

## Работы молодых ученых

УДК 550.31: 550.812.12

### МНОГОЧАСТОТНЫЕ РАДИОВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СКВАЖИНАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА ПРОЦЕССОМ ОТТАИВАНИЯ ММП (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ «РУССКОЕ», ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

© 2017 А.О. Черепанов

ООО «Радионда», Москва, 121614; e-mail: radionda@radionda.ru

Представлены результаты опытных работ на территории Западной Сибири, иллюстрирующие новые возможности радиоволновых методов при инженерно-геофизических изысканиях для выявления и мониторинга распространения областей оттаивания многолетнемерзлых пород.

*Ключевые слова:* многолетнемерзлые породы, мониторинг, инженерные изыскания, геофизические исследования скважин.

В настоящее время особую актуальность приобретает контроль состояния многолетнемерзлых пород (ММП) в зоне их теплового взаимодействия с эксплуатационными скважинами для принятия опережающих мер при неблагоприятном развитии событий на действующих и строящихся нефтегазовых месторождениях (Кравец 2012; Малюков и др., 2016). Вокруг эксплуатационных скважин происходит интенсивная деградация ММП: образуется область оттаивания, что приводит к возникновению приустьевых воронок и провалов. Развитие криогенных процессов негативно сказывается на надежности инженерных сооружений, повышается риск возникновения аварийных ситуаций (Гасумов и др., 2005; Зверев и др., 2013).

Оценку состояния пород в основании кустовых площадок в настоящее время проводят по данным режимных термометрических наблюдений (Губайдуллин и др., 2015; СП ..., 2011). Для этого вблизи исследуемого объекта организуется сеть наблюдательных скважин в верхней части ММП. Однако при сложном геологическом строении линейная интерполяция данных скважинной термометрии не характеризует массив ММП в целом. Кроме этого, переход пород из мерзлого состояния в талое возможен в широком диапазоне температур и даже без ее изменения, так как зависит от многих факторов:

литологии, состояния, состава (Фролов, 2005). Известно, что электрические свойства, по сравнению с температурой, более чувствительны к изменению физико-механических свойств, так как переход пород из мерзлого состояния в талое сопровождается значительным изменением, как электрического сопротивления ( $\rho$ ), так и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) (Зыков, 2007; Фролов, 2005).

Для изучения характеристик пород в условиях естественного залегания и для ранней диагностики изменения мерзло-талого состояния хорошими перспективами обладают скважинные радиоволновые методы (РВМ), которые имеют существенные преимущества перед применяемыми наземными электро-разведочными методами и методами электрического каротажа: кажущегося сопротивления (КС), бокового каротажа (БК), индукционного каротажа (ИК):

1. Мерзлые породы в большинстве случаев обладают достаточно высоким уровнем электрического сопротивления и, соответственно, характеризуются низким коэффициентом поглощения радиоволн. Это обеспечивает необходимую дальность и максимально высокую разрешающую способность. Для стандартных индукционных методов (ИК) такие условия являются крайне неблагоприятными;

2. Бесконтактный электромагнитный способ возбуждения и приема поля позволяет осуществлять измерения в сухих наблюдательных скважинах, предназначенных для температурных измерений, в том числе и при их обсадке полиэтиленовыми трубами;

3. Диапазон используемых частот 0.03–50 МГц обеспечивает эффективные измерения в различных геоэлектрических и технологических условиях и определение эффективных значений обеих электрических характеристик ММП —  $\rho_{эфф}$  и  $\varepsilon_{эфф}$ .

Наибольшие значения  $\rho_{эфф}$  соответствуют мерзлым породам, в процессе их оттаивания  $\rho_{эфф}$  снижается. С увеличением содержания воды в породах диэлектрическая проницаемость возрастает.

