

# Применение электроразведки при инженерно-геокриологических исследованиях на объектах нефтегазовой инфраструктуры

DOI:10.24411/2076-6785-2019-10063

Д.В. Копылов

главный специалист по геофизике<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>  
kopylovdmtr@yandex.ru

М.Р. Садуртдинов

к.т.н., директор<sup>2</sup>  
mr\_sadurtdinov@mail.ru<sup>1</sup>ООО «Тюменский нефтяной научный центр»,  
Тюмень, Россия<sup>2</sup>Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,  
Тюмень, Россия

**Приведены результаты, полученные методами электроразведки и георадиолокации в зоне действия опасных инженерно-геокриологических процессов на территории объектов нефтегазовой промышленности, расположенных в криолитозоне. На геоэлектрических и георадиолокационных разрезах определено наличие линз подземных льдов по контрастному различию удельного электрического сопротивления и амплитуд электромагнитных волн соответственно. В непосредственной близости от инженерных сооружений наблюдается существенное уменьшение электрического сопротивления, предположительно связанного с деградацией многолетнемерзлых грунтов в результате техногенного воздействия инженерных сооружений на изменение режима снегонакопления и изменение поверхностного и грунтового стока. Показана высокая эффективность геофизических методов при решении инженерно-геокриологических задач на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений.**

## Материалы и методы

Электроразведка: метод сопротивлений методикой электротомографии и метод георадиолокации.

## Ключевые слова

георадиолокация, криогенные процессы, морозобойное растрескивание, электроразведка

## Введение

Интенсивное освоение северных территорий, влечет за собой образование сложных техногенных и криогенных систем с индивидуальными особенностями функционирования, которые связаны с наличием вечномерзлых пород и льдов и их нестабильностью к внешним воздействиям.

Для большинства нефтегазовых месторождений, расположенных в криолитозоне, характерно широкое распространение опасных криогенных процессов как природного, так и техногенного характера. Под криогенными понимаются экзогенные геологические процессы, обусловленные сезонным и многолетним промерзанием и оттаиванием увлажненных грунтов, их охлаждением и замерзанием подземных вод [1, 2]. Эти процессы представляют опасность для нефтегазовой инфраструктуры, особенно на стадии образования и зарождения, когда визуально, в рельефе они еще не выражены. Обнаружение таких скрытых геологических процессов возможно геофизическими методами.

Геофизические методы широко применяются для решения инженерно-геокриологических задач в криолитозоне. Возможность использования геофизических методов обусловлена значительным различием физических свойств талых и мерзлых пород, что обуславливает эффективность их применения [3, 4].

В настоящее время существует ряд методов в арсенале геофизики для изучения многолетнемерзлых пород и криогенных процессов. К ним относятся методы электроразведки постоянным током, электромагнитные частотные методы, сейсморазведка [3]. В статье представлены результаты применения геофизических исследований для оценки геокриологического строения грунтов площадки в связи с проектированием нефтепромышленных сооружений. Решались задачи



Рис. 1 — Местоположение участка работ  
Fig. 1 — Location of the work site

обнаружения и картирования опасных инженерно-геокриологических процессов.

## Характеристика объекта исследования

Рассматриваемый участок изысканий расположен на территории Западно-Сибирской равнины, на Тазовском полуострове (рис. 1).

Участок работ относится к Тазовской области развития аккумулятивных равнин, сложенных средне-верхнечетверичными отложениями. Многолетнемерзлые и сезонно-талые грунты представлены суглинистыми, супесчаными, песчаными грунтами и торфом. Грунты относятся к твердомерзлым. Среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов на глубине нулевых годовых колебаний (10,0 м) составляет минус 2,35 °С. Большой диапазон колебаний температур происходит из-за неравномерного накопления снега на различных элементах рельефа, растительности и техногенного воздействия зданий и сооружений. Лыдность грунтов уменьшается с глубиной, дисперсные мерзлые



Рис. 2: А — Участок исследований с наличием активных криогенных процессов. Синими линиями представлены электротомографические профили, розовыми линиями — георадиолокационные профили. В желтых овалах показано морозобойное растрескивание; Б — Укрупненное отображение морозобойного растрескивания  
Fig. 2: А — Area with the presence of active cryogenic processes. The blue lines represent the electrotomographic profiles, the pink lines represent the geo-radar profiles. In the yellow oval shows the frost-shattered cracking; B — Enlarged display of frost cracking

