

Нерадовский Л.Г.
*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
Якутск, Россия*

doi: 10.18411/sr-10-02-2017-3-14
idsp 000001:sr-10-02-2017-3-14

Опыт изучения частотной дисперсии электрического сопротивления мёрзлых грунтов в криолитозоне Центральной Якутии

Аннотация

Представлен результат сравнительного анализа графиков вертикального электрического зондирования на постоянном и переменном токе, полученных в ходе научного сопровождения проектно-изыскательских работ по трассе ж/д «Томмот-Кердём-Нижний Бестях». Установлено, что рост частоты от нуля до 1,125 МГц сопровождается снижением электрического сопротивления мёрзлых грунтов в среднем в три раза. Природа этой частотной дисперсии объясняется появлением в мёрзлых грунтах токов смещения.

Ключевые слова: мёрзлые грунты, слой годовых теплооборотов, методы ВЭЗ и индукции, частотная дисперсия, электросопротивление

Под частотной дисперсией принято понимать зависимость какой-либо физической величины от частоты воздействующего электромагнитного поля. Природа этого явления в мёрзлых грунтах очень сложна и до сих пор слабо изучена в рамках нескольких теоретических моделей, среди которых наибольшее распространение получила модель Максвелла-Вагнера. Что касается формы частотной дисперсии главных характеристик электрофизических свойств мёрзлых грунтов – диэлектрической проницаемости или электрического сопротивления, то её в большинстве случаев описывают, пользуясь формулой Коул-Коула. Среди множества таких работ стоит отметить лишь несколько работ, которые отличаются тщательным анализом результатов отечественных и зарубежных исследований частотной дисперсии и глубоким пониманием её природы, применительно к методам переходного процесса и становления поля в ближней зоне. Это работы, выполненные в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука под руководством академика РАН, д.т.н. М.И. Эпова (Кожевников, 2012) и геофизиков из г. Москвы (Агеев и др., 2006) и Санкт-Петербурга (Крылов, Бобров, 1997).

Перейдём к рассмотрению небольшого по объёму материала статьи, представленного результатами работ методами электрического зондирования на постоянном токе (далее, метод ВЭЗ) и переменном токе в модификации дистанционного индуктивного зондирования с гармоническим ВМД – точечным вертикальным магнитным диполем (далее, метод индукции). Результаты получены в нескольких точках криолитозоны Центральной Якутии на участке пересечения трассой ж/д «Томмот-Кердём-Нижний Бестях» Лено-Алданского нагорья и Лено-Амгинского междуречья с разным инженерно-геологическим строением мёрзлых грунтов.

Опишем методику определений кажущегося электросопротивления (ρ_k) методом ВЭЗ и эффективного электросопротивления (ρ_{ef}) методом индукции вблизи полотна насыпи ж/д на естественной поверхности, ненарушенной строительными работами. Величина ρ_k вычислялась по известной формуле для схемы измерений с симметричной 4-х электродной установкой (Инструкция по электроразведке, 1984). Входящие в формулу значения силы тока в питающей цепи и напряжения (разности потенциалов) в приёмной цепи измерялось прибором АЭ-72. В ходе измерений электроды приёмной цепи оставались неподвижными при расстоянии между ними 0,2 м, а токовые электроды удалялись в противоположные стороны на расстояние (полуразнос $AB/2$) 0,3-0,5-0,9-1,6-3,0-5,0-9,0-15,0-25,0 м.

Такая схема принята в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Она обеспечивает изучение мёрзлых грунтов методом ВЭЗ в слое годовых теплооборотов до глубины бурения изыскательских скважин. В частности, по трассе ж/д до глубины 10 м.

Результаты вычислений оформлялись в виде графиков ρ_k , построенных в зависимости от значений $AB/2$. Результат зондирования относился к центру 4-х электродной установки.

В методе индукции для измерения вертикальной (N_z) и горизонтальной (N_r) составляющей напряжённости поля ВМД применялась аппаратура «СЭМЗ» (Журавлёв и др., 1991). Из комплекта 4-х кольцевых приёмно-передающих антенн с внешним диаметром 0,32 м были выбраны антенны, работающие на частоте 1,125 МГц, которая отличается наибольшей чувствительностью к изменению мёрзлых грунтов в слое годовых теплооборотов.

