что приводит к отеплению этой части разреза.

Пороговое значение УЭС 100 Ом·м, разделяющее талые и мерзлые грунты на геоэлектрическом разрезе, принято с учетом литературных данных [Фролов, 1998; Зыков, 2007] и результатов анализа архивных материалов геофизических ис-

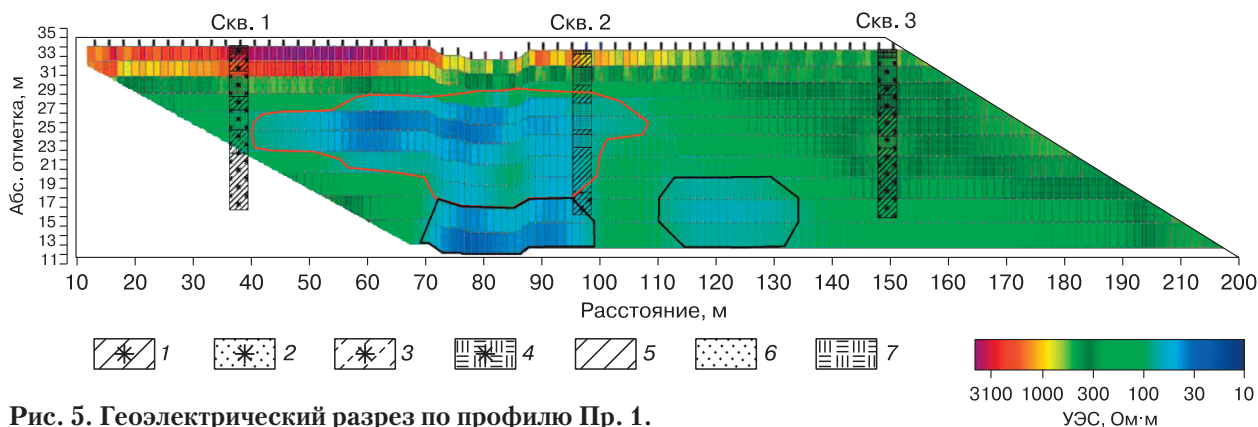


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по профилю Пр. 1.

1 – суглинок мерзлый; 2 – песок мерзлый; 3 – супесь мерзлая; 4 – торф мерзлый; 5 – суглинок талый; 6 – песок талый; 7 – торф талый; красная линия – контур области с УЭС  $\leq 100$  Ом·м, черная линия – область предполагаемого влияния металлических свай коммуникаций.

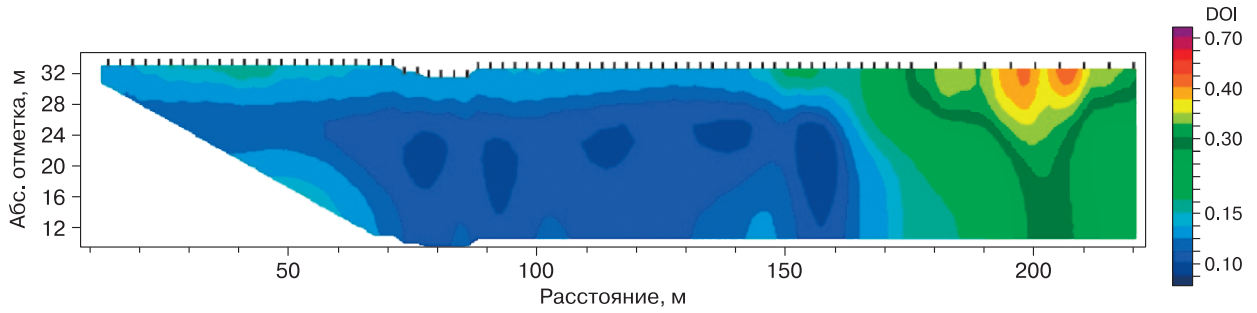


Рис. 6. Разрез, отражающий распределение индекса DOI.

следований, выполненных на близлежащих участках со сходным составом грунтов.

В интервалах профиля 70–100 и 110–135 м, в нижней части разреза, с глубины 15 м выделяется низкоомная область, что предположительно связано с влиянием металлических свай коммуникаций на измеряемые значения разности потенциалов на больших разносах.

