

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.341:550.8.053

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(129-133)

**ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ
ОТ ТАЛЫХ ВОДОНОСНЫХ ЗОН И ГОРИЗОНТОВ В МЕРЗЛЫХ ТОЛЩАХ**

В.Н. Ефремов

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; vne@mpi.ysn.ru*

Предложен новый параметр оценки электрических свойств грунтов криолитозоны – эффективное электромагнитное сопротивление. Параметр представляет собой отношение эффективных значений электрического сопротивления к относительной диэлектрической проницаемости, измеренных методом радиоквип, радиоимпедансным или радиоманнитотеллурическим зондированием на частоте колебаний поля удаленной радиостанции в диапазоне от 10 до 1000 кГц. За счет совместного учета изменений электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости по данному параметру более надежно, чем по эффективному или кажущемуся сопротивлению, выделяются талые, увлажненные, водонасыщенные зоны и горизонты в многолетнемерзлых грунтах. Приведены результаты численного моделирования и натурного эксперимента по применению данных измерения электромагнитного сопротивления на подобных объектах. Результаты экспериментов показывают, что вызванные наличием талых водонасыщенных зон и горизонтов изменения величины эффективного электромагнитного сопротивления на порядок превышают соответствующие изменения эффективного или кажущегося электрического сопротивления.

Криолитозона, водоносные горизонты, диэлектрическая проницаемость, эффективное электромагнитное сопротивление

**A POSSIBILITY FOR RECORDING GEOPHYSICAL ANOMALIES
FROM AQUIFERS AND GROUNDWATER IN PERMAFROST**

V.N. Efremov

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; vne@mpi.ysn.ru

A new parameter, apparent electromagnetic resistivity (EMR), is proposed for estimating the electrical properties of permafrost. It is a ratio of apparent resistivity to relative dielectric permittivity measured by radio-impedance or radiomagnetotelluric soundings in the frequency range of 10 kHz to 1000 kHz radiated by distant radio stations. The parameter records integrate variations in both electrical resistivity and dielectric permittivity and thus ensures more reliable detection of responses from unfrozen moist or water-saturated zones, aquifers, and groundwaters in permafrost than apparent resistivity. The use of the new parameter is tested in numerical and field experiments. The results show that changes in apparent electromagnetic resistivity caused by the presence of unfrozen water-bearing zones are an order of magnitude stronger than those of apparent resistivity.

Permafrost, aquifers, dielectric permittivity, apparent electromagnetic resistivity

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и картирование талых водоносных горизонтов, таликовых зон и подземных вод, представляющих собой проводящий слой (ПС) в мерзлых грунтах и толщах, наиболее эффективно производятся методами электроразведки. При этом в качестве исследуемого и оцениваемого параметра обычно используют удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород, поскольку именно по его величине наиболее значимо разделяются мерзлые и талые дисперсные породы. Однако выделение водоносных горизонтов и подзем-

ных вод по УЭС затруднено в том случае, когда у вмещающих пород его величина мала и незначительно отличается от УЭС проводящего слоя. Решение проблемы может быть достигнуто при использовании в качестве исследуемого параметра диэлектрической проницаемости влажных пород и воды. С учетом пониженного электрического сопротивления это позволит выделить водоносные горизонты и при повышенной диэлектрической проницаемости вмещающих пород. Для более надежного выделения увлажненных, водонасыщен-

ных талых горных пород и подземных вод мерзлого массива предлагается использовать новый параметр – электромагнитное сопротивление (ЭМС). В нем учитывается как электрическое сопротивление пород, так и их относительная диэлектрическая проницаемость (ОДП).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО ПАРАМЕТРА

Электромагнитное поле, проникая в толщу горных пород, в зависимости от частоты поля и электрических свойств горных пород, вызывает в ней токи проводимости, определяемые проводимостью пород σ , и токи смещения, определяемые их абсолютной диэлектрической проницаемостью ϵ_a .

Первое уравнение Максвелла с учетом токов проводимости и смещения имеет вид

$$\text{rot}H = \sigma E + \epsilon_a \frac{dE}{dt},$$

где $\sigma E = j_s$ – плотность тока проводимости; $\epsilon_a \frac{dE}{dt} = j_r$ – плотность тока смещения; H, E – магнитная и электрическая составляющие электромагнитного поля соответственно.