Разработка новых модификаций радиоволнового метода осуществлена научно-производственной геофизической компанией ООО «Радионда» в 1996–2010 гг. (<http://www.radionda.ru>). Была создана многочастотная, цифровая, высокочувствительная аппаратура РВГИ-07 и ДИМЧ-2L (Истратов и др., 2006), разработана методика радиоволновой геоинтроскопии «РВГИ» (Istratov, Frolov, 2003), технология объемного (3D) геоэлектрического картирования межскважинного пространства, метод многочастотной диэлектрической интроскопии околоскважинного пространства (Истратов, 2015). На основе 3D-РВГИ были разработаны технологии 4D-мониторинга развития технологических процессов в межскважинном пространстве при разработке нефтяных месторождений (Истратов и др., 2000) и скважинном подземном выщелачивании урана (Демехов и др., 2016). Технологические решения, реализованные в современной аппаратуре, позволили: повысить чувствительность измерений к изменению геоэлектрических условий, проведение многочастотных измерений и расчета  $\varepsilon_{эфф}$  — дополнительного параметра, характеризующего состояния ММП. Эти новые возможности определили целесообразность проведения научно-исследовательских и опытных работ по адаптации технологии объемного геоэлектрического мониторинга для решения геокриологических задач (Черепанов, 2013., 2014).

Экспериментальные работы проведены автором на ряде газонефтяных месторождений Ямало-Ненецкого АО и Красноярского края, отличающихся по геокриологическим особенностям (рис. 1). С помощью радиоволновых скважинных методов изучены геоэлектрические характеристики ММП в неизменном состоянии, а также исследовано их изменение во времени вследствие теплового воздействия эксплуатационных скважин. Впервые в мировой практике были проведены многочастотные

радиоволновые исследования, позволившие оценить возможности метода для определения диэлектрической проницаемости ММП в межскважинном пространстве. В результате получены объемные (3D) геоэлектрические карты распределения электрических характеристик ММП на участках исследования (Черепанов, 2013., 2014).

В качестве примера, рассмотрим результаты пространственного геоэлектрического мониторинга состояния ММП, проведенного на действующей кустовой площадке месторождения нефти «Русское». На представленной кустовой площадке (рис. 2) происходило интенсивное оттаивание ММП. Исследования проводились вблизи нагнетательной скважины, не имеющей теплоизолирующего оборудования. Через ее устье для поддержания пластового давления пропускался раствор, разогретый до температуры 120°C. В процессе нескольких лет эксплуатации кустовой площадки нагнетательная скважина стала мощным источником нагрева окружающих ее ММП. Для проведения режимных исследований с целью изучения области оттаивания ММП вокруг нагнетательной скважины были специально пробурены шесть наблюдательных скважины глубиной до 30 м, в которых в течение 2011–2013 гг. осуществлено три этапа мониторинговых измерений. На первом этапе исследований с помощью комплекса радиоволновых методов и гамма-каротажа было установлено геологическое строение участка. Выявлено, что в разрезе преобладают мерзлые глинистые породы, которые пересекает выклинивающийся крутопадающий слой мерзлого песка. По результатам исследований вокруг нагнетательной скважины была выделена область оттаивания ММП (рис. 2), в пределах которой происходит изменение электрических свойств ММП за счет перехода льда в воду. Внутри этой области сформировалась область полностью талых пород, где фазовый переход льда в воду завершен. Наличие выделенных областей подтверждены данными скважинной термометрии и керновым бурением.

