

Оценка влияния климатических факторов на состояние многолетнемерзлых грунтов по данным мониторинга их эффективного электрического сопротивления

В.Н. Ефремов

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
vne@mpi.ysn.ru

Аннотация. Показаны особенности сезонных периодических изменений температуры и эффективного электрического сопротивления массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов по результатам натурных измерений поверхностного импеданса в диапазоне частот 100–1000 кГц. Показана возможность использования периодичности изменения эффективного сопротивления для оценки влияния температуры приземного воздуха и атмосферных осадков на степень промерзания многолетнемерзлых грунтов. Приведено соответствие характерных изменений климатических факторов и эффективного сопротивления грунтов определенным периодам времени. Показано соответствие величины эффективного сопротивления массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов степени их промерзания. При этом сезонные изменения эффективного сопротивления отражают четыре степени промороженности грунтов: зимнюю, весеннюю, летнюю и осеннюю. Кроме температуры приземного воздуха значительное влияние на состояние грунтов оказывают и атмосферные осадки, воздействуя на него через такие элементы климата, как мощность снегового покрова и обильность дождевых осадков. Приведены результаты анализа экспериментальных данных наблюдения изменений эффективного сопротивления под воздействием климатических факторов в годовом цикле. Зависимость степени промороженности массива многолетнемерзлых грунтов в летний период от ее величины в предшествующий весенний период позволит прогнозировать состояния многолетнемерзлых грунтов для оперативного принятия превентивных мер по защите зданий и инженерных сооружений в криолитозоне в условиях потепления климата.

Ключевые слова: климатические факторы, многолетнемерзлые дисперсные грунты, состояние массива, степень промерзания, эффективное сопротивление.

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-55-63

Estimation of influence of climatic factors on condition of permafrost according to data of monitoring of their apparent resistivity

V.N. Efremov

P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
vne@mpi.ysn.ru

Abstract. Features of seasonal periodic changes of temperature and apparent resistivity of permafrost dispersed soil mass are shown based on results of field measurements of surface impedance in the 100–1000 kHz frequency range. It is shown a possibility of use of periodicity of changes in the apparent resistivity for an estimation of influence of surface air temperature and precipitation on a degree of freezing of permafrost soils. It is given a correspondence of characteristic changes of climatic factors and apparent resistivity of soils to certain periods of time. The apparent resistivity of the permafrost dispersed soil mass is shown to correspond to the degree of soil freezing. In addition, the seasonal changes of the apparent resistivity reflect four degrees of soil freezing: winter, spring, summer and autumn. Apart from the surface air temperature, the precipitation also has the significant influence on the condition of the soil, influencing it through climate elements such as thickness of snow cover and abundance of rainfall. The results of the analysis of the experimental data of observation of the changes of the apparent resistivity under the influence of the climatic factors in an annual cycle are given. De-

pendence of the degree of freezing of the permafrost soil mass in the summer period on its value during the preceding spring will allow predicting the state of the permafrost soils for rapid adoption of preventive measures to protect buildings and engineering structures in the cryolithozone under the conditions of a warming climate.

Key words: climatic factors, permafrost dispersed soils, condition of mass, degree of freezing, apparent resistivity.

Введение

Для исследований радиоимпедансным зондированием [1] влияния климатических факторов на геоэлектрические параметры нами в 2005 г. были выбраны экспериментальные площадки в пригороде г. Якутска на территории, занимаемой ныне стационаром «Туймаада» ИМЗ СО РАН.

Как известно из работы В.П. Мельникова, ранее на этой территории уже проводились в течение года определения кажущегося сопротивления по измерениям с установкой ВЭЗ, сопровождавшиеся измерениями температуры грунтов. По результатам измерений отмечалось, что «...проникновение на глубину фронта отрицательных температур приводит к изменению соотношения различных фаз воды и, как следствие, к изменению геоэлектрических характеристик» [2, с. 74].