Отношение токов проводимости и смещения, называемое электромагнитным параметром, определяет электрические свойства среды для переменного поля в зависимости от его частоты:

$$\left| \frac{j_s}{j_r} \right| = \left| \frac{\sigma E}{\omega \epsilon_a E} \right| = \frac{\lambda \sigma}{2\pi c \epsilon \epsilon_0} = \frac{60\lambda \sigma}{\epsilon}, \quad (1)$$

где j_s – плотность тока проводимости, А/м²; j_r – плотность тока смещения, А/м²; σ – электрическая проводимость пород, См; E – электрическая составляющая поля, В/м; ω – круговая частота, Гц; ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; λ – длина волны, м; c – скорость света, м/с; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, отн. ед.; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м. Если $60\lambda \sigma \gg \epsilon$, то в среде преобладают токи проводимости, а сама она по свойствам приближается к проводнику. При $60\lambda \sigma \ll \epsilon$ преобладают токи смещения, а среда близка по свойствам к диэлектрику.

Соотношение между токами смещения и проводимости в том или ином виде содержится в известных выражениях для модуля и аргумента приведенного поверхностного импеданса среды δ , которые для однородного полупространства имеют следующий вид [Цыдытов и др., 1979]:

$$|\delta| = \frac{1}{\sqrt[4]{(60\lambda \sigma)^2 + \epsilon^2}}; \quad (2)$$

$$\text{arg} \delta = -0.5 \arctg \frac{60\lambda \sigma}{\epsilon}. \quad (3)$$

Когда токи смещения становятся соизмеримыми по величине с токами проводимости, результаты наблюдений представляют в виде эффективных значений УЭС и ОДП, определяемых через параметры поверхностного импеданса по формулам [Цыдытов и др., 1979]:

$$\rho_{ef} = - \frac{60\lambda |\delta|^2}{\sin(2\text{arg} \delta)}; \quad (4)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\cos(2\text{arg} \delta)}{|\delta|^2} - 1. \quad (5)$$

Мерзлые горные породы по соотношению токов проводимости и смещения в рассматриваемом диапазоне частот 10–1000 кГц занимают промежуточную область, для которой важны процессы поляризации и наряду с проводимостью становится значительной дисперсия диэлектрической проницаемости [Зыков, 2007].

Для талых, водоносных горных пород и подземных вод характерны повышенные значения диэлектрической проницаемости и пониженные значения электрического сопротивления, которые и являются геофизическими параметрами, наиболее явно отличающими данные объекты от вмещающих мерзлых горных пород. Если снижение электрического сопротивления указанных объектов широко используется геофизиками, то повышение их диэлектрической проницаемости гораздо реже.

Предлагаемый автором новый оцениваемый параметр – эффективное электромагнитное сопротивление r_{em} – представляет собой отношение эффективного значения электрического сопротивления к относительной диэлектрической проницаемости, измеренных на частоте, для которой существенно влияние токов смещения, и записывается в виде

$$r_{em} = \frac{\rho_{ef}}{\epsilon_{ef}} = \frac{60\lambda |\delta|^4}{\sin(2\text{arg} \delta) \cdot \cos(2\text{arg} \delta)}. \quad (6)$$

Впервые этот параметр был представлен в работе [Ефремов, 2011]. Измерений на одной частоте достаточно для интерпретации данных, полученных по профилю, поскольку в области соизмеримых величин токов проводимости и смещения наряду с модулем поверхностного импеданса в формулах для ρ_{ef} и ϵ_{ef} всегда присутствует и аргумент поверхностного импеданса, по которому оценивается глубинность измерения.

Пределы частотной области наиболее эффективного применения электромагнитного сопротивления определяются диапазоном, в котором выполняется условие равенства токов проводимости и смещения. С учетом (1) они могут быть рассчитаны по формуле

$$f = \frac{1.8 \cdot 10^7}{\rho \epsilon}, \quad (7)$$

где f – частота электромагнитного поля, кГц; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Простые расчеты с использованием (7) показывают, что для горных пород с УЭС в интервале 100–10 000 Ом·м и ОДП в пределах 10–80 область равенства токов проводимости и смещения будет соответствовать частотному диапазону 23–18 000 кГц.