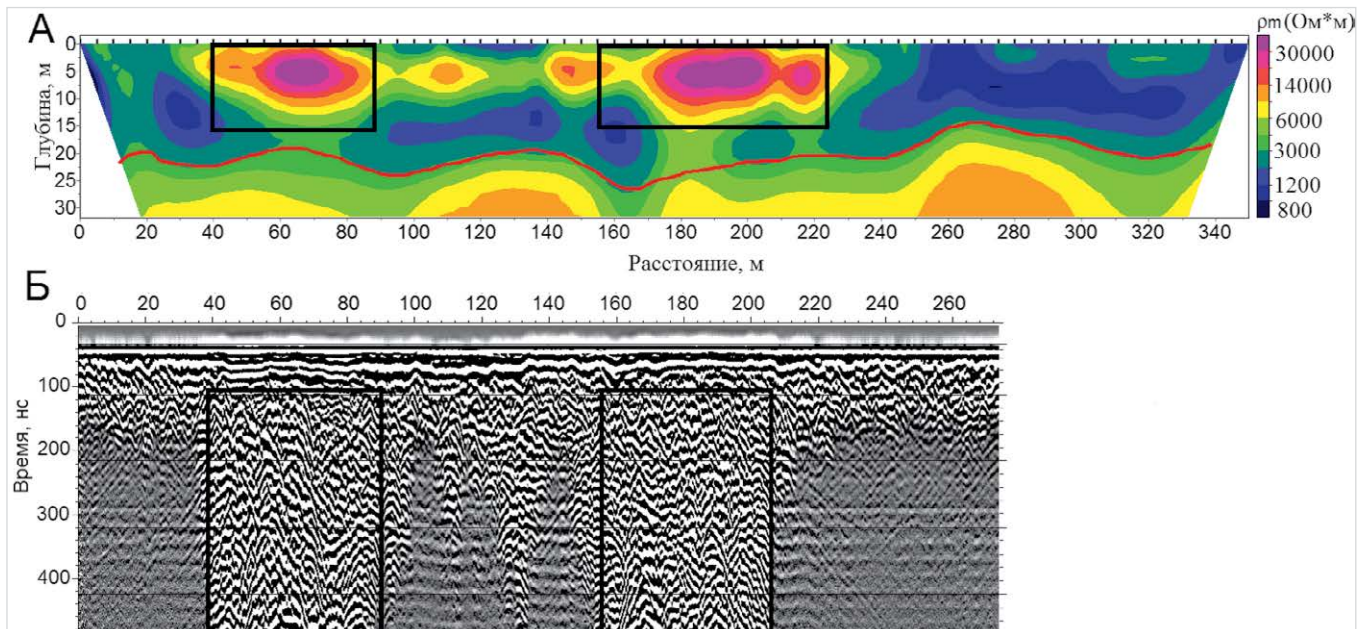


Рис. 3: А — Геоэлектрический разрез по профилю №3 с геологической интерпретацией. Черными квадратами выделены аномальные области от линз льда. Красная линия — кровля льдистых песков; Б — Георадиолокационный разрез по профилю №3 с геологической интерпретацией. Черными квадратами выделены аномальные области от линз льда

Fig. 3: A — Geoelectric section on the profile № 3 with geological interpretation. Black squares highlight anomalous areas from the ice lenses. The red line is the roof of the icy Sands; B — GPR section along profile № 3 with the geological interpretation. Black squares highlight anomalous areas from the ice lenses

грунты классифицируются от нельдистых до сильнольдистых, с редкими прослойками очень сильнольдистых грунтов в суглинках и супесях. Криогенная текстура мерзлых супесчано-суглинистых и песчаных грунтов слоистая и массивная, торфов – атакситовая.

В непосредственной близости от исследуемого участка расположена автодорога постоянного действия с твердым покрытием (рис. 2), а также промышленные строения.

В результате нарушения поверхностного стока летом и увеличения снежного покрова зимой вдоль дороги наблюдается заболачивание. Морозобойное растрескивание проявляется на повороте автодороги в виде системы трещин, которые формируют новый микрорельеф, оказывающий влияние на распределение тепла и влаги. Обычно возникают на участках малоомощного снежного покрова.

#### Методика исследований

Электроразведка на исследуемом участке реализовывалась методом сопротивлений методикой электротомографии и методом георадиолокации.