Мониторинговые исследования радиоимпедансным зондированием в диапазоне частот 100–1000 кГц, начатые нами в 2005 г. [3], сопровождались с 2008 по 2010 г. измерениями температуры грунтов в скважине [4]. В последующем они рассматривались по полученным геоэлектрическим параметрам переходного слоя [5, 6] и сравнивались с данными по температурам приземного воздуха в г. Якутске [7]. В последнее время для мониторинговых исследований нами используется аппаратура радиоманнителлурического зондирования РМТ-К, описанная в работе [8].

Геоэлектрический разрез мерзлой толщи представлен по работам [9–14]. Он состоит из следующих горизонтов:

- слой сезонного промерзания–протаивания с переменной мощностью и переменным удельным электрическим сопротивлением (УЭС);
- слой сезонных колебаний отрицательных температур с большими градиентами изменения температуры, льдистости и УЭС по глубине и сезонным изменениям параметров с подошвой на глубинах от 10 до 30 м;
- мерзлый слой, УЭС которого может изменяться с глубиной, но в меньшей степени, составляющий основную мощность криолитозоны;
- подмерзлотный талый слой.

Сплошная по площади криолитозона характеризуется мощностью свыше 100 м [12]. Мощность мерзлой толщи в Центральной Якутии

зонально увеличивается с юга на север от 100 до 750 м [13], а в районе г. Якутска превышает 250 м.

Учитывая величину мощности мерзлой толщи в районе г. Якутска, а также критическую глубину залегания подмерзлотного горизонта, при которой его параметры уже не влияют на величину поверхностного импеданса [1] и эффективное сопротивление грунтов, для рабочего диапазона частот можно пренебречь влиянием подмерзлотного горизонта талых горных пород.

На этом основании и в удобном для учета влияния климатических факторов упрощенном виде мерзлую толщу и ее геоэлектрический разрез можно представить состоящими из залегающих последовательно от поверхности на глубину трех основных горизонтов: сезонноталый слой (СТС), слой годовых колебаний температуры многолетнемерзлых пород (СГКТ) и относительно стационарная мерзлая толща (СМТ).

Влияние климатических факторов рассмотрим по изменениям эффективных значений электрического сопротивления грунтов, определяемых измерениями поверхностного импеданса в диапазоне 100–1000 кГц по методике радиоимпедансного зондирования [1]. Для эффективных значений принимаем, что при мониторинговых измерениях сезонные изменения глубинности полученных данных не внесут значительных погрешностей, так как в СМТ удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость сохраняют относительную стабильность своих значений в используемом диапазоне частот.

В настоящей статье значимость влияния климатических факторов оценивается по характеристикам изменения эффективного сопротивления грунтов во временных рядах, полученным радиоимпедансным зондированием. Для этого рассмотрим сезонные, годовые и межгодовые изменения эффективного сопротивления на стационарных пунктах.

Исходные положения

Состояние дисперсных грунтов криолитозоны, по очевидным проявлениям, обычно характеризуется как мерзлое, пластично-мерзлое и талое. На практике, говоря о степени промерзания, часто подразумеваются два состояния: мерзлое или талое и лишь изредка добавляется третье – пластично-мерзлое. Для характеристи-

ки многолетнемерзлых дисперсных грунтов слоя годовых колебаний температуры, адекватной происходящим в нем изменениям температуры, требуется дополнительная градация, учитывающая увеличение их объемной льдистости с понижением температуры и ее уменьшение при повышении температуры. В этой связи, помимо степени промерзания, нами используется такой показатель, как степень промороженности мерзлых грунтов, различающийся для однотипных грунтов в зависимости от величины их отрицательной температуры.

Количественно общее состояние многолетнемерзлых грунтов и, в частности, степень их промороженности определяются комплексом взаимосвязанных и взаимообусловленных показателей физических свойств и их изменением. К таким показателям относятся естественная влажность горных пород и их электрическое сопротивление току, индуцируемому внешним электромагнитным полем. Для многолетнемерзлых горных пород показатель влажности дополняется показателем количества влаги, перешедшей под воздействием отрицательных температур в твердую фазу, т.е. объемной льдистостью.