Электромагнитное сопротивление рационально применять как измеряемый и оцениваемый по величине параметр при электроразведочном профилировании на предмет поиска и картирования таликовых, увлажненных или водонасыщенных зон и водоносных горизонтов в многолетнемерзлых грунтах. Наиболее эффективным его применение будет в тех случаях, когда диэлектрическая проницаемость указанных объектов поиска имеет повышенные значения при пониженных значениях электрического сопротивления.

Основанием для использования профилирования по электромагнитному сопротивлению при изучении мерзлых грунтов является значительное его изменение в радиоволновом диапазоне в зависимости от содержания и фазового состояния воды в дисперсных горных породах.

Наиболее существенных изменений электромагнитного сопротивления при переходе от мерзлых толщ к толщам, содержащим водоносный горизонт или подземные воды, следует ожидать в диапазоне частот от 10 до 1000 кГц, который полностью покрывается рабочими диапазонами частот радиоимпедансного [Ефремов, 2013] или радиомагнитотеллурического [Сараев и др., 2013] зондирования.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты по сравнению величины аномалий эффективных значений электрического сопротивления и электромагнитного сопротивления от внедренного в мерзлую толщу проводящего слоя проводились методом численного моделирования и путем натуральных измерений на естественном объекте. Проводящий слой в модели геоэлектрического строения по электрическим параметрам соответствовал водонасыщенным и водоносным талым зонам.

Численное моделирование выполнено по обработанной автором методике [Ефремов, 2013] с применением пакета программ “Импеданс” [Свидетельство..., 2002] и с использованием типовых для криолитозоны Центральной Якутии параметров геоэлектрического разреза. Одномерное моделирование частотной зависимости поверхностного импеданса горизонтально-слоистых многолетнемерзлых толщ при введении в них проводящего слоя с повышенной диэлектрической проницаемостью выполнено для пяти-шестислойных геоэлектрических разрезов при наличии сезонного слоя.

Натурные наблюдения производились по методике радиоимпедансного профилирования [Ефремов, 2013] в пригородной зоне г. Якутска на участке с надмерзлотным таликом, перекрытым сезонномерзлым слоем. Использовались импедансометр ИПИ-1000, имеющий диапазон рабочих частот от 10 до 1000 кГц, и незаземленная симметричная электрическая приемная линия с длиной каждого плеча 5 м. На каждой точке измерения магнитная антенна и приемная линия были ориентированы точно по пеленгу на радиостанцию. Расстояние между точками по профилю (пикетами) составляло 10 м. Измеренные значения модуля и аргумента (фазы) поверхностного импеданса пересчитывались в электромагнитное сопротивление в соответствии с формулами (2)–(6).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вычислительный эксперимент проведен численным моделированием зависимости величин эффективных электрического и электромагнитного сопротивлений слоистых моделей мерзлых толщ от глубины погружения в них водоносного проводящего слоя с продольной проводимостью 0.02 См и относительной диэлектрической проницаемостью, равной 40. Принятые в расчете значения УЭС и толщины ПС с увеличением глубины погружения также увеличивались (по аналогии с реальными условиями). Так, принятым в расчете значениям глубины залегания ПС 2, 6, 10, 14 и 18 м (в подошве слоя мерзлых дисперсных отложений) соответствуют значения толщины ПС равные 0.5, 1, 2, 3 и 4 м. При этом значения УЭС, близкие к реальным, подбирались так, чтобы продольная проводимость S сохраняла постоянное значение 0.02 См. Значения параметров проводящего слоя: $\rho = 25\text{--}200$ Ом·м, $\varepsilon = 40$, $h = 0.5\text{--}4$ м; сезонного слоя: $\rho = 100$ Ом·м, $\varepsilon = 20$, $h = 1$ м; мерзлых дисперсных отложений: $\rho = 10\ 000$ Ом·м, $\varepsilon = 8$, $h = 18$ м; мерзлых коренных пород: $\rho = 3000$ Ом·м, $\varepsilon = 8$, $h = 300$ м; талых коренных пород: $\rho = 300$ Ом·м, $\varepsilon = 10$. Диэлектрическая проницаемость ПС оставалась постоянной во всех вариантах. Полученные в эксперименте изменения эффективных значений ЭМС, вызванные изменением глубины погружения ПС, более существенны, чем изменения эффективных значений ЭС для тех же условий. Если изменения электрического сопротивления происходят в пределах одного порядка, то изменения электромагнитного сопротивления – на два порядка величины (рис. 1).