Электроразведка методом сопротивлений основана на изучении распределения поля постоянного или низкочастотного электрического тока в проводящих геологических

средах от искусственных источников с известными параметрами [5]. Применение данного метода обусловлено дифференциацией грунтов по электрическим свойствам, в частности удельного электрического сопротивления (далее — УЭС) грунтов, которое меняется в широких пределах и зависит в основном от влажности (льдистости), засоленности, пористости и глинистости. Известно, что при промерзании тонкодисперсных рыхлых отложений с образованием массивной криогенной текстуры увеличивается их удельное электрическое сопротивление в 10–100 раз, а при образовании шлировых криотекстур и повторножильных льдов — в 400–5000 раз. Возрастание содержания льда в грунтах приводит к соответствующему увеличению УЭС мерзлого грунта [4]. Под электротомографией понимается методика электроразведки, которая включает в себя определенные приемы полевых наблюдений, обработки и интерпретации полевой информации. К данным приемам относится многократное использование заземленных электродов в качестве и питающих, и приемных. Такая особенность методики позволяет существенно увеличить плотность системы наблюдения. Кроме того, интерпретация полевых данных выполняется в рамках двумерной модели с помощью

2D инверсии, при которой используется вся совокупность полученной информации по профилю для получения конечной модели. Поэтому 2D инверсия позволяет проводить интерпретацию не только в рамках горизонтально-слоистых сред.

На исследуемом участке электротомографические измерения выполнены по системе профилей, два из которых расположены параллельно друг другу, третий профиль — вкрест первого и второго. При электроразведочных работах применялась электротомографическая станция Omega-48, электроразведочная 235 метровая коса на 48 электродов, с шагом между электродами 5 метров. Обработка полученных материалов электрических зондирований выполнялась в программе ZondRes2D, с помощью которой построены двумерные геоэлектрические разрезы.

Георадиолокация — метод радиоволновой высокочастотной электроразведки, который основан на дифференциации грунтов по электромагнитным свойствам. Суть метода заключается в измерении времени пробега электромагнитной волны от генерирующей антенны к приемной, которая претерпевает отражения и преломления. Отражение электромагнитной волны происходит

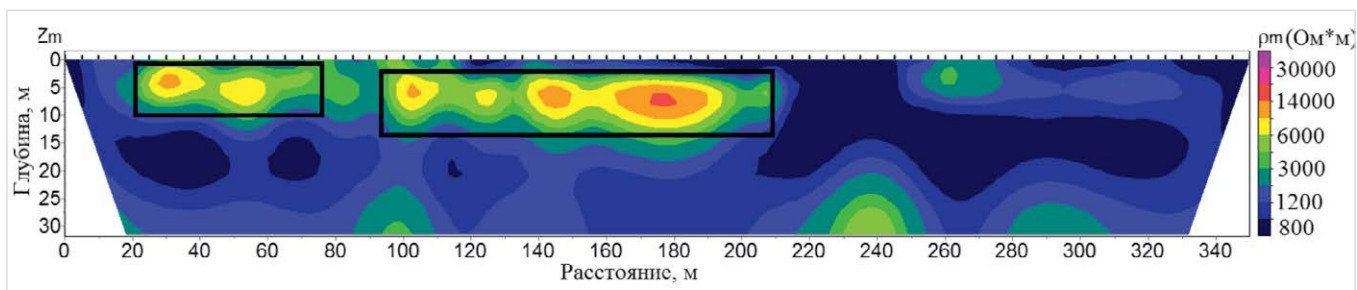


Рис. 4 — Геоэлектрический разрез по профилю №2. Черными квадратами выделены аномальные области от линз льда  
Fig. 4 — Geoelectric section of the profile №2. Black squares highlight anomalous areas from the ice lenses

