

## — ГЕОКРИОЛОГИЯ —

DOI

УДК 551.345:550.837.7

*В.Н. Ефремов*

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ  
НА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГРУНТОВ  
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ**

*Аннотация.* Показаны особенности сезонных периодических изменений эффективного электрического сопротивления массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов по результатам натуральных измерений поверхностного импеданса в диапазоне частот 100...1000 кГц. Эксперименты проводились на стационаре ИМЗ СО РАН в районе Якутска в 2006-2012 годах. Приведено соответствие характерных изменений температуры грунтов и их эффективного сопротивления определенным периодам времени. Показано соответствие величины эффективного сопротивления массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов, степени их промерзания. Приведены результаты анализа экспериментальных данных наблюдения изменений геоэлектрических параметров под воздействием климатических факторов. Воздействие климатических факторов оценивалось по температуре приземного воздуха и грунтов, толщине снегового покрова и количеству дождевых осадков в определенные периоды времени. Показано, что сезонные изменения эффективного сопротивления своими асимптотическими значениями отражают, соответственно, четыре степени промерженности грунтов: зимнюю, весеннюю, летнюю и осеннюю. Уровни эффективного сопротивления грунтов, соответствующие выделенным степеням их промерженности весной, летом и осенью, отличаются примерно в два раза. Величина эффективного электрического сопротивления массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов зависит от степени промерженности грунтов массива за последний, до его измерения, период стадии охлаждения либо растепления. Сезонные изменения эффективного сопротивления находятся в пределах одного порядка, а для электромагнитного и поперечного сопротивлений они достигают двух порядков величины. Степень промерженности массива многолетнемерзлых грунтов зависит не только от солнечной радиации, температуры приземного воздуха, но и от толщины снежного покрова на стадии охлаждения и от обильности дождевых осадков на стадии растепления. Для мониторинга состояния грунтов слоя годовых колебаний температуры, более приемлемыми параметрами являются его поперечное сопротивление или продольная проводимость, полученные путем интерпретации данных радиоимпедансного или РМТ зондирования. Радиоимпедансное зондирование и РМТ-зондирование наиболее рациональны для мониторинга изменения состояния многолетнемерзлых грунтов под воздействием изменений климата.

*Ключевые слова:* климатические факторы, влияние, мерзлые дисперсные грунты, слой годовых колебаний температуры, эффективное сопротивление, электромагнитное сопротивление, поперечное сопротивление, продольная проводимость.

*V.N. Efremov*

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

**Influence of climatic changes on geoelectrical parameters of grounds  
in Central Yakutia**

*Abstract.* The features of seasonal periodic changes of apparent resistivity of the permafrost soil mass were examined basing on field measurements of the surface impedance in the 100-1000 kHz frequency range. The

*ЕФРЕМОВ Владимир Николаевич* – д.т.н, в.н.с., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.  
E-mail: [vne@mpi.ysn.ru](mailto:vne@mpi.ysn.ru)

*EFREMOV Vladimir Nikolaevich* – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS.

E-mail: [vne@mpi.ysn.ru](mailto:vne@mpi.ysn.ru)

experiments were done at the permanent study plot of the Melnikov Permafrost Institute, SB RAS in the area of the city of Yakutsk in 2006-2012. The conformity of characteristic changes of soil temperature and apparent resistivity to the certain periods of time is given. The apparent resistivity of the permafrost soil mass is shown to conform to the degree of soil freezing. The results of the analysis of experimental data of supervision of changes of geoelectrical parameters under influence of the climatic factors are given. The influence of the climatic factors was estimated by the temperature of the air and soils, thickness of snow cover and quantity of rain deposits in the certain periods of time. It is shown that the seasonal changes of the apparent resistivity by asymptotical meanings reflect, accordingly, four degrees of freezing grounds: winter, spring, summer, and autumn. The levels of apparent resistivity of grounds, appropriate to their established degrees of freezing in the spring, summer and autumn, differ approximately twice. The value of apparent resistivity of the frozen soil mass depends on a degree of ground freezing during the pre-measurement period of cooling or thawing. The seasonal changes of apparent resistivity were within the limits of one order, and for electromagnetic and cross resistance they achieved two orders of the value. The degree of frozen ground freezing depends not only on the solar radiation and the temperature of air, but also on the thickness of the snow cover at a stage of cooling and the amount of rain at a thawing stage. For monitoring the active layer, more acceptable parameters are its cross resistivity or longitudinal conductivity received by interpretation of the radioimpedance or RMT soundings data.

*Keywords:* climatic factors, influence, frozen grounds, active layer, apparent resistivity, electromagnetic resistivity, cross resistivity, longitudinal conductivity.

### **Введение**

В удобном, для учета влияния климатических изменений, упрощенном виде представим мерзлую толщу в Центральной Якутии, состоящей из залегающих последовательно от поверхности в глубину трех основных горизонтов: сезонно-талый слой (СТС), слой годовых колебаний температуры многолетнемерзлых пород (СГКТ) и стационарная мерзлая толща (СМТ) [1].