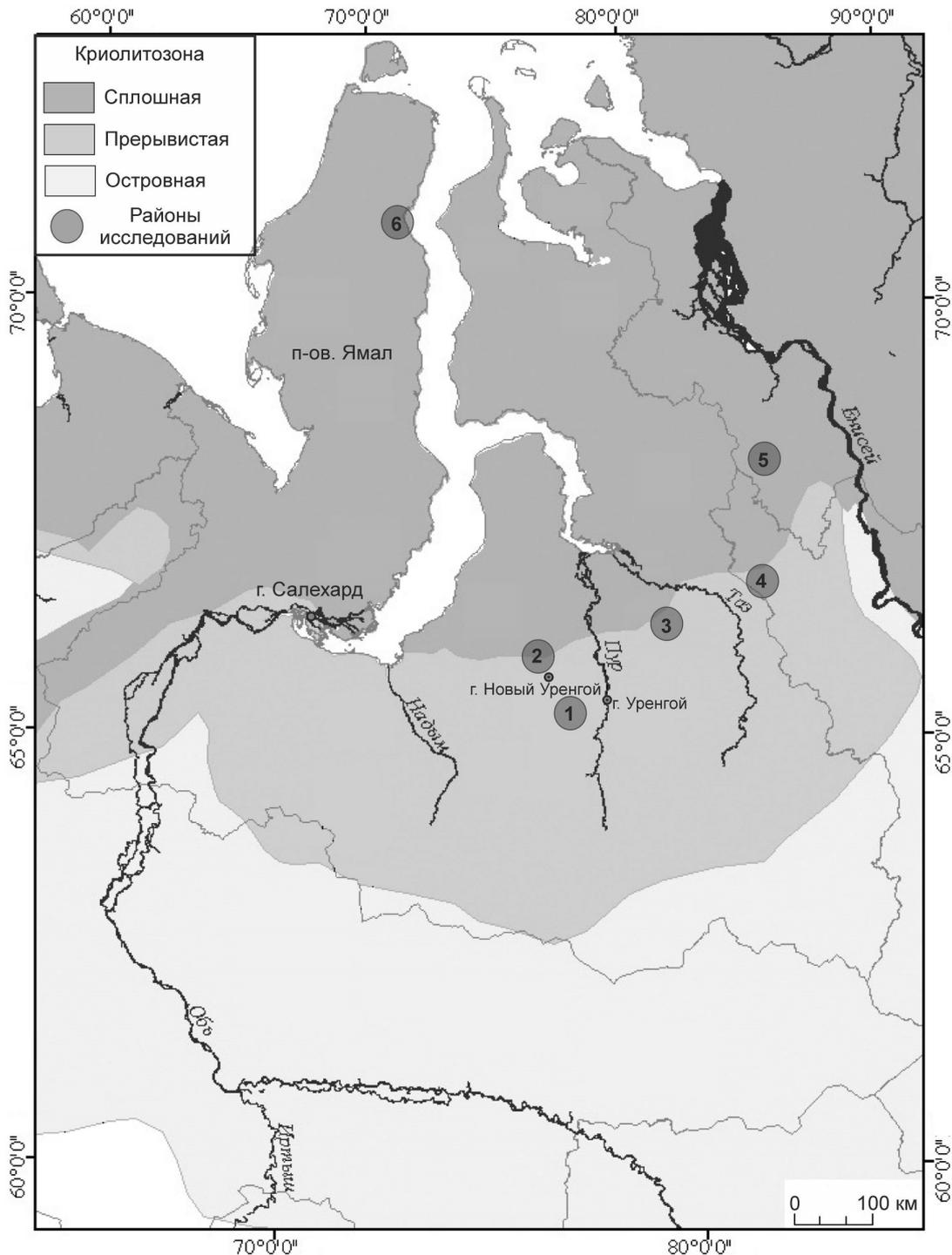
Сопоставление результатов мониторинговых радиоволновых измерений, позволило определить направление и скорость распространения процесса оттаивания ММП в пространстве вокруг нагнетательной скважины.

Неоднородности геологического строения обусловили неравномерность развития области оттаивания ММП как в плане, так и с глубиной. Наибольшим изменениям подверглись мерзлые пески: изменение электрических характеристик зафиксировано на расстоянии 15 м от источника нагрева. В интервале глинистых пород область оттаивания распространена менее значительно — на расстоянии 7 м от нагнетательной скважины.