Работы методом индукции выполнялись по методике, разработанной для решения задач Министерства цветной металлургии (Вешев и др., 1978) и до нынешнего времени сохранившей главные положения в усовершенствованной методике (Аппаратура ..., 2010). В соответствие с этими методиками на выбранном пикете трассы ж/д передающая антенна (излучающий диполь) устанавливалась на геодезической треноге в горизонтальном положении и оставалась в процессе измерений неподвижной. Приёмная антенна (измерительный диполь) удалялась от передающей антенны с шагом 5 м на расстояние 5-50 м. При этом в горизонтальном положении антенны измерялись значения N_z , а в вертикальном положении – значения N_r .

Остальные параметры эллипса поляризации поля ВМД остались, к сожалению, не измеренными. Почему? Потому, что измерение этих параметров есть длительный трудоёмкий процесс, который мог бы нарушить договорные сроки быстрого выполнения экспедиционных работ. Выполнение договорных обязательств с заказчиком этих работ (Правительством Республики Саха (Якутия)) обернулось серьёзным недостатком, а именно, при вычислении ρ_{ref} по отношению H_z/H_r с использованием программы А.Е. Каминского «Zond1VMD» оказалось невозможным учесть влияние диэлектрической проницаемости. Понятно, что в этом случае вычисленные значения ρ_{ref} не могут быть точными, но с этим приходится мириться, надеясь и в таком не вполне качественном фактическом материале найти хотя и приблизительные, но достоверные решения вопросов о частотной дисперсии.

Результат высокочастотных зондирований методом индукции, в соответствии с методическими указаниями А.В. Вешева и др. (1978), относился к точке стояния передающей антенны и оформлялся в виде графиков ρ_{ref} , построенных в зависимости от расстояния (разноса АО) между приёмно-передающими антеннами.

Анализ комплексного волнового числа и параметра приведённого расстояния показал, что при измерении H_z и H_r на частоте 1,125 МГц и максимальном расстоянии от передающей антенны 50 м, глубина изучения мёрзлых грунтов методом индукции составляет не менее 10 м.

Таким образом, результаты электрических зондирований на постоянном и переменном токе согласуются между собой по глубине изучения мёрзлых грунтов. Однако такого согласия нет в схеме геометрии измерений, что объясняется их разной целевой направленностью. Измерения в методе индукции, являясь основными, выполнялись по программе научного сопровождения изыскательских работ, прежде всего, с целью изучения влияния температурного фактора на процесс затухания поля ВМД в слое годовых теплооборотов. Измерения же, в методе ВЭЗ носили инициативный характер, имея цель получить хоть какой-то (по объёму) фактический материал для изучения частотной дисперсии электросопротивления.

Разные варианты сопоставления графиков ρ_k и ρ_{ref} показали, что совмещение их локальных аномальных особенностей (минимальных и максимальных значений) происходит в том случае, если значения расстояний между приёмно-передающими антеннами в методе индукции (разнос АО) уменьшить в два раза, т.е. привести их в масштаб расстояний метода ВЭЗ (полуразноса $AB/2$).

Возникает вопрос: почему измерения в методе индукции не сделаны при АО менее 5 м? Во-первых, при таких расстояниях измерения начинают выполняться в ближней волновой зоне, где H_z не реагирует на изменение характеристик электрофизических свойств мёрзлых грунтов, что делает бессмысленным вычисление ρ_k по отношению H_z/H_r . Во-вторых, уровень поля ВМД в ближней волновой зоне становится аномально высоким (более 10000

мкВ), делая технически невозможным измерение микровольтметром со стрелочной индикацией значений Hz и Нг. В, третьих, при расстояниях меньше 5 м всё более и более нарушается условие выполнения точности диполей, т.е. применяемые кольцевые антенны, строго говоря, уже нельзя теоретически рассматривать, как точки, что влечёт за собой усложнение математических расчётов поля ВМД с учётом размера и формы антенн.

Ради наглядности покажем результат проявления частотной дисперсии в разных инженерно-геологических условиях на примере двух типичных графиков электрических зондирований (рис. 1).