Влияние климатических изменений рассмотрим по измеренным значениям эффективного электрического и электромагнитного сопротивлений грунтов на средних радиочастотах, а также по значениям продольной проводимости или поперечного сопротивлению СГКТ, полученным в результате интерпретации данных радиоимпедансного зондирования [2, 3]. Для эффективных геоэлектрических параметров принимаем, что при мониторинговых измерениях, сезонные изменения глубинности полученных данных не внесут значительных погрешностей, так как в СМТ удельное электрическое сопротивление (УЭС) и диэлектрическая проницаемость сохраняют стабильность своих значений в используемом диапазоне частот.

Значимость влияния климатических факторов оценим по характеристикам изменения геоэлектрических параметров во временных рядах. Рассматриваются сезонные, годовые и межгодовые изменения на стационарном объекте.

### **Исходные положения**

Исходим из того, что состояние грунтов криолитозоны, по очевидным проявлениям, качественно характеризуется как мерзлое, пластично-мерзлое и талое. Количественно состояние грунтов оценивается рядом взаимосвязанных и взаимообусловленных показателей физических свойств и их изменением [4].

Одними из таких показателей являются электропроводность [5] или электрическое сопротивление горных пород току, индуцируемому электромагнитным полем, и их естественная влажность. Для многолетнемерзлых горных пород, показатель влажности дополняется показателем количества влаги, перешедшей, под воздействием отрицательных температур в твердую фазу, то есть объемной льдистостью [6]. В этом случае, электрическое сопротивление, как показатель прохождения тока проводимости, следует дополнить диэлектрической проницаемостью – показателем прохождения тока смещения. Совместное их рассмотрение реализуется в таком показателе общего тока, как электромагнитное сопротивление [7].

Влияние климатических изменений на геоэлектрические параметры грунтов обусловлено их воздействием на верхние горизонты мерзлой толщи, т.е. на СТС и СГКТ, посредством таких факторов, как солнечная радиация, температура приземного воздуха и количество осадков, в комплексе создающих некоторый температурно-влажностный режим. В годовом цикле этого режима выделяются следующие стадии изменения температуры и влажности грунтов верхних горизонтов мерзлой толщи (рис. 1а): стадия растепления, когда происходит таяние, интенсив-

ное влагонасыщение и испарение влаги грунтов СТС, повышение температуры и понижение объемной льдистости и мощности грунтов СГКТ; стадия охлаждения, когда происходит понижение температуры, влагонасыщение с пониженным испарением и последующее промерзание грунтов СТС, понижение температуры, повышение объемной льдистости и мощности грунтов СГКТ; для грунтов СТС выделяется и короткая стадия стабилизации охлаждения, когда изменения их температуры и объемной льдистости не столь значительны, а уровень значений соответствует их максимальной промороженности. Климатические изменения влияют на интенсивность процессов, связанных с растеплением и охлаждением грунтов, и на длительность самих стадий температурно-влажностного режима.

Результатом воздействия климатических изменений становятся: изменение мощности, влажности и степени промерзания СТС; изменение мощности и объемной льдистости СГКТ [8].

Изменение состояния многолетнемерзлых дисперсных грунтов под воздействием климата определяет степень промерзания грунтов на стадиях их охлаждения и растепления. Для Центральной Якутии период охлаждения приходится на август-февраль [9] для грунтов, близких к дневной поверхности, а для грунтов, находящихся на глубине более 2 м продлевается до мая. Растепление грунтов для данного региона происходит в период времени, начинающийся в марте-мае и завершающийся в августе-декабре, в зависимости от глубины их залегания. Степень промороженности грунтов определяют их объемная льдистость и количество незамерзшей воды.

#### **Методика и результаты экспериментальных исследований**

С 2005 г. по настоящее время на территории, занимаемой стационаром «Туймаада» ИМЗ СО РАН нами проводятся мониторинговые исследования с целью изучить влияние степени промерзания массивов многолетнемерзлых дисперсных грунтов в пределах слоя годовых колебаний температуры на их электрические характеристики. Цель – исследование возможности оценки фактической и прогнозируемой степени промерзания многолетнемерзлых дисперсных грунтов по данным геофизических наблюдений с поверхности грунта с учетом данных о температуре приземного воздуха.

В период с 2008 по 2010 годы нами был проведен совместный мониторинг сезонных изменений температуры песчаных грунтов и их эффективного электрического сопротивления на территории стационара «Туймаада» ИМЗ СО РАН [7]. Температура грунтов измерялась мультиметром В7-35, с помощью составленной из термисторов косы, погруженной в скважину на глубину 4 м. Эффективное электрическое сопротивление определялось на том же пункте по измерениям поверхностного импеданса на частотах 171, 334, 549 и 864 кГц, выполненным с применением импедансметра ИПИ-1000 [10].