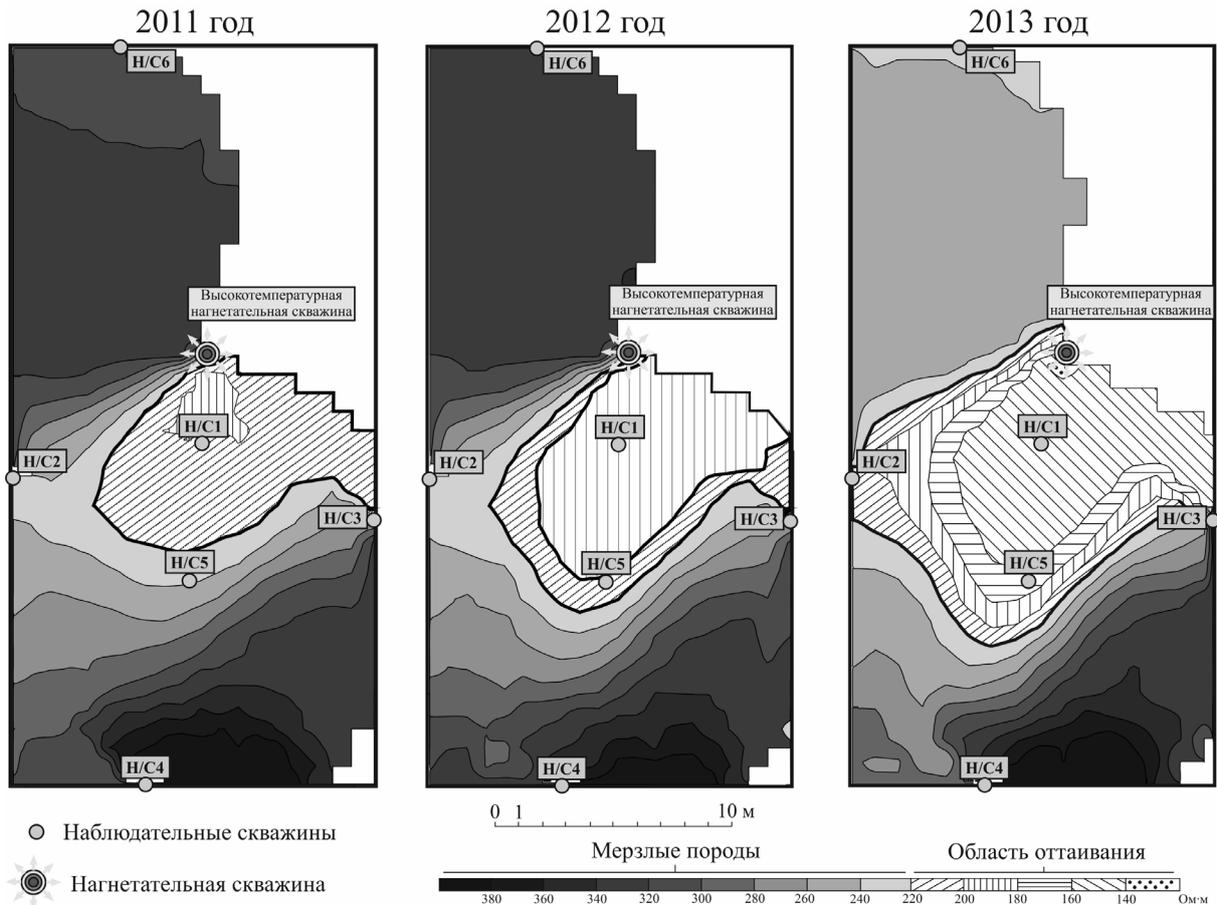
Мониторинговые измерения фиксируют постоянное расширение области оттаивания, в среднем на 2 м/год, относительно первоначальных границ. На этапах мониторинговых исследований глинистые породы полностью перешли в талое состояние на расстоянии 4.5 м от источника нагрева, в интервале песков на расстоянии 7.5 м. Расширение области талых

пород составляет в среднем порядка 0.5 м/год. На период последнего этапа мониторинговых измерений размеры фактической области оттаивания превосходили расчетные, полученные с помощью математического моделирования, более чем в два раза.

В процессе проведенных исследований впервые опробованы разработанные автором



**Рис. 1.** Схема расположения объектов исследований на карте районирования зон ММП территории Западной Сибири: 1 — Ново-Уренгойский лицензионный участок; 2 — Восточно-Уренгойский лицензионный участок; 3 — месторождение «Русское»; 4 — месторождение «Тагульское»; 5 — месторождение «Сузунское»; 6 — месторождение «Южно-Тамбейское».