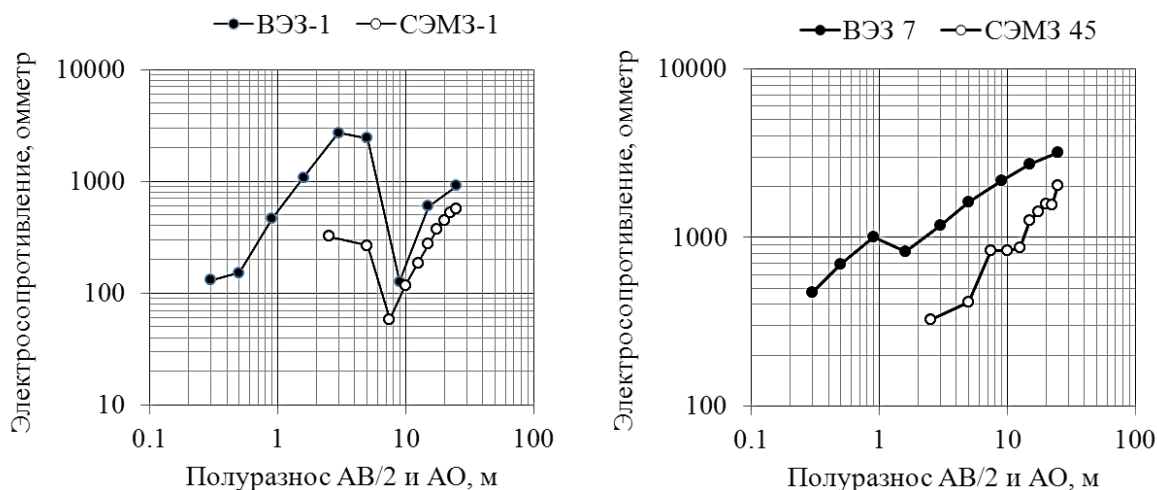


Рис. 1. Результаты электрических зондирований по трассе ж/д на пикете №3818 (графики слева), где на дневную поверхность выходят мёрзлые грунты в виде выветренных осадочных пород Алданского нагорья и на пикете №7850 (графики справа), где мёрзлые грунты Лено-Амгинского междуречья представлены толщей золото-аллювиальных песков Бестяхской террасы долины р. Лены

Графики ркс названием «ВЭЗ» означают номера точек зондирований методом ВЭЗ на постоянном токе, т.е. с нулевой частотой. Графики refc названием «СЭМЗ» означают номера точек зондирований методом индукции на переменном токе с частотой 1,125 МГц. Как видим, рост частоты в 1,125 миллион раз в разных литотипах мёрзлых грунтов и соответствующих им геоэлектрических разрезах приводит к сравнительно незначительному снижению $\rho_{кв}$ слое годовых теплооборотов. Однако оно не везде одинаково.

В рассматриваемом случае, снижение $\rho_{кв}$ сами значения этой характеристики больше в мёрзлых песках Лено-Амгинского междуречья геоэлектрическим разрезом типа «А», нежели в глинистых грунтах Алданского нагорья с геоэлектрическим разрезом типа «КН». Аналогичная особенность наблюдается на всех остальных, не представленных в статье, графиках $\rho_{кв}$ и ρ_{ref} .

Таким образом, простой сравнительный анализ особенностей формы графиков зондирований на постоянном и переменном токе высокой частоты (1,125 МГц) даёт основание сделать важный вывод. Суть его в том, что частотная дисперсия, действующая за счёт образования индукционных токов смещения (вихревых в системе замкнутых контуров плёнок, прослоек и каналов

незамёрзшей связанной воды) и поляризационных (на контактах минеральных зёрен, льда и незамёрзшей воды), сильнее в мёрзлых песках. Но не во всех песках, а в их маловлажных разностях с показателем суммарной влажности не выше 10-15 % и высокой температурой (выше минус 0,3-0,5 оС), поры которых не все заполнены льдом. В силу этого малейшее изменение в поровом пространстве минерального скелета песков соотношения количества льда, газа (воздуха) и мизерного (1-2 %) остатка незамёрзшей воды, приводит к непредсказуемому изменению их структуры и свойств. Соответственно делаются непредсказуемыми все физико-химические процессы, протекающие в мёрзлых песках, делая это внешне простое геологическое образование сложнейшим природным объектом для изучения методами геоэлектрики.