Результаты проведенного мониторинга сезонных изменений температуры грунтов и их эффективного электрического сопротивления (рис. 1) показали следующее:

- сезонные колебания температуры грунтов и их эффективного сопротивления в течение года образуют периодическую форму, имеющую два полупериода перемены значений, названных как период охлаждения грунтов, сопровождаемый нарастанием сопротивления, и период растепления грунтов, сопровождаемый его понижением;
- периоды растепления и охлаждения грунтов соответствуют одноименным стадиям их температурно-влажностного режима;
- границы периодов охлаждения и растепления грунтов зависят от глубины их залегания, степени и длительности воздействия элементов климата;
- для температуры грунтов сезонно-талого слоя характерен более длительный семимесячный период охлаждения (август-февраль следующего года), по сравнению с пятимесячным периодом растепления (март-июль);
- для температуры многолетнемерзлых грунтов, характерны сдвиг по шкале времен на следующий год и сокращение периода охлаждения до трех месяцев (январь-март), сокращение периода явного четырехмесячного растепления (апрель-июль) и образование периода неявного пятимесячного растепления (август-декабрь);
- эффективное сопротивление многолетнемерзлых грунтов характеризуется повышением величины значений с понижением частоты колебаний электромагнитного поля (погружением его вглубь массива);

- эффективное сопротивление многолетнемерзлых грунтов характеризуется интенсивным повышением значений, вызванным промерзанием, в первые три месяца периода охлаждения (октябрь-декабрь), некоторой стабилизацией значений в январе – феврале и некоторым повышением значений в последующие два месяца (март-апрель);
- понижение значений эффективного сопротивления грунтов, вызванное протаиванием грунтов сезонно-талого слоя и повышением температуры многолетнемерзлых грунтов, происходит весьма интенсивно в первые два месяца периода растепления (май-июнь) и незначительно в последующие три месяца (июль-август);
- незначительность повышения эффективного сопротивления грунтов в марте – апреле объясняется продолжающимся понижением температуры многолетнемерзлых грунтов, сопровождающимся одновременным воздействием повышения температуры грунтов поверхности сезонно-талого слоя;
- незначительность понижения эффективного сопротивления грунтов в июле-августе объясняется снижением теплопроводности сезонно-талого слоя в его талом состоянии.