**Рис. 2.** Результаты мониторинга процесса оттаивания ММП вблизи нагнетательной скважины в период 2011–2013 гг. на действующей кустовой площадке месторождения «Русское». Горизонтальные планы на глубине 13 м в интервале глинистых пород, (фрагмент 3D геоэлектрической карты  $\rho_{эфф}$  для частоты 5МГц). Серые оттенки на разрезах соответствует мерзлым породам, белым со штриховкой обозначена область оттаивания. Местоположение месторождения приведено на рис. 1.

алгоритмы обработки многочастотных данных РВГИ для количественной оценки диэлектрической проницаемости пород в трехмерном пространстве в реальных геологических условиях. Опытно-методические работы проведены на частотах в диапазоне 5–31 МГц. Предполагается, что на этих частотах на измеряемую напряженность поля  $E$  оказывает влияние как значения  $\rho$ , так и  $\epsilon$  (Фролов, 2005). Оценка предложенных алгоритмов проведена путем сопоставления теоретических вычислений и данных фактических измерений. Установлено, что обработка многочастотных данных РВГИ невозможна без учета частотной дисперсии электрического сопротивления. Частотная дисперсия оказывает заметное влияние на результаты вычислений электрических характеристик пород. Однако при этом значение коэффициента дисперсии  $\rho_{эфф}$  может варьировать в строго ограниченном и достаточно узком диапазоне. В результате расчетов получено распределение эффективных значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{эфф}$  на участке исследования (таблица, рис. 3). Диэлектрическая проницаемость является важным

параметром, требующим оценки при изучении изменения физического состояния ММП.

Разработанная технология является новым способом мониторинга состояния ММП, которая экспериментально опробована и может быть рекомендована при проведении инженерно-геофизических изысканий на действующих и строящихся кустовых площадках нефтегазовых месторождений Западной Сибири, расположенных

Геоэлектрические параметры талых и мерзлых пород, определенных по данным РВГИ

Породы	Коэффициент частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ , ед.	$\rho_{эфф}$ , Ом·м	$\epsilon_{эфф}$ , от.ед.
Мерзлая супесь	0.031	165	4.9
Талая супесь	0.034	128	5.8
Мерзлый песок	0.033	173	11.6
Талый песок	0.034	130	5.7
Мерзлый суглинок	0.039	78	3.8
Талый суглинок	0.038	86	5.3

3D геоэлектрическая карта  $\rho_{эфф}$  ( $K_{диспR} 0.035$ )

3D геоэлектрическая карта  $\epsilon_{эфф}$  ( $K_{диспR} 0.035$ )