Изучение меры частотной дисперсии сделано по значениям отношения ρ_k/ρ_{ef} . Они вычислены по всему фактическому материалу, состоящему из пяти точек зондирования методами ВЭЗ и индукции. Этот материал, хотя и мал, но репрезентативно представляет геоэлектрический разрез ненарушенного строительными работами бокового примыкания трассы ж/д на ключевых участках местности с типичными ландшафтными, геоморфологическими, инженерно-геологическими и геокриологическими условиями теплообмена мёрзлых грунтов с приземным атмосферным воздухом.

При вычислении ρ_k/ρ_{ef} данные метода ВЭЗ, как более редкие по числу определений, приводились к данным метода индукции (шкале значений $AO/2$) путём линейной интерполяции значений ρ_k между значениями $AB/2$.

Результат описательного статистического анализа фактического материала электрических зондирования представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Статистика отношения ρ_k/ρ_{ef} в мёрзлых грунтах Центральной Якутии

Статистика	Отношение
Среднее арифметическое	2,97
Стандартная ошибка среднего	0,3
Медианное среднее	2,33
Модальное (вероятностное) среднее	нет данных
Стандартное отклонение	1,77
Дисперсия выборки	3,13
Минимум	1,38
Максимум	9,2
Количество определений	35
Уровень доверительной вероятности (95 %)	0,61

Из табл. 1 следует, что частные значения ρ_k/ρ_{ef} с округлением до десятого знака изменяются от 1,4 до 9,2 при среднем арифметическом значении 3,0, которое с вероятностью 95 % распределено в диапазоне 2,4-3,6. По данным М.Л. Владова и А.В. Старовойтова отношение ρ_k/ρ_{ef} для горных пород разного генезиса и состава изменяется на частоте 75 МГц от 2,0 до 4,0 и в среднем равно трём (с. 19, 2004). Следовательно, в сравнении с данными независимых определений ρ_k/ρ_{ef} других исследователей, есть веское основание не только считать объективным обнаружение криолитозоны Центральной Якутии

частотной дисперсии электросопротивления мёрзлых грунтов в слое годовых теплооборотов, но и рассматривать это явление частью общей петрофизической закономерности. В чём же, её суть? В том, что мера частотной дисперсии, выраженная в снижении ρ_k , остаётся практически неизменной в разных геологических образованиях в области высоких частот между 1,125 и 75 МГц, чего, как известно, не скажешь для частот меньших 10 кГц. В этом выводе без преувеличения заключена научная значимость результатов опытных работ, выполненных методами ВЭЗ и индукции по трассе ж/д. Более того, геологостатистический анализ фактического материала методов ВЭЗ и индукции приводит к обнаружению иных не менее интересных эмпирических закономерностей, касающихся частотной дисперсии.

Рассмотрим две из них, связывающие на частоте 1,125 МГц средние значения отношения ρ_k/ρ_{ref} и значений ρ_k и ρ_{ref} со значениями полуразноса $AB/2$ и $AO/2$ (рис. 2). Попутно отметим, что в исходном фактическом материале между этими характеристиками корреляционной связи нет. Связь появляется только при обобщении исходного фактического материала с подавлением действия разных случайных факторов.