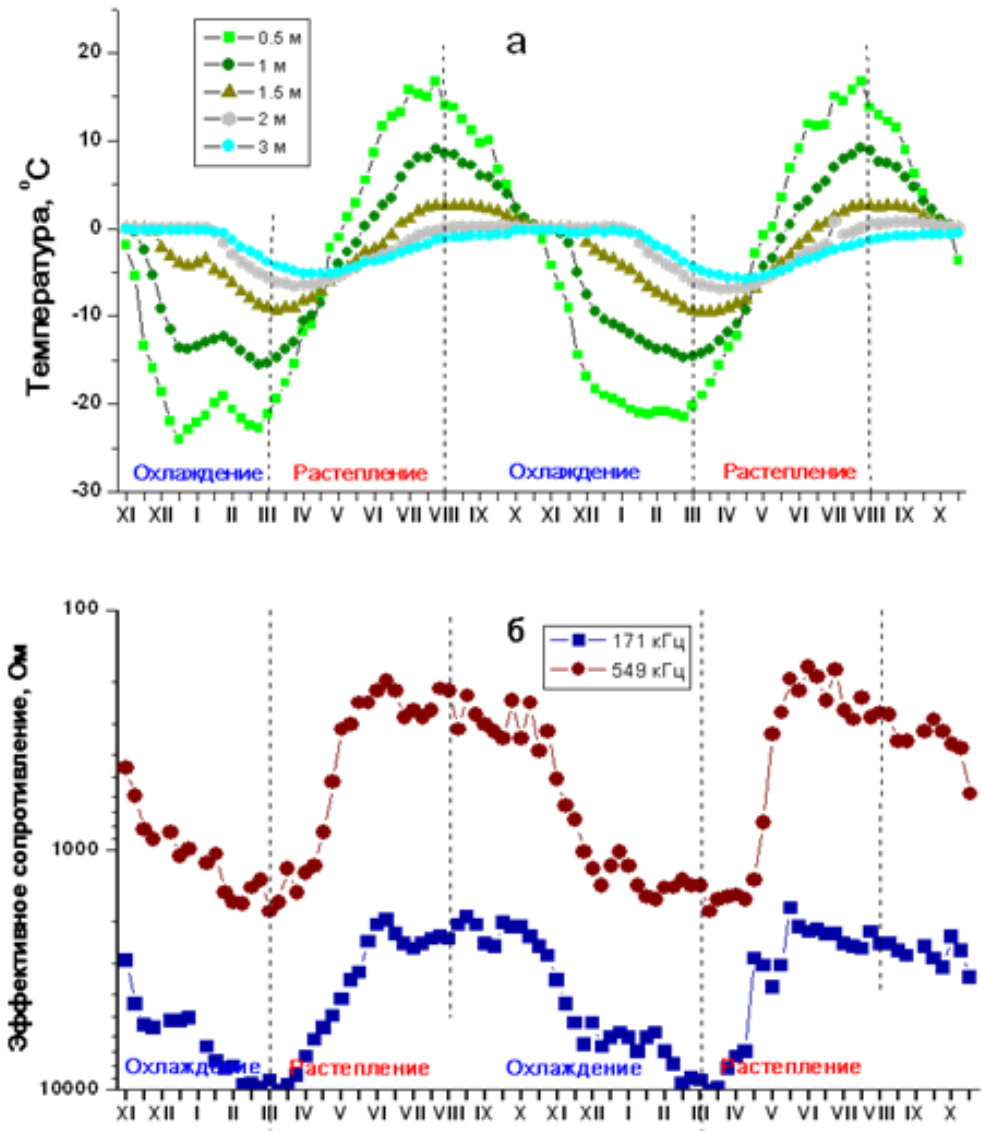


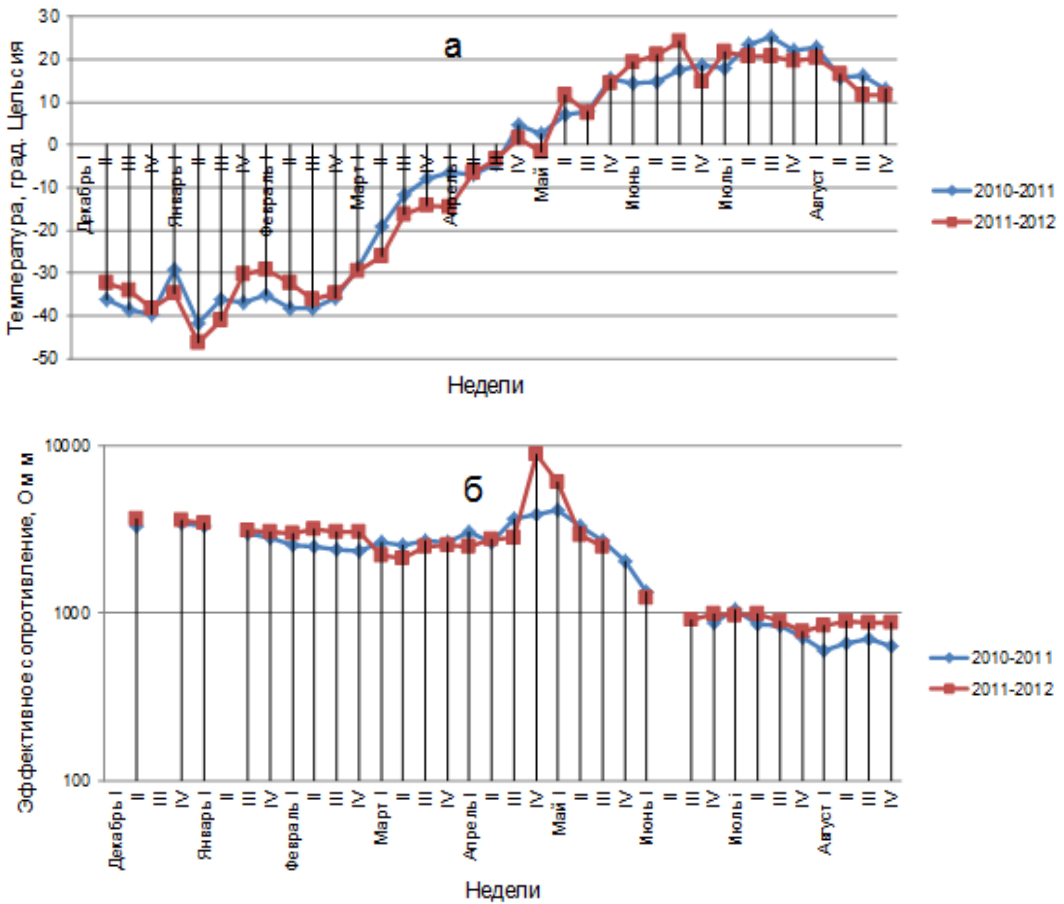
Рис. 1. Сезонные изменения температуры грунтов на различной глубине (а) и эффективного сопротивления для двух частот (б) на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН (в районе г. Якутска)

На полученных графиках изменения температуры (рис. 1а) выберем узловые точки, в которых сходятся температурные кривые для различных глубин. В недели, на которые приходятся эти точки, значения температуры на различных глубинах будут примерно одинаковы. Если теперь сопоставить соответствующие этим неделям значения эффективного сопротивления и температуры, то увидим, что понижению температуры грунтов от 0 до  $-5^{\circ}\text{C}$ , с октября по апрель следующего года, соответствует увеличение эффективного сопротивления в 2,7 раза для того же периода. Повышению температуры грунтов с апреля по октябрь от  $-5$  до  $0^{\circ}\text{C}$  соответствует уменьшение эффективного сопротивления за тот же период так же в 2,7 раза. Полученная здесь температурная зависимость эффективного электрического сопротивления на частотах 549 и 864 кГц [9] показала, что понижение температуры от  $-4,5$  до  $-8^{\circ}\text{C}$  привело к увеличению эффективного сопротивления более чем в 4 раза.

Отсюда, со всей очевидностью следует, что по временным рядам сезонных, годовых и межгодовых изменений эффективного электрического сопротивления в диапазоне 100-1000 кГц прослеживается влияние на них климатических факторов.

Изменения температуры грунтов определяются, в основном, температурой приземного воздуха, поэтому, последняя и была использована нами в сравнительной оценке степени промерзания массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов и величины их эффективного электрического сопротивления по результатам мониторинга.