Для оценки качества и надежности результатов инверсии использовался индекс глубины исследований DOI (depth of investigation), предложенный в работе [Oldenburg, Li, 1999]. В его основе лежит сопоставление двух инвертированных моделей УЭС одного и того же набора данных с использованием различных значений электрического сопротивления опорной (эталонной) модели.

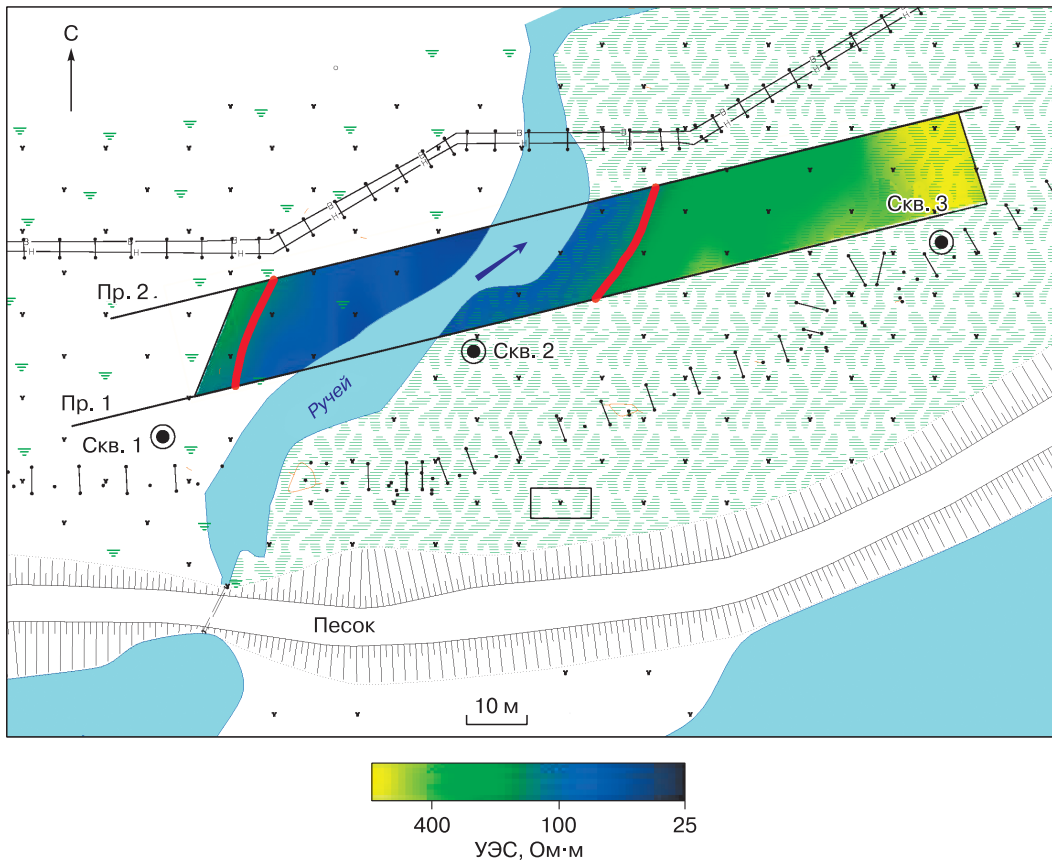


Рис. 7. Распределение удельного электрического сопротивления грунта в плане на глубине нижнего конца сваи (12 м).

Красная линия – область талика по данным электроразведки. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

Первое эталонное значение ( $q_A$ ) обычно рассчитывается из среднего логарифма наблюдаемого кажущегося значения удельного сопротивления. Второе эталонное значение удельного сопротивления ( $q_B$ ) устанавливается в 10 раз больше  $q_A$ . Значение индекса DOI ( $R_{AB}$ ) для ячейки модели определяется по формуле

$$R_{AB}(x, z) = \frac{q_A(x, z) - q_B(x, z)}{q_A - q_B}$$

Значение  $R$  будет приближаться к нулю в частях модели, где два процесса инверсии воспроизводят одинаковые значения УЭС. В таких областях ячейки содержат объективную информацию об удельном сопротивлении. В областях, где данные не содержат информации об удельном сопротивлении ячейки,  $R$  будет приближаться к единице, так как удельное сопротивление ячейки будет похоже на эталонное удельное сопротивление.