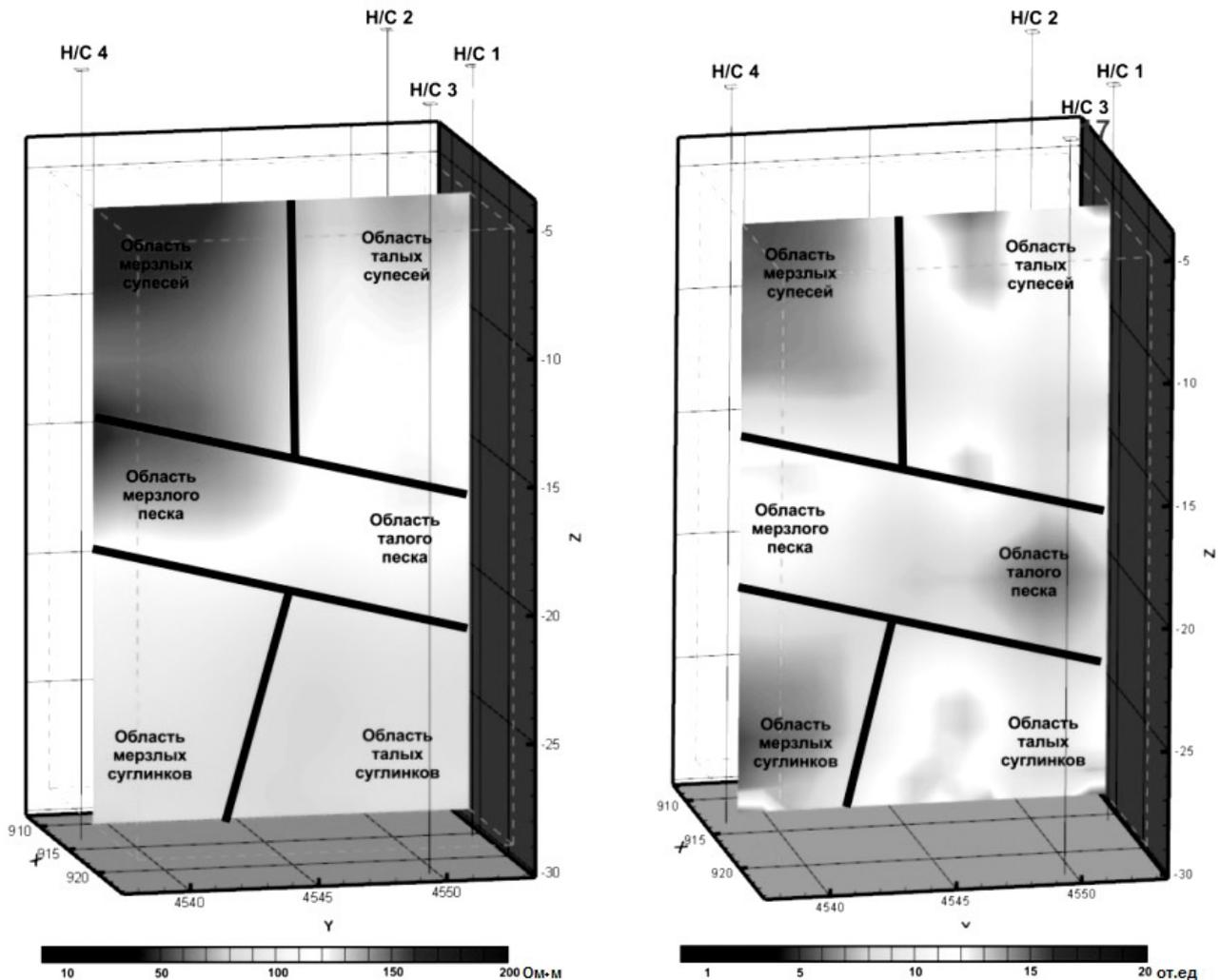


Рис. 3. Фрагменты объемных карт  $\rho_{эфф}$  и  $\epsilon_{эфф}$ , рассчитанные методом сопоставления многочастотных данных при коэффициенте частотной дисперсии  $K_{дисп\rho_{эфф}}=0.035$ . Вертикальные разрезы по линии скважин H/C1 — H/C4. Аксонометрическая проекция.

в различных геокриологических условиях (Черепанов, 2013., 2014). Пространственный геоэлектрический мониторинг скважинными радиоволновыми методами позволяет получить дополнительную информацию к традиционным температурным измерениям и достоверно отслеживать изменение геокриологического состояния ММП как в пространстве, так и во времени.

Список литературы

Гасумов Р.А., Терновой Ю.В., Королев С.Н., Кондренко О.С. Прогноз устойчивости кондуктора при растеплении в зонах многолетнемерзлых пород в процессе бурения и эксплуатации скважин // Нефтепромышленное дело. 2005. № 11. С. 8–13.  
 Губайдуллин М.Г., Макарский Н.А., Янгиров И.В. Исследования термического режима мерзлых пород, находящихся под тепловым воздействием нефтедобывающей инфраструктуры //

Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия «Естественные науки». 2015. № 2. С. 13–21.