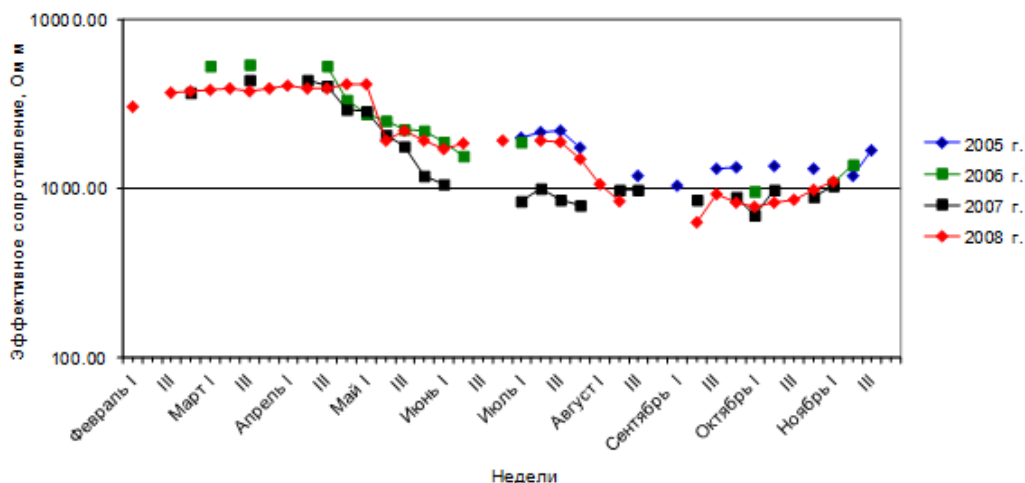
Результаты мониторинга сезонных изменений эффективного электрического сопротивления песчаных грунтов, полученные нами на участке территории, прилегающей к стационару «Туймаада» ИМЗ СО РАН, находящемся в лесной зоне, показали следующее (рис. 2):



**Рис. 2.** Сезонные изменения средних за неделю температур воздуха (а) и еженедельно измеренных значений эффективного сопротивления грунтов на частоте 864 кГц (б) на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН в 2010-2012 годах

- в зимние месяцы (декабрь-февраль) эффективное сопротивление находится примерно на одном уровне, соответствуя зимней степени промороженности грунтов;
- в весенние месяцы (март-апрель), когда происходит значительное, почти линейное, повышение температуры воздуха до 0°C, уровень эффективного сопротивления несколько снижается, отражая более низкую, весеннюю степень промороженности грунтов;
- в конце апреля, с приближением отрицательных температур воздуха к 0°C, происходит значительный подъем величины эффективного сопротивления, объясняемый продолжением повышения степени промороженности многолетнемерзлых грунтов при еще неоттаявшей поверхности сезонно-талого слоя;
- с мая по июнь происходит резкое понижение эффективного сопротивления, отражающее интенсивное протаивание сезонно-талого слоя;
- в июле и в августе асимптотические уровни величины эффективного сопротивления отражают две степени промороженности грунтов: летнюю и осеннюю;
- таким образом, сезонные изменения эффективного сопротивления отражают четыре степени промороженности грунтов: зимнюю, весеннюю, летнюю и осеннюю.

Степень промерзания грунтов, отражаемая положением уровня величины эффективного сопротивления грунтов, зависит от его уровня в предыдущий период охлаждения и его длительности. Высоким уровням эффективного сопротивления в апреле 2006 и 2008 гг. соответствует и довольно высокий июньский уровень в эти годы. Сравнительно низкому же уровню эффективного сопротивления в апреле 2007 г., вызванному меньшей длительностью периода охлаждения в этом году, соответствует и аномально низкий уровень эффективного сопротивления в июне-июле этого года, приведший к слиянию летнего и осеннего уровней (рис. 3). В целом, с 2005 по 2008 годы, весенней степени промороженности грунтов соответствует средний уровень эффективного сопротивления 3900, летней – 1900 и осенней – 900 Ом·м. Таким образом, уровни эффективного сопротивления грунтов, соответствующие выделенным степеням их промороженности, отличаются примерно в два раза.



**Рис. 3.** Сезонные изменения эффективного сопротивления песчаных грунтов стационара «Туймаада» ИМЗ СО РАН в 2005-2008 годах

Следует отметить, что по результатам мониторинга эффективного сопротивления грунтов, на степень промерзания массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов, кроме температуры приземного воздуха, оказывают значительное влияние и такие элементы климата, как толщина снегового покрова и обильность дождевых осадков. Снеговой покров несет в себе теплоизолирующие функции, а дождевые осадки понижают коэффициент теплопроводности оттаявших грунтов. Значение имеют как изменение величины всех перечисленных факторов, так и длительность их воздействия.