К объектам, подобным проводящему слою в модели, следует отнести талые суглинки и супеси, водонасыщенные горизонты с невысокой минерализацией воды, а также подземные воды, которые и по УЭС, и по ОДП несущественно отличаются

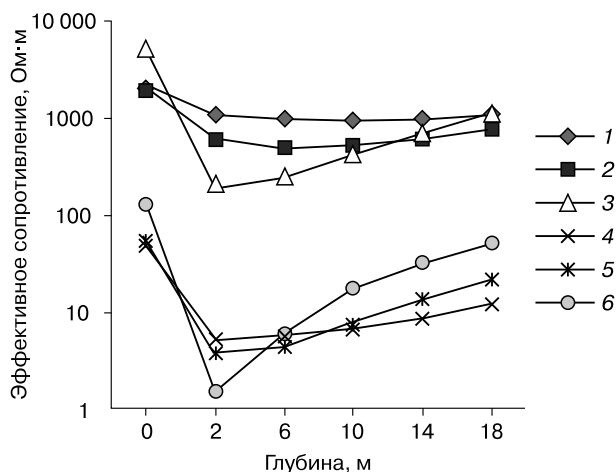


Рис. 1. Результаты численного моделирования зависимости величины эффективных электрического сопротивления (линии 1–3) и электромагнитного сопротивления (линии 4–6) от глубины погружения проводящего слоя талых водоносных дисперсных пород в мерзлую толщу.

Частота электромагнитного поля: 1, 4 – 100 кГц; 2, 5 – 330 кГц; 3, 6 – 1000 кГц.

от вмещающих многолетнемерзлых пород. Однако совместное участие УЭС и ОДП в таком параметре, как электромагнитное сопротивление, позволяет уверенно выделить данные объекты на фоне вмещающих пород.

В качестве примера экспериментального использования ЭМС как измеряемого параметра в естественных условиях приведем результаты работ по профилю, пересекающему надмерзлотный талик в пригороде Якутска (рис. 2). Вскрытый здесь скважиной в конце марта 2010 г. надмерзлотный талик имел мощность 4.2 м и был перекрыт сверху сезоннопромерзающим слоем мощностью 1.85 м. Талик сложен супесями с весовой влажностью до 34 % и мелкозернистыми песками с весовой влажностью до 44 %. Подстилающие талик грунты представлены многолетнемерзлыми мелкозернистыми песками с весовой влажностью, достигающей 52 %, которая снижается до 30 % на глубине 11 м. Электроразведочный профиль, пересекающий талик, был пройден по методике радиоимпедансного профилирования [Ефремов, 2013] в начале апреля следующего 2011 года.

Наличие талика по профилю привело к следующим изменениям измеренных эффективных значений на частоте 549 кГц: уменьшению ЭС в 3 раза, увеличению ОДП в 17 раз и уменьшению ЭМС в 41 раз. Таким образом, искомый объект более контрастно, чем по эффективному сопротивлению, выделяется по эффективной диэлектрической проницаемости, и еще более контрастно – по

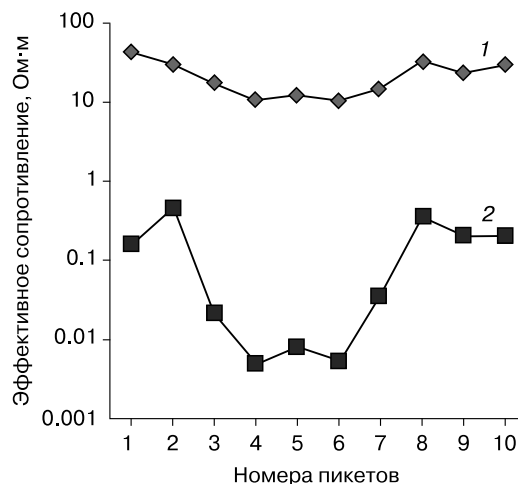


Рис. 2. Изменения эффективных значений электрического (1) и электромагнитного (2) сопротивлений на частоте 549 кГц по профилю через талик.

эффективному электромагнитному сопротивлению. Как видно на рис. 2, изменения эффективного ЭМС по профилю, вызванные наличием талика, на порядок превосходят изменения эффективного электрического сопротивления, полученные там же.