Демехов Ю.В., Истратов В.А. Радиоволновой метод 4D мониторинга процесса разработки урановых месторождений СПВ. Материалы конф. «Геотехнологические методы освоения месторождений твердых полезных ископаемых», М.: ФУГП «ВИМС», 2016, С. 236–243.

Зверев Г.В., Тарасов А.Ю. Расчет и анализ воздействия многолетнемерзлых пород на крепление скважины № 338 Ванкорского месторождения в период эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 8. С. 41–51.

Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 2007. 272 с.

Истратов В.А., Перекалин С.О., Мазитова И.К. и др. Комплекс электромагнитных методов «5ИК-МFDI» для определения характера насыщения коллекторов в условиях

- заводнения пресными водами, применения инвертных буровых растворов и стеклопластиковых обсадных труб // Каротажник. 2015. Вып. 10(256). С. 44–54.
- Истратов В.А., Кучмин А.О., Фролов А.Д.* Возможности технологии межскважинной радиоволновой геоинтроскопии при контроле состояния частично мерзлых грунтов. Международная академия холода. Моделирование замораживания грунтов искусственным холодом // Материалы IX конф. / Под. ред. В.В. Улитина. Спб.: СПбГУНиПТ, 2003. С. 36–44.
- Истратов В.А., Кучмин А.О., Фролов А.Д.* Скважинная радиоволновая геоинтроскопия при эколого-геофизическом мониторинге мерзлых массивов // Материалы III конф. Геокриологов России. Т. 3. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 320–325.
- Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В. и др.* Радиоволновая геоинтроскопия межскважинного пространства РВГИ на месторождениях нефти // Геофизика. 2000. Специальный выпуск. С. 90–93.
- Истратов В.А., Скринник А.В., Перекалин С.О.* Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии горных пород в межскважинном пространстве «РВГИ-2005» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 1. С. 20–26.
- Кравец А.Г.* Вечная мерзлота добыче газа и нефти не помеха // Российские недра. 2012. № 10(140). С. 7.
- Малюков В.П., Хаджиев М.К.* Особенности разработки Бованенковского нефтегазового месторождения на Ямале. Защита окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 286–294.
- Петровский А.А., Достовалов Б.Н.* Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами. Труды ин-та мерзлотоведения. М-Л: Изд-во АН СССР. 1947. Т. 5. С. 121–160.
- СП 25.13330.2012 СНИП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНИП 2.02.04-88 (утв. Приказом Министерства регионального развития РФ 29.11.2011 г. 622).
- Фролов А.Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Второе дополненное и исправленное издание. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. 607 с.
- Черепанов А.О.* Методы скважинной геофизики для исследования многолетнемерзлых грунтов на кустовых площадках нефтегазовых месторождений Западной Сибири // Инженерные изыскания. 2013. № 13. С. 38–47.
- Черепанов А.О.* Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния многолетнемерзлых пород вблизи нагнетательных скважин на примере одного из нефтяных месторождений Западной Сибири // Инженерные изыскания. 2014. № 12. С. 18–24.
- Istratov V.A., Frolov A.D.* Radio wave borehole measurements to determine the in situ electric property distribution in Frozen massif // J. Geophys. Researches. V. 108. № E4, 8039, doi: 10.1029/2002JE001880, 2003.
- Kuchmin A., Istratov V., Ostapchuk S., Lyakh Y.* Technology of radio wave researches for 3D-geo-electrical mapping of inter-well space in permafrost massif. EUCOP II, Germany, Potsdam, 2005.

**MULTI-FREQUENCY BOREHOLE RADIO-WAVE INVESTIGATION  
FOR PERMAFROST THAWING CONTROL:  
CASE STUDY FOR OIL FIELD «RUSSKOE», WESTERN SIBERIA**

**A.O. Cherepanov**

*Radionda LTD, Moscow; e-mail: radionda@radionda.ru*

The article presents the results of the experimental work in Western Siberia, which give new possibilities for crosshole radio-wave methods for engineering and geological investigation and monitoring of permafrost thawing.

*Keywords: permafrost, monitoring, engineering investigation, borehole geophysical investigation.*