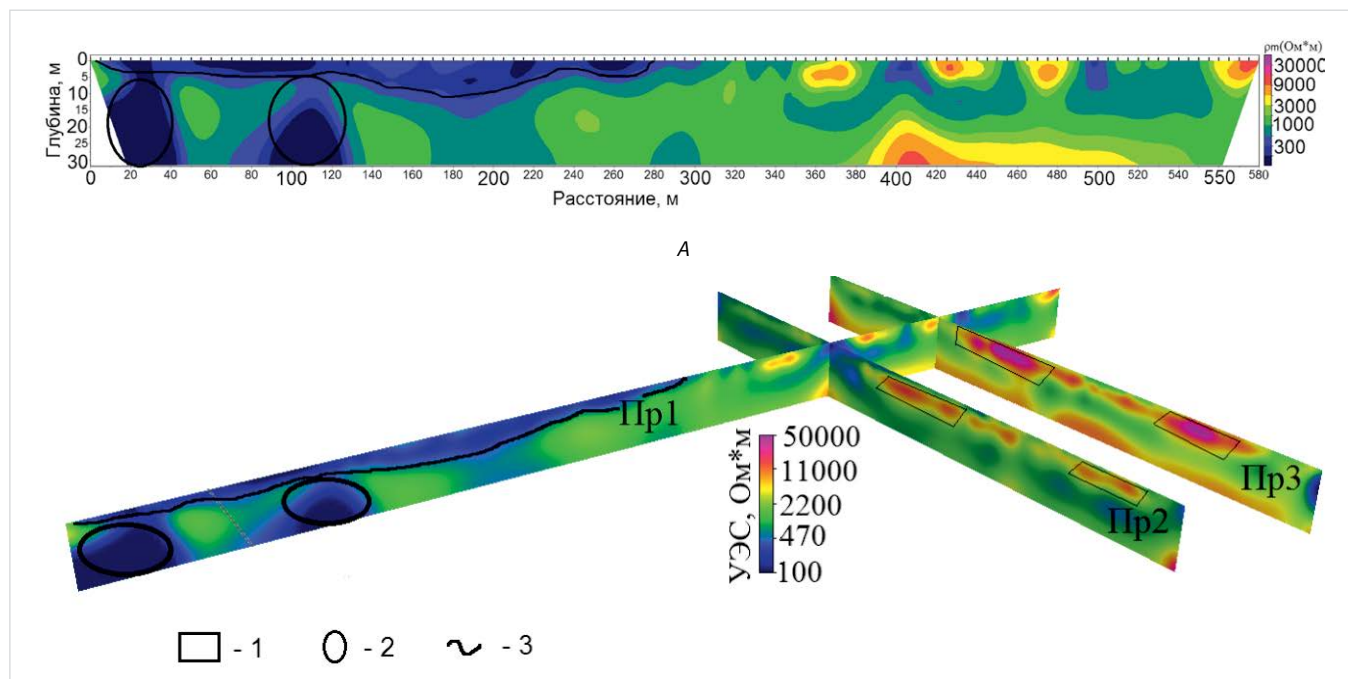


Рис. 5: А — Геоэлектрический разрез по профилю №1, Б — Трехмерная визуализация геоэлектрических разрезов. 1 — линзы подземных льдов, 2 — аномальная область от металлических коммуникаций, 3 — кровля многолетнемерзлых грунтов  
 Fig. 5: A — Geoelectric section on profile № 1, B — three-Dimensional visualization of geoelectric sections. 1 — lenses of underground ice, 2 — anomalous area from metal communications, 3 — the roof of permafrost

за счет наличия границ слоев с различными электромагнитными свойствами, в частности диэлектрическая проницаемость. Известно, что относительная диэлектрическая проницаемость воды, при центральной частоте георадарных исследований 100 МГц, близка к 81, пресного льда — 3, воздуха — 1 [6]. Данный контраст диэлектрической проницаемости дает возможность выделять границы мерзлых и талых грунтов, льдов, оконтуривать техногенные и природные объекты в грунте по интенсивным осям синфазности отраженных волн.

При работах методом георадиолокации применялся георадар ОКО-2 с незранированным антенным блоком «Тритон», центральной частотой 50 МГц, который перемещался вдоль профиля.

Обработка данных георадиолокации была выполнена в программе Geoscan32.

### Результаты исследований

На рис. 3А приведен геоэлектрический разрез по профилю №3, проходящий вдоль автодороги в 50 метрах от насыпи. Начало профиля располагается на возвышенности, конец профиля — на болотистом участке. Перепад высот начала и конца профиля — 1,5 метра.

На данном разрезе, в верхней его части, четко выделяются две аномальные области с высоким удельным электрическим сопротивлением 30000 Ом-м и более. Первая аномалия расположена в интервале ПК 60–80 метров от начала профиля, вторая аномалия — в интервале ПК 170–220 метров. В правой части профиля выделяется относительно низкоомная область с УЭС 800–1200 Ом-м, которая связана с болотистым обводненным участком на дневной поверхности и суглинками в разрезе. С глубины 15–20 метров, по всему профилю выделяется относительно

высокоомный геоэлектрический слой с удельным сопротивлением до 14000 Ом-м. Данный слой литологически представлен льдистыми песками, что подтверждено результатами бурения.