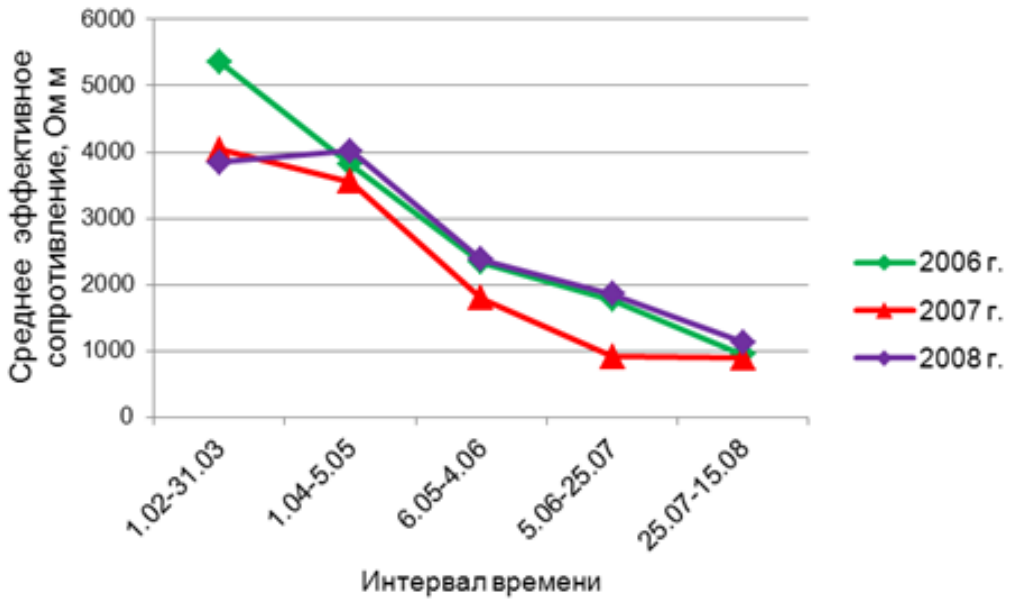


Рис. 4. Межгодовые изменения среднего по интервалу времени эффективного электрического сопротивления грунтов

Тенденция к почти линейному снижению эффективного сопротивления при переходе от отрицательных зимних температур воздуха к положительным летним (рис. 4) сохраняется не всегда. Так, малая величина толщины снежного покрова зимой 2006 г. (рис. 5) привела к большему зимнему промораживанию грунта, чем в 2007 и 2008 годах, выраженному большим эффективным сопротивлением (рис. 6). А малая величина осадков, в виде дождя в первой половине августа 2007 г. (рис. 5), также привела к аномальному относительному повышению эффективного электрического сопротивления в этот период, по сравнению с 2006 и 2008 годами (рис. 4).