На рис. 6 представлен разрез, отражающий распределение индекса DOI вдоль профиля Пр. 1.

В правой части разреза со 160 м и далее отчетливо выделяется область относительно повышенных значений индекса. В связи с особенностями методики проведения полевых работ в данной области измерения не производились, но в процессе выполнения инверсии значения УЭС автоматически рассчитывались программой обработки. Поэтому данная область выделяется повышенными значениями индекса DOI и интерпретируется как ложная аномалия. В интервале профиля 50–140 м выделяется область с индексом DOI от 0.08 до 0.13, что является признаком объективно подобранной модели УЭС. Она интерпретируется как подрусловый талик.

По двум практически идентичным геоэлектрическим разрезам профилей Пр. 1 и Пр. 2 построена схема распределения удельного электрического сопротивления грунтов (рис. 7) на глубине заложения нижнего конца свайного фундамента 12 м.

Распространение талых грунтов на глубине 12 м наблюдается не только в подрусловой части, но и выходит за ее пределы. Выделенная на схеме область с низкими значениями УЭС (менее 100 Ом·м) интерпретируется как талые грунты, обладающие низкой несущей способностью по сравнению с мерзлыми грунтами с высоким УЭС. Ширина талой зоны грунтов на глубине 12 м составляет около 70 м в плане. Ввиду того что при проектировании и строительстве сооружений нефтегазовой инфраструктуры на территории месторождения используют первый принцип – сохранение мерзлого состояния грунтов в основании сооружения в течение всего срока его эксплуатации, наличие талых грунтов необходимо учитывать при организации инженерной защиты существующих сооружений.

## ВЫВОДЫ

В результате комплексных инженерно-гео-криологических исследований установлено наличие несквозного подруслового талика, который образовался за счет фильтрации подземных вод в песках. Водоток полностью перемерзает в зимнее время года. Выявлено техногенное затопление территории поверхностными водами, что может активизировать опасные инженерно-геокриологические процессы. Составлена схема распределения УЭС на глубине 12 м, по которой прослеживается область талых слабонесущих грунтов, существенно выходящая за пределы русловой части водотока.

Оценка индекса DOI показала, что применяемая бесконтактная установка и схема УЭС разреза дают возможность получать объективную информацию до глубины 20 м.

Необходимо отметить, что на больших расстояниях установок существенное влияние на измеряемый параметр оказывают металлические сооружения, находящиеся в непосредственной близости от исследуемого профиля. Что, в свою очередь, приводит к искажению УЭС и появлению ложных аномалий на геоэлектрическом разрезе.

Выполненные геофизические исследования показали хорошую согласованность полученных результатов с данными инженерно-геологических скважин. Показана эффективность применения бесконтактного метода электроразведки в условиях Заполярья и необходимость использования электроразведки не только на стадии инженерных изысканий, но и в процессе эксплуатации сооружений с целью экспресс-мониторинга активизации опасных инженерно-геокриологических процессов.

*Авторы выражают благодарность канд. геол.-мин. наук Оленченко В.В. (ИНГГ СО РАН) за ценные рекомендации и замечания при написании статьи.*

## Литература

- Андреева С.М. Зырянское оледенение на севере средней Сибири // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1978, № 5, с. 72–79.
- Бешенцев В.А., Павлова Е.И. Состояние окружающей среды, обусловленное техногенным воздействием в результате освоения и эксплуатации Русского нефтегазового месторождения // Вестн. Тюм. гос. ун-та, 2012, № 7, с. 161–166.
- Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр, 2005, № 12, с. 52–54.
- Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, № 02, с. 14–17.
- ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М., Стандартинформ, 2016, 94 с.