Результаты и вычислительного, и натурного экспериментов показывают, что изменения ЭМС, вызванные наличием в мерзлом грунте водоносного талого слоя, на порядок превосходят изменения ЭС, вызванные тем же фактором.

Более высокая эффективность использования данных измерения ЭМС достигается в результате совместного действия по уменьшению ЭМС, вызванного уменьшением эффективного сопротивления в числителе формулы (6) и увеличению диэлектрической проницаемости в ее знаменателе. Происходит это за счет того, что эффективное электрическое сопротивление уменьшается при прохождении по профилю над талой зоной, а эффективная диэлектрическая проницаемость в этом случае, напротив, увеличивается благодаря повышенному содержанию воды в талых породах.

ВЫВОДЫ

Электромагнитное сопротивление является параметром, учитывающим величину и электрического сопротивления, и диэлектрической проницаемости среды. При одновременном уменьшении электрического сопротивления и увеличении диэлектрической проницаемости электромагнитное сопротивление как отношение данных параметров уменьшается. Подобное уменьшение электромагнитного сопротивления наблюдается в талых водоносных зонах мерзлых дисперсных отложений.

Регистрация эффективного электромагнитного сопротивления как измеряемого и оцениваемого параметра при поиске и картировании талых водоносных зон и горизонтов в мерзлых толщах позволяет многократно усилить величину геофизической аномалии над подобными объектами за счет дополнительного учета повышенных значений их диэлектрической проницаемости наряду с пониженными значениями их электрического сопротивления.

Наиболее значимых результатов использования электромагнитного сопротивления при регистрации геофизических аномалий, вызванных наличием талых водоносных зон и горизонтов в мерзлых массивах и толщах, следует ожидать при проведении измерений в той области частот, для которой токи смещения либо соизмеримы по величине с токами проводимости, либо превышают их. Учитывая электрические свойства мерзлых горных пород, более рациональным для проведения подобных измерений является диапазон от 100 до 1000 кГц.

Литература

Ефремов В.Н. Новые возможности изучения мерзлых грунтов радиоимпедансным зондированием // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Междунар. симп. (Мирный, 3–7 сент. 2011 г.). Якутск, Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2011, с. 469–475.

Efremov, V.N., 2011. New possibilities for investigating frozen ground by radio-impedance soundings, in: Problems of Engineering Geological Studies of Permafrost. Proc. IX Intern. Sympos-

sium (Mirnyi, 3–7 September 2011). Institute of Permafrost, Yakutsk, pp. 469–475. (in Russian)

Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов / В.Н. Ефремов. Якутск, Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2013, 204 с.

Efremov, V.N., 2013. Radio-impedance Soundings of Permafrost. Institute of Permafrost, Yakutsk, 204 pp. (in Russian)

Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны / Ю.Д. Зыков. М., Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.

Zykov, Yu.D., 2007. Geophysical Methods for Permafrost Studies. Moscow University Press, Moscow, 272 pp. (in Russian)

Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А.А. Особенности метода радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником // Учен. записки СПбГУ. Вопр. геофизики. СПб., 2013, № 446, вып. 46, с. 97–112.

Saraev, A.K., Simakov, A.E., Shlykov, A.A., 2013. Controlled-source radio-magnetotelluric soundings. Voprosy Geofiziki 446 (46), 97–112 (St. Petersburg University Transactions).

Свидетельство № 2002610893 РФ об офиц. регистрации программы для ЭВМ. Пакет программ “Импеданс” для решения задач радиоимпедансного зондирования / Ангархаева Л.Х. Заявл. 11.04.2002; зарегистр. 06.06.2002.

Angarkhaeva, L.Kh., 2002. The *Impedance* Program Package for Processing Radio-magnetotelluric Data. Certificate of Official Software Patent Registration, No. 2002610893 Russian Federation, 6 June 2002.

Цыдыпов Ч.Ц. Исследование электрических свойств подстилающей среды / Ч.Ц. Цыдыпов, В.Д. Цыденов, Ю.Б. Башкуев. Новосибирск, Наука, 1979, 176 с.

Tsydyпов, Ch.Ts., Tsydenov, V.D., Bashkuev, Yu.B., 1979. Studies of the Earth's Electrical Properties. Nauka, Novosibirsk, 176 pp. (in Russian)

*Поступила в редакцию
21 декабря 2016 г.*