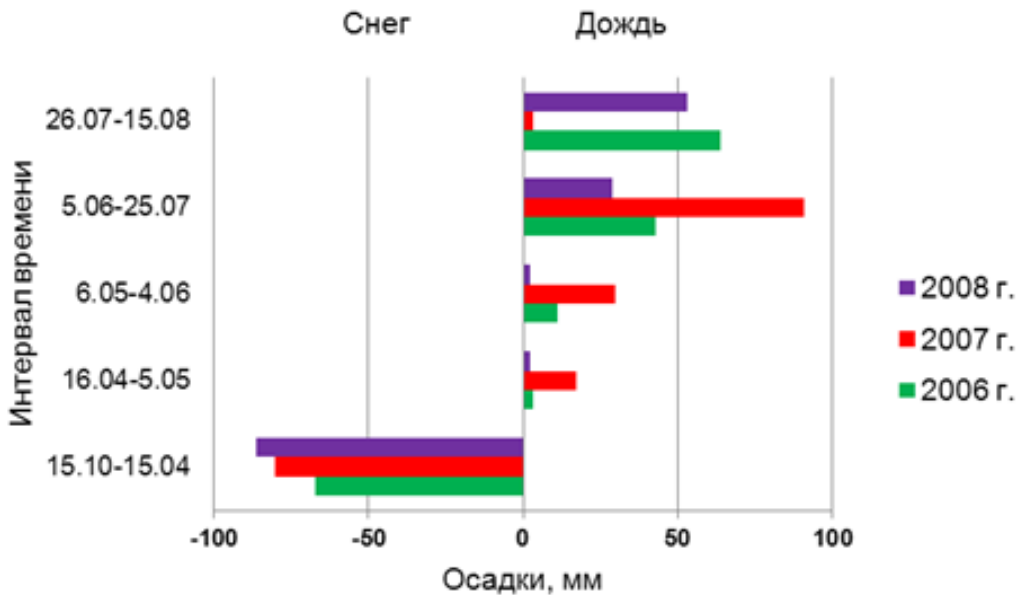


Рис. 5. Межгодовые изменения средних по интервалу времени осадков

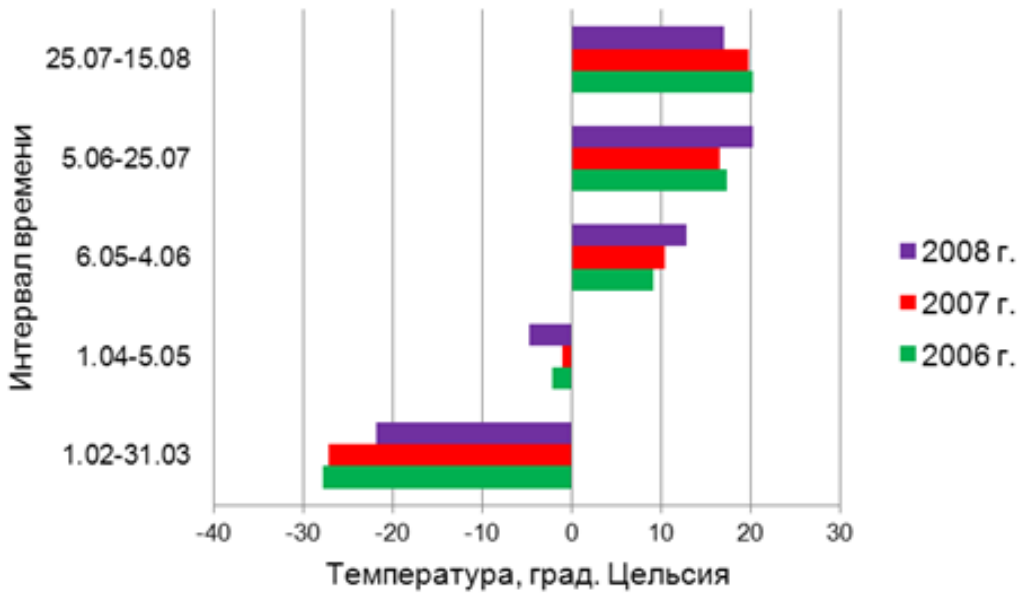


Рис. 6. Межгодовые изменения средней по интервалу температуры воздуха

На лесном участке стационара, для того же пункта и дат измерения, по которым имелись значения эффективного сопротивления, были рассчитаны значения эффективного электромагнитного сопротивления и получены, по результатам интерпретации данных радиоимпедансного зондирования, значения поперечного сопротивления СГКТ. Сравнение показывает, что размах сезонных изменений электромагнитного сопротивления и поперечного сопротивления достигает двух порядков, что гораздо больше, чем размах сезонных изменений эффективного сопротивления, находящийся в пределах одного порядка (рис. 7).

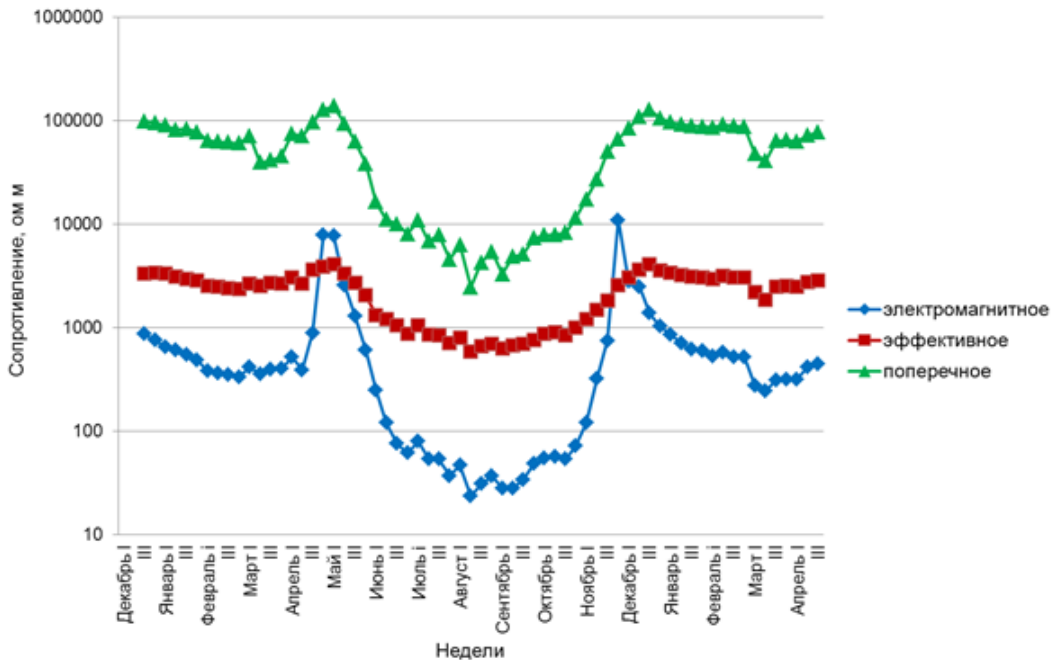


Рис. 7. Сравнение значений эффективного электромагнитного сопротивления, эффективного сопротивления и поперечного сопротивления во временных рядах с декабря 2010 г. по апрель 2012 г. на территории стационара «Туймаада» ИМЗ в Якутске



Следует отметить, что эффективные значения электрического сопротивления и электромагнитного сопротивления привлекательны точностью и оперативностью их получения. Однако для мониторинга состояния грунтов слоя годовых колебаний температуры, более приемлемыми параметрами являются, получаемые путем интерпретации данных радиоимпедансного или РМТ зондирования, поперечное сопротивление или продольная проводимость слоя. Выбор поперечного сопротивления либо продольной проводимости СГКТ [3] определяется в зависимости от типа геоэлектрического разреза на исследуемом участке.

### **Заключение**

Результаты экспериментальных исследований, проводившихся с июля 2005 г. по настоящее время на стационаре ИМЗ СО РАН «Туймаада» показали, что радиоимпедансным зондированием отмечается изменение воздействия климатических факторов на состояние многолетнемерзлых грунтов. По результатам проведенных исследований можно сделать нижеследующие выводы.