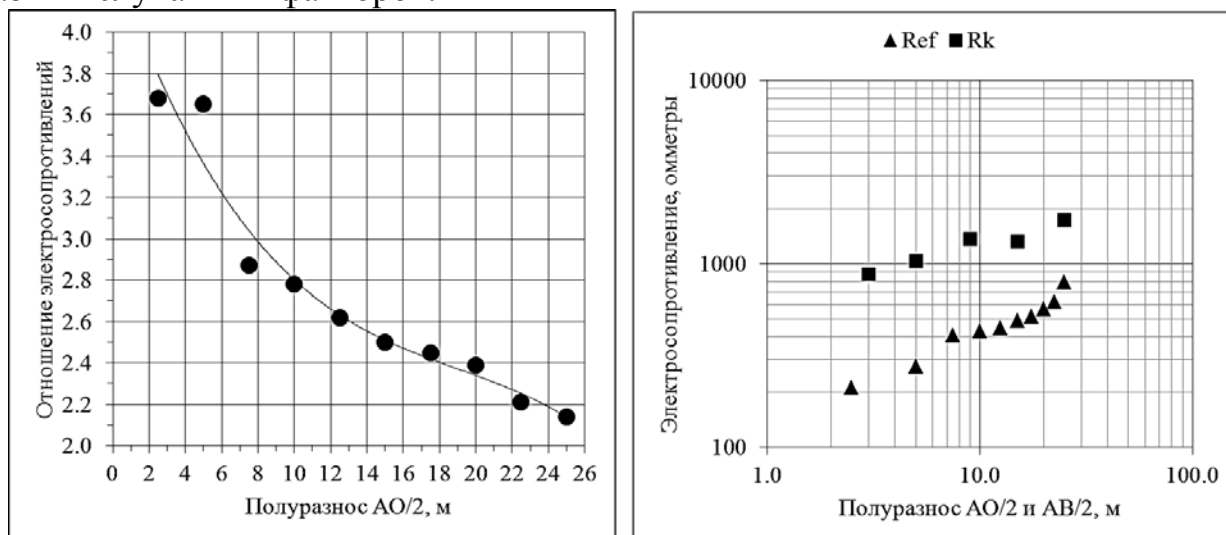


Рис. 2. Графики обобщённой зависимости средних значений отношения ρ_k/ρ_{ref} (график слева) и значений ρ_{ref} и ρ_k (график справа) от полуразноса $AO/2$ метода индукции и полуразноса $AB/2$ метода ВЭЗ

Совместный анализ графика отношения ρ_k/ρ_{ref} графиками электрических зондирований на постоянном и переменном токе на рис. 2 удостоверяет в том, что увеличение полуразносов до 25 м, что соответствует глубине зондирования слоя годовых теплооборотов до 10 м, приводит к более быстрому росту ρ_{ref} по отношению к ρ_k . В результате наблюдается эффект снижения влияния частотной дисперсии в обобщённом геоэлектрическом разрезе типа «А» с тенденцией роста ρ_{ref} и ρ_k по глубине.

Попробуем объяснить этот эффект. Сделаем это по данным прошлых проектно-изыскательских работ, полученных до начала строительства ж/д. По этим данным верхняя глинистая часть инженерно-геологического разреза, сложенная супесями и суглинками разного генезиса, постепенно замещается

другими грунтами. На Лено-Амгинском междуречье озёрно-аллювиальными песками средней и крупной зернистости, а на Алданском нагорье – валунами, гравием и дресвой осадочных пород с незначительным количеством глинистого материала. В такой закономерности смены литологии и гранулометрического состава грунтов находит своё проявление результат совокупной деятельности процессов осадконакопления, физического выветривания и криогенного метаморфизма грунтов с разной степенью литификации. Среди всех отмеченных геологических факторов главным является фактор фациально-литологический, находящийся в прямой связи с возрастом и генезисом мёрзлых грунтов. Именно он контролирует своеобразие, многоликость и интенсивность физико-химических процессов, протекающих в мёрзлых грунтах при их возбуждении электрическими полями постоянного и переменного тока. Для последних на первый план выступает показатель площади удельной поверхности на границах минерального скелета с поровым, сегрегационным льдом и разными структурными модификациями незамёрзшей воды в зависимости от температуры нагрева или охлаждения мёрзлых грунтов. По данным А.Д. Фролова (2005) и др. исследователей на этих границах в пределах двойных электрических слоёв с тонким слоем молекул адсорбированной воды (1-2 слоя) возникает, как поляризация полярных молекул воды, так и поверхностная проводимость, которая быстро растёт с увеличением площади границ раздела фазового состава мёрзлых грунтов. У мёрзлых грунтов глинистого состава она на много выше, чем у грунтов песчаного состава. Вот и получается, что при их смене по глубине инженерно-геологического разреза поверхностная проводимость на общем фоне объёмной омической проводимости снижается, приводя к росту значений ρ_{ef} и уменьшению отношения ρ_k/ρ_{ef} . Этот эффект усиливается за счёт уменьшения объёмной влажности, температуры и количества незамёрзшей воды, достигая максимума в верхней глинистой части слоя годовых теплооборотов. Именно здесь до глубины 3-5 м ($AO/2=(7,5\div 12,5)$ м, см. рис. 2)) происходит интенсивный спад температуры при переходе грунтов из талого состояния в поверхностном сезонноталом слое в мёрзлое многолетнемёрзлое состояние. Заметим, что на период проведения работ методами ВЭЗ и индукции мощность сезонноталого слоя изменялась от 0,5 до 3,0 м.