- Груздев А.И.** Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2017, 22 с.
- Груздев А.И., Науменко Д.А., Богданов П.С. и др.** Бесконтактное измерение электрического поля с помощью OhmMapper в условиях Крайнего Севера // Электрон. науч. издание "Георазрез", 2013, № 1 (13), с. 1–23.
- Зыков Ю.Д.** Геофизические методы исследования криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.
- Каминский А.Е.** Инструкция к программе двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации ZondRes2D. СПб., Zond geophysical software, 2012, 70 с.
- Квон Д.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. и др.** Применение электротомографии для идентификации в разрезе мерзлых и охлажденных пород разной степени засоленности // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 3, с. 3–12.
- Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р.** Применение электро-разведки при инженерно-геокриологических исследованиях на объектах нефтегазовой инфраструктуры // Экспозиция нефть–газ, 2019, № 6 (73), с. 12–15.
- Котелев Д.В., Скобелев А.Д.** Льдистость и пористость мерзлых грунтов Харасавэйского ГКМ по данным электро-разведки // Арктика и Антарктика, 2016, № 2, с. 116–125.
- Мариненко А.В., Эпов М.И., Оленченко В.В.** Решение прямых задач электротомографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы на примере кустовой площадки месторождения // Сиб. журн. индустр. математики, 2019, № 1 (77), с. 63–73.
- Огильви А.А.** Основы инженерной геофизики: учебник. М., Недра, 1990, 504 с.
- Оленченко В.В.** Применение электротомографии при прогнозе развития опасных экзогенных процессов на объектах инфраструктуры Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения // Тр. Междунар. конф. "Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы" (Тюмень, 2–5 июня 2015 г.). Тюмень, Эпоха, 2015, с. 276–279.
- Оленченко В.В., Цибизов Л.В., Каргозия А.А., Есин Е.И.** Электротомография чаши дренированного термокарстового озера на о. Курунгнах в дельте р. Лены // Проблемы Арктики и Антарктики, 2019, т. 65, № 1, с. 92–104.
- Пригара А.М., Татаркин А.В.** Инженерно-геофизические исследования в неблагоприятных климатических условиях // Инж. изыскания, 2012, № 11, с. 20–24.
- Романовский Н.Н.** Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения // Вестн. Моск. ун-та, 1972, № 1, с. 23–34.
- Сапожников Б.Г.** Рекомендации по методике полевых наблюдений и методике расчета кажущегося удельного электрического сопротивления при электропрофилировании с установками срединного градиента и незаземленными рабочими линиями. Л., Недра, 1982, 65 с.
- Сапожников Б.Г.** Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. Л., Недра, 1985, 96 с.
- Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В. и др.** Изучение многолетнемерзлых пород с использованием комплекса методов инженерной геофизики (на примере кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения в Западной Сибири) // Инж. изыскания, 2015, № 10–11, с. 46–53.
- СП 11-105-97.** Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. М., Госстрой РФ, 2004, 58 с.
- Смилевец О.Д.** Методика и технология геофизических исследований верхней части геологического разреза при проектировании технических сооружений в нефтегазоносных районах криолитозоны: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Саратов, 2003, 43 с.
- Фролов А.Д.** Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.
- Хмелевской В.К.** Электроразведка. М., Изд-во Моск. ун-та, 1984, 422 с.
- Электроразведочная аппаратура "БИКС".** Руководство по эксплуатации. Саратов, СКБ сейсмич. приборостроения, 2012, 56 с.
- Якупов В.С.** Геофизика криолитозоны. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 2008, 342 с.
- Ященко И.Г.** Нефтяные ресурсы криолитозоны России (обзор) // Изв. Коми науч. центра УрО РАН, 2017, № 3 (31), с. 59–70.
- Christophe R., Lemieux G., Molson J.** Geophysical investigation and numerical modelling of heat transfer in a talik beneath the Kuuguluk River at Salluit, northern Québec, Canada // 5th Europ. Conf. on Permafrost (Chamonix-Mont Blanc, 23 June–1 July 2018). Chamonix-Mont Blanc, France, 2018, p. 426–427.
- Hauck C., Kneisel C.** Application of capacitively coupled and DC electrical resistivity imaging for mountain permafrost studies // Permafrost and Periglacial Processes, 2006, vol. 17 (2), p. 169–177.
- Loke M.H.** Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual. 2009 [Электрон. ресурс]. – URL: <http://www.abem.se/files/res/2dnotes.pdf> (дата обращения: 12.05.2020).
- Oldenburg D.W., Li Y.G.** Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys // Geophysics, 1999, No. 64 (2), p. 403–416.
- Sjoberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W.** Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // The Cryosphere, 2014, No. 9, p. 465–478.
- Yanhui You, Qihao Yu, Xicai Pan et al.** Application of electrical resistivity tomography in investigating depth of permafrost base and permafrost structure in Tibetan Plateau // Cold Regions Sci. and Technol., 2013, vol. 87, p. 19–26.