1. Асимптотические значения величины эффективного сопротивления многолетнемерзлых дисперсных грунтов отражают изменения температуры грунтов в результате климатического воздействия и могут служить критериями степени промороженности определенных типов грунтов.

2. В соответствии с сезонными асимптотическими значениями эффективного сопротивления, различаются зимняя, весенняя, летняя и осенняя степени промороженности массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов слоя годовых колебаний температуры. Длительность и границы соответствующих им периодов времени определяются температурой приземного воздуха, толщиной снегового покрова и обильностью дождевых осадков.

3. Величина эффективного электрического сопротивления массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов зависит от степени промороженности грунтов массива за последний, до его измерения, период стадии охлаждения либо растепления. Она в значительной степени определяется величиной объемной льдистости и величиной содержания незамерзшей воды в грунтах, сформировавшимися ко времени проведения измерений.

4. Степень промороженности массива многолетнемерзлых грунтов зависит не только от солнечной радиации, температуры приземного воздуха, но и от толщины снежного покрова на стадии охлаждения и от обильности дождевых осадков на стадии растепления.

5. Степень промороженности массива многолетнемерзлых грунтов наиболее значимо выделяется по данным эффективного электромагнитного сопротивления на средних радиочастотах и поперечного сопротивления слоя годовых колебаний температуры многолетнемерзлых грунтов.

Таким образом, радиоимпедансное зондирование, а также радиомагнитотеллурическое (РМТ) зондирование могут быть рационально использованы для мониторинга состояния многолетнемерзлых грунтов под воздействием изменений климата.

### **Литература**

1. Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. -Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. – 204 с.
2. Efremov V.N. 2008. Seasonal Variations of Surface Radiowave Impedance of Frozen Ground. Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost 1, Alaska, Fairbanks 2: 409-414.
3. Ефремов В.Н. Метод мониторинга состояния многолетнемерзлых грунтов по электрическим параметрам переходного слоя // Материалы XI международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. Магадан (Россия), 5-8 сентября 2017 г. – Якутск: изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2017. – С. 241-242.
4. Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: МГУ, 2004. – 512 с.
5. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. – Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. – 515 с.
6. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. – Новосибирск: Наука, 1975. – 176 с.
7. Ефремов В.Н. Возможности регистрации геофизических аномалий от талых и водоносных горизонтов в мерзлых толщах / В.Н. Ефремов // Криосфера Земли. – 2017. – том XXI, № 6. – С.129–133.

8. Efremov V.N. Monitoring of permafrost condition based on longitudinal conductivity of the transition layer / V.N. Efremov // Journal of engineering of heilongjiang university. – 2014. – vol. 5, no. 3. – P. 257-261.
9. Ефремов В.Н. Температурная зависимость сезонных изменений электрического сопротивления / В.Н. Ефремов // Наука и образование. – 2011. – № 1(61). – С.50-54.
10. Парфентьев П.А., Пертель М.И. Измеритель поверхностного импеданса на СДВ-СВ диапазонах // Низкочастотный волновод «Земля – ионосфера». – Алма-Ата: Галым, 1991. – С. 133-135.

### References

1. Efremov V.N. Radioimpedansnoe zondirovanie merzly'x gruntov. -Yakutsk: Izd-vo Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2013. – 204 s.
2. Efremov V.N. 2008. Seasonal Variations of Sureface Radiowave Impedance of Frozen Ground. Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost 1, Alaska, Fairbanks 2: 409-414.
3. Efremov V.N. Metod monitoringa sostoyaniya mnogoletnemerzly'x gruntov po e'lektricheskim parametram perexodnogo sloya // Materialy' XI mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya. Magadan (Rossiya), 5-8 sentyabrya 2017 g. – Yakutsk: izd-vo Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2017. – S. 241-242.
4. Metody' geokriologicheskix issledovaniy / Pod red. E'.D. Ershova. – M.: MGU, 2004. – 512 s.
5. Frolov A.D. E'lektricheskie i uprugie svoystva merzly'x porod i l'dov. – Pushhino: ONTI PNCz RAN, 1998. – 515 s.
6. Votyakov I.N. Fiziko-mexanicheskie svoystva merzly'x i ottaivayushhix gruntov Yakutii. – Novosibirsk: Nauka, 1975. – 176 s.
7. Efremov V.N. Vozmozhnosti registracii geofizicheskix anomalij ot taly'x i vodonosny'x gorizontov v merzly'x tolshhax / V.N. Efremov // Kriosfera Zemli. – 2017. – tom XXI, № 6. – S.129–133.
8. Efremov V.N. Monitoring of permafrost condition based on longitudinal conductivity of the transition layer / V.N. Efremov // Journal of engineering of heilongjiang university. – 2014. – vol. 5, no. 3. – P. 257-261.
9. Efremov V.N. Temperaturnaya zavisimost' sezonny'x izmenenij e'lektricheskogo soprotivleniya / V.N. Efremov // Nauka i obrazovanie. – 2011. – № 1(61). – S.50-54.
10. Parfent'ev P.A., Pertel' M.I. Izmeritel' poverxnostnogo impedansa na SDV-SV diapazonax // Nizkochastotny'j volnovod «Zemlya – ionosfera». – Alma-Ata: Galy'm, 1991. – S. 133-135.