На рис. 3Б представлен георадиолокационный разрез по тому же профилю. По характеру волновой картины четко выделяется две области с высокоамплитудными осями синфазности отраженных электромагнитных волн на ПК 40–90 и ПК 160–200 метров. Данные высокоамплитудные области совпадают с областями аномально высокого удельного сопротивления и интерпретируются как линзы подземного льда в разрезе [7]. В правой, левой и центральной частях георадарного разреза наблюдаются области быстро затухающей записи электромагнитной волны. Данные области совпадают с относительно низкоомными участками на геоэлектрическом разрезе и литологически представлены супесями и суглинками.

На рис. 4 представлен геоэлектрический разрез по профилю №2, расположенный в 50 метрах от технологических установок и в 150 метрах от профиля №3.

По характеру распределения удельного электрического сопротивления геоэлектрический разрез №2 схож с геоэлектрическим разрезом №3. Также, в верхней его части четко выделяются аномальные области с высоким удельным электрическим сопротивлением, но УЭС понизилось до 11000 Ом-м, размер линз уменьшился. В правой части профиля выделяется относительно низкоомная область. С глубины 15–20 метров, по всему профилю наблюдается незначительное увеличение удельного сопротивления до 3000 Ом-м.

Следует отметить, что при анализе геоэлектрических разрезов на исследуемом участке, наблюдается значительное понижение удельного сопротивления при

приближении к технологическим установкам, что хорошо заметно при трехмерной визуализации геоэлектрических разрезов на рис. 5.

В местах прохождения электроразведочного профиля через металлические коммуникации наблюдаются характерные локальные аномалии низкого сопротивления. Левая часть геоэлектрического разреза №1, расположенного в 10 метрах от технологических установок, характеризуется наличием низкоомного верхнего слоя с УЭС 150–300 Ом-м и мощностью 5–7 метров. Предположительно, данный факт связан с наличием технологических сооружений, из-за которых происходит перераспределение снежного покрова и изменение поверхностного и грунтового стока. При увеличении снежного покрова происходит менее глубокое промерзание грунтов в зимнее время, а скапливание поверхностных и грунтовых вод способно оказывать растепляющее влияние на вечномерзлые грунты, которое приводит к активизации термокарста.

### Итоги

По результатам электроразведочных геофизических исследований на участке работ обнаружены линзы подземного льда, которые выделяются на геоэлектрическом разрезе аномалиями высокого удельного сопротивления, на георадиолокационном разрезе — высокоамплитудными областями на фоне зон быстрого затухания электромагнитных волн. На местности данные аномалии совпадают с распространением морозобойного растрескивания.

Сопоставление георадиолокационного и геоэлектрического разрезов показало, что выделенные высокоамплитудные области на радарограмме, хорошо согласуются с высокоомными линзами на геоэлектрическом разрезе, а области быстрого затухания

электромагнитной волны совпадают с относительно низкоомными участками.

По характеру распределения удельного электрического сопротивления грунтов по площадке установлено уменьшение данного параметра при приближении к технологическим установкам, что связано с увеличением влажности грунтов в результате техногенного воздействия инженерных сооружений на изменение режима снегонакопления и изменение поверхностного и грунтового стока. Как следствие, переувлажнение многолетнемерзлых грунтов ведет к их растеплению и развитию термокарстовых процессов.

#### Выводы

Полученные результаты геофизических исследований продемонстрировали высокую эффективность применения электроразведочных методов в условиях техногенного

воздействия в районе распространения многолетнемерзлых грунтов. Данные методы исследований целесообразно применять не только при инженерных изысканиях, но и на стадиях строительства, эксплуатации и реконструкции инженерных сооружений с целью режимных и мониторинговых исследований для решения задач изучения инженерно-геокриологических процессов и их динамики.

#### Литература

1. Бойцов А.В. Геокриология и подземные воды криолитозоны: учебное пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 178 с.
2. Илларионов В.А. Инженерное мерзлотоведение: учебное пособие. Сыктывкар: СыктГУ, 2014. 104 с.
3. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: М.: МГУ, 2007. 272 с.

4. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пуцино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
5. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. №2. С. 14–17.
6. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: МГУ, 2004. 153 с.
7. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
8. Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2009. 401 с.