## References

- Andreeva S.M. Zyryan glaciation in the North of Central Siberia. Izvestiya AN SSSR [Herald of the USSR Academy of Sciences], 1978, No. 5, p. 72–79 (in Russian).
- Beshentsev V.A., Pavlova E.I. State of the environment as a result of technogenic influence caused by the development and operation of Russkoe oil and gas field. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Tyumen State University Herald], 2012, No. 7, p. 148–152 (in Russian).
- Bobachev A.A., Gorbunov A.A. 2D geoelectrical prospecting by resistivity and induced polarization technique: tools, methodology, software. Razvedka i okhrana nedr [Exploration and Protection of Resources], 2005, No. 12, p. 52–54 (in Russian).
- Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. The method of electrical tomography resistivity and induced polarization. Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki [Devices and systems of Exploration Geophysics], 2006, No. 02, p. 14–17 (in Russian).
- GOST 9.602-2016. Unified system of corrosion and ageing protection. Underground constructions. General requirements for corrosion protection. Moscow, Standardinform, 2016, 94 p. (in Russian).

- Gruzdev A.I. Opredeleniye oblasti primeneniya beskontaktnoy tekhnologii metoda soprotivleniy [Determination of the scope of non-contact technology of the resistance method]. Abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences. Moscow, 2017, 22 p. (in Russian).
- Gruzdev A.A., Naumenko D.A., Bogdanov P.S. et al. Capacitive resistivity survey with Ohmmapper system in far north conditions. Georazrez [Geosection], 2013, No. 1 (13), p. 1–23.
- Zykov Yu.D. Geofizicheskiye metody issledovaniya kriolitozony [Geophysical Surveys in Permafrost]. Moscow, Moscow University Press, 2007, 272 p. (in Russian).
- Kaminskiy A.E. Instruksiya k programme dvumernoy interpretatsii dannykh metoda soprotivleniy i vyzvannoy polarizatsii ZondRes2D [Instructions for the program for two-dimensional interpretation of the data of the resistance method and the induced polarization ZondRes2D]. St. Petersburg, Zond geophysical software, 2012, 70 p. (in Russian).
- Kvon D.A., Modin I.N., Shevvin V.A., Makarov D.V., Skobelev A.D. Electrical resistivity tomography for identification of frozen and cold saline rocks. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 3, p. 3–10.
- Kopylov D.V., Sadurtdinov M.R. Using geoelectrical prospecting for engineering-geocryological studies on objects of oil and gas infrastructure. Ekspozitsiya Neft'–Gaz [Exposition Oil–Gas], 2019, No. 6 (73), p. 12–15 (in Russian).
- Kotelevets D.V., Skobelev A.D. The ice content and the porosity of frozen grounds of the Kharasavey gas field according to electrical sounding data. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic], 2016, No. 2, p. 116–125 (in Russian).
- Marinenko A.V., Epov M.I., Olenchenko V.V. Solving direct problems of electrical resistivity tomography for media with high-conductivity irregular-shaped heterogeneities by an example of a multiple well platform. Siberian J. Industrial Mathematics, 2019, No. 1 (77), p. 93–102.
- Ogilvi A.A. Osnovy inzhenernoy geofiziki [Fundamentals of Engineering Geophysics]. Moscow, Nedra, 1990, 504 p. (in Russian).
- Olenchenko V.V. The application of electrical resistivity tomography in the evaluation of the degree influence of hazardous exogenous processes on the infrastructure of the Bovankovo deposit. In: Proc. of the Intern. Conf. "Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the Cryosphere" (Tyumen, June 2–5, 2015). Tyumen, Epoch, 2015, p. 276–279 (in Russian).
- Olenchenko V.V., Tsimbizov L.V., Kartziya A.A., Esin E.I. Electrical resistivity tomography of drained thermokarst lake basin on Kurungnakh island in the Lena river delta. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]. 2019, vol. 65, No. 1, p. 92–104 (in Russian).
- Prigara A.M., Tatarkin A.V. Engineering geophysical investigations under unfavourable climatic conditions. Inzhenernyye izyskaniya [Engineering Survey], 2012, No. 11, p. 20–24 (in Russian).