В завершение зададимся вопросом: есть ли в полученных результатах практическая значимость? Да, есть и просматривается в тех случаях, а они нередки, когда применение метода ВЭЗ встречает организационные трудности, экономически невыгодно или технически невозможно на участках каменных россыпей (курумов) или в зимне-весенний период времени в полностью промёрзших с дневной поверхности грунтах. В таких случаях заменяя метод ВЭЗ методом индукции нужно обязательно учитывать действие частотной дисперсии, чтобы решать практически важную задачу количественной оценки по удельному электрическому сопротивлению на постоянном токе коррозионной активности мёрзлых грунтов, слагающих основания трасс линейных

инженерных сооружений и площадок контуров заземлений. Однако возникает другой вопрос: насколько точно может быть решена эта задача?

Чтобы ответить на этот вопрос сделаем пробный расчёт на каком-нибудь пикете трассы ж/д, например, пикете №7850. Для этого по значениям полуразноса АО/2 метода индукции равным или близким к значениям полуразноса АВ/2 метода ВЭЗ вычислялись значения ρ_k/ρ_{ef} по нижеприведённому уравнению полинома третьего порядка с коэффициентом множественной детерминации $R^2=0,9511$:

$$\rho_k / \rho_{ef} = -0,0002 * d^3 + 0,0114 * d^2 - 0,2483 * d^1 + 4,3457,$$

где, d – расстояние (полуразнос) АО/2 в метрах.

Далее, по найденному отношению ρ_k/ρ_{ef} , зная полевые значения ρ_{ef} , вычислим прогнозные значения ρ_k и сравним с полевыми значениями ρ_{k1} . По их разнице вычислим абсолютную и относительную ошибку прогноза. Результат вычислений представлен в табл. 2.

Таблица 2.

Таблица расчёта ошибки прогноза значений ρ_k

Метод индукции		Отношение	Метод ВЭЗ		Ошибка прогноза	
АО/2	ρ_{ef}	ρ_k/ρ_{ef}	ρ_{k1}	ρ_{k2}	абс.	отн.
м	омметр	отн.ед	омметр		омметр	%
2,5	325	3,79	1175	1233	-58	-4.8
5,0	416	3,37	1613	1400	213	14.1
10,0	832	2,81	2178	2333	-155	-6.9
15,0	1266	2,52	2722	3185	-463	-15.7
22,5	1561	2,26	3191	3526	-335	-10.0

Результат прогноза, хотя и получен в одной точке трассы ж/д, тем не менее, обнадёживает в реальной возможности количественной оценки коррозионной активности мёрзлых грунтов по данным метода индукции с учётом частотной дисперсии. Точность решения этой задачи по прогнозным значениям ρ_k изменяется от 4,8 до 15,7 % и в среднем равна 10 %.

Итак, предложенный подход прогнозирования графиков ρ_k с учётом частотной дисперсии позволяет при необходимости заменять метод ВЭЗ методом индукции при изучении электросопротивления мёрзлых грунтов в пределах Центральной Якутии.

Принимая во внимание экономическую эффективность решения этой задачи в современных условиях быстрого проведения проектно-исследовательских работ, планируется расширить затронутую тематику научно-прикладных исследований. Причём, не только в южных, западных и северо-восточных районах криолитозоны Якутии, но и за её пределами в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока с привлечением заинтересованных научных учреждений и производственных организаций.

Литература

1. Агеев В.В., Каринский С.Д., Светов Б.С. Становление электромагнитного поля в поляризующихся средах и определение параметров Cole-Cole // Геофизика, 2006, №5, с.40-45.
2. Вешев А.В., Любцева Е.Ф., Леончиков В.М., Алексеев В.М. Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем. – М.: Изд-во Министерства цветной металлургии, 1978. – с. 43.
3. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
4. Журавлёв В.В., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М. Комплекс СЭМЗ. Методическое пособие. – Красноярск: Изд-во НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. – 60 с.
5. Инструкция по электроразведке. – Л.: Недра, 1984. – 534 с.
6. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика, 2012, т.53, №4, с. 527-540.
7. Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Частотная дисперсия электрических свойств мерзлых пород при электромагнитных зондированиях с вертикальным магнитным диполем // Физика Земли, 1997, №3, с. 64-70.
8. Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Применение электромагнитных зондирований для исследования частотной дисперсии электрических свойств мёрзлых пород // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 59-68.
9. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мёрзлых пород и льдов. Второе доп. и испр. изд. – Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. – 607 с.