ENGLISH

GEOPHYSICS

UDC 551.341+550.837

## Using geoelectrical prospecting for engineering-geocryological studies on objects of oil and gas infrastructure

#### Authors

**Dmitry V. Kopylov** — chief specialist in geophysics<sup>1</sup>, postgraduate<sup>2</sup>; [kopylovdmitr@yandex.ru](mailto:kopylovdmitr@yandex.ru)  
**Marat R. Sadurtdinov** — Ph.D., director<sup>2</sup>; [mr\\_sadurtdinov@mail.ru](mailto:mr_sadurtdinov@mail.ru)

<sup>1</sup>Tyumen petroleum research center LLC, Tyumen, Russian Federation

<sup>2</sup>Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russian Federation

#### Abstract

The results obtained by methods of electrical exploration and GPR in the area of hazardous engineering and permafrost processes in the territory of oil and gas facilities located in the cryolithozone are presented. On the geoelectric and GPR sections, the presence of ground ice lenses was determined from the contrast difference of electrical resistivity and amplitudes of electromagnetic waves, respectively. In the immediate vicinity of engineering structures, a significant decrease in electrical resistance is observed, presumably associated with the degradation of permafrost soils as a result of the technogenic impact of engineering structures on changes in snow accumulation and changes in surface and groundwater runoff. The high efficiency of geophysical methods in solving engineering and geocryological problems at the stages of design, construction and operation of engineering structures is shown.

#### Materials and methods

Electrical exploration: the method of electrical tomography and GPR method.

#### Keywords

GPR, cryogenic process, frost-shattered cracking, electrical exploration

#### Results

The results of electrical geophysical investigations on the site discovered lenses of underground ice, which are allocated in the context of geoelectrical anomalies of high resistivity, GPR in the context of - high-amplitude portions of the background areas of rapid attenuation of electromagnetic waves. On the ground, these anomalies coincide with the spread of frost-shattered cracking. Comparison of GPR and geoelectric sections showed that the isolated high-amplitude region in the radiogram, in good agreement with high resistance lenses on the geoelectric section, and the rapid attenuation of the electromagnetic waves coincide with relatively low-resistance areas.

By the nature of the resistivity distribution of the soil across the site, found to decrease this parameter when the approach to technological installations, due to increase in soil moisture content as a result of anthropogenic impacts of engineering structures on the change of the regime of snow accumulation and change surface and groundwater flow. As a consequence, waterlogging of permafrost soils leads to their thawing and development of thermokarst processes.

#### Conclusions

The results of geophysical studies have demonstrated the high efficiency of the application of electrical methods in the conditions of technogenic impact in the area of permafrost distribution. These research methods should be applied not only in engineering surveys, but also at the stages of construction, operation and reconstruction of engineering structures for the purpose of regime and monitoring studies to solve the problems of studying engineering-geocryological processes and their dynamics.

#### References

1. Boitsov A.V. *Geokriologiya i podzemnye vody kriolitozony* [Geocryology and groundwater in permafrost zone]. Tyumen: Tyumen state oil and gas University, 2011, 178 p.
2. Illarionov V.A. *Inzhenernoe merzlotovedenie* [Permafrost engineering]. Syktывkar: SyktSU, 2004, 104 p.
3. Zыkov Y.D. *Geofizicheskie metody issledovaniya kriolitozony* [Geophysical methods for the study of cryolithozone]. Moscow: MSU, 2007, 272 p.
4. Frolov A.D. *Elektricheskie i uprugie svoystva merzlyh porod i l'dov* [Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice]. Pushchino: ONTI PNC RAS, 1998, 515 p.
5. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevнин V.A. *Elektrotomografiya metodom soprotivlenij i vyzvannoj polarizacii* [The method of electrical tomography resistivity and induced polarization]. Instruments and systems of exploration Geophysics, 2006, issue 2, pp. 14–17.
6. Vladov M.L., Starovoytov A.V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu* [Introduction to ground penetrating radar]. Moscow: MSU, 2004, 153 p.
7. Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenij* [GPR. From the physical basics to the most promising directions]. Moscow: GEOS, 2017, 240 p.
8. Voronkov O.K. *Inzhenernaya sejsmika v kriolitozone (Izuchenie stroeniya i svoystv merzlyh i talyh gornyh porod i massivov)* [Engineering seismic in the permafrost zone (Study of the structure and properties of frozen and thawed rocks and massifs)]. St. Petersburg: VNIIG them. B.E. Vedeneeva, 2009, 401 p.