- Romanovskiy N.N. Taliks in the field of permafrost and the scheme of their division. Vestnik Moskovskogo universiteta [Bulletin of Moscow University], 1972, No. 1, p. 23–34 (in Russian).
- Sapozhnikov B.G. Rekomendatsii po metodike polevykh nablyudeniy i metodike raschota kazhushchegosya udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya pri elektroprofilirovaniy s ustanovkami seredinnogo gradiyenta i nezazemlennymi rabochimi liniyami [Recommendations on the method of field observations and methods for calculating the apparent resistivity in electrical profiling with the facilities of the middle gradient and ungrounded working lines]. Leningrad, Nedra, 1982, 65 p. (in Russian).
- Sapozhnikov B.G. Elektroprofilirovaniye s nezazemlennymi rabochimi liniyami [Electroprofiling with Ungrounded Working Lines]. Leningrad, Nedra, 1985, 96 p. (in Russian).
- Sergeev K.S., Ryzhkov V.I., Belousov A.V. et al. Study of permafrost soils using a complex of methods of engineering geophysics (by the example of a well cluster of an oil and gas condensate field in Western Siberia). Inzhenernyye izyskaniya [Engineering Survey], 2015, No. 10–11, p. 46–53 (in Russian).
- SP 11-105-97. Engineering geological surveys for purposes of construction. Part IV. Rules and regulations on geophysical surveys. Moscow, Gosstroj RF, 2004, 58 p. (in Russian).
- Smilevets O.D. Metodika i tekhnologiya geofizicheskikh issledovaniy verkhney chasti geologicheskogo razreza pri proyektirovaniy tekhnicheskikh sooruzheniy v neftegazonosnykh rayonakh kriolitozony [Methodology and technology of geophysical studies of the upper part of the geological section when designing technical structures in the oil and gas bearing regions of the permafrost zone]. Dissertation abstract for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Saratov, 2003, 43 p. (in Russian).
- Frolov A.D. Elektricheskie i uprugie svoystva merzlykh porod i l'dov [Electrical and Elastic Properties of Frozen Rocks and Ice]. Pushchino, ONTI PNTs RAN, 1998, 515 p. (in Russian).
- Khmelevskoy V.K. Elektrorazvedka [Electrical Exploration]. Moscow, Moscow University Press, 1984, 422 p. (in Russian).
- Elektrorazvedochnaya apparatura "BIKS". Rukovodstvo po ekspluatatsii [Operation manual]. Saratov, LLC SKB of seismic instrument engineering, 2012, 56 p. (in Russian).
- Yakupov V.S. Geofizika kriolitozony [Geophysics of Permafrost Areas]. Yakutsk, Yakutsk University Press, 2008, 342 p. (in Russian).
- Yashenko I.G. Oil resources of cryolithozone of Russia (overview). Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN [Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences], 2017, No. 3 (31), p. 59–70 (in Russian).
- Christophe R., Lemieux G., Molson J. Geophysical investigation and numerical modelling of heat transfer in a talik beneath the Kuuguluk River at Salluit, northern Québec, Canada. In: 5th European Conference on Permafrost (Chamonix-Mont Blanc, 23 June–1 July 2018). Chamonix-Mont Blanc, France, 2018, p. 426–427.
- Hauck C., Kneisel C. Application of capacitively coupled and DC electrical resistivity imaging for mountain permafrost studies. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, vol. 17, No. 2, p. 169–177.
- Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual. 2009. – URL: <http://www.abem.se/files/res/2dnotes.pdf> (last visited: 12.05.2020).
- Oldenburg D.W., Li Y.G. Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. Geophysics, 1999, No. 64 (2), p. 403–416.
- Sjoberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost. The Cryosphere, 2014, No. 9, p. 465–478.
- Yanhui You, Qihao Yu, Xicai Pan et al. Application of electrical resistivity tomography in investigating depth of permafrost base and permafrost structure in Tibetan Plateau. Cold Regions Science and Technology, 2013, vol. 87, p. 19–26.

Поступила в редакцию 7 июня 2020 г.,  
после доработки – 5 августа 2020 г.,  
принята к публикации 29 августа 2020 г.