Влияние климата на состояние дисперсных грунтов криолитозоны и их электрическое сопротивление обусловлено воздействием на верхние горизонты мерзлой толщи (СТС и СГКТ) таких факторов, как солнечная радиация, температура приземного воздуха и количество осадков, которые в комплексе создают определенный температурно-влажностный режим. В годовом цикле выделяются следующие стадии изменения температуры и влажности грунтов верхних горизонтов мерзлой толщи (рис. 1, а):

- стадия растепления, когда происходит таяние, интенсивное влагонасыщение и испарение влаги грунтов СТС, повышение температуры и понижение объемной льдистости и мощности грунтов СГКТ;

- стадия охлаждения, когда происходит понижение температуры грунтов, влагонасыщение с пониженным испарением и последующее промерзание грунтов СТС, уменьшение температуры, повышение объемной льдистости и мощности грунтов СГКТ;

- короткая стадия стабилизации охлаждения, когда изменения их температуры и объемной льдистости не столь значительны, а уровень значений соответствует их максимальной промороженности.

Климатические изменения влияют как на интенсивность процессов, связанных с растеплением и охлаждением грунтов, так и на длительность самих стадий температурно-влажностного

режима. Результатом воздействия климатических факторов становятся: изменение мощности, влажности и степени промерзания СТС, изменение его мощности и УЭС, а также изменение объемной льдистости, степени промороженности и удельного электрического сопротивления СГКТ.

Изменение состояния многолетнемерзлых дисперсных грунтов под воздействием климатических факторов определяется степенью их промороженности и промерзания на стадиях их охлаждения и растепления. Например, для Центральной Якутии период охлаждения приходится на август–февраль для грунтов, близких к дневной поверхности, а для грунтов, находящихся на глубине более 2 м, продолжается до мая [4]. Растепление грунтов для данного региона начинается в марте–мае и завершается в августе–декабре в зависимости от глубины их залегания.

Методика наблюдений

С 2005 г. на территории, занимаемой ныне стационаром «Туймаада» ИМЗ СО РАН, нами проводятся мониторинговые исследования по методике радиоимпедансного зондирования мерзлых грунтов [1]. Задачей этих исследований является изучение влияния промерзания и оттаивания массивов многолетнемерзлых дисперсных грунтов, в пределах слоя годовых колебаний температуры, на их электрические характеристики. Цель этих работ – оценка фактической и прогнозируемой степени промороженности многолетнемерзлых дисперсных грунтов по результатам геофизических наблюдений с поверхности грунта с учетом данных об изменениях температуры грунтов и приземного воздуха.

В период с 2008 по 2010 г. нами был проведен совместный мониторинг сезонных изменений температуры песчаных грунтов и их эффективного электрического сопротивления на территории стационара «Туймаада» ИМЗ СО РАН. Измерения производились еженедельно. Температура грунтов измерялась по глубине через каждые 0,25 м цифровым мультиметром В7-35 с помощью составленной из термисторов косы, погруженной в скважину на глубину до 4 м. Эффективное электрическое сопротивление определялось на том же пункте по измерениям поверхностного импеданса на частотах диапазона 100–1000 кГц. Измерения производились на импедансметре ИПИ-1000 [14] с использованием незаземленной симметричной приемной линии. Мониторинг эффективного сопротивления радиоимпедансным зондированием с ИПИ-1000 выполнялся на стационаре до 2012 г.

Результаты и обсуждение

Основные результаты [4] проведения эксперимента по совместному мониторингу сезонных изменений в годовом цикле температуры песчаных грунтов на различной глубине и их эффективного сопротивления на частотах 171–864 кГц сводятся отчасти к нижеследующему.

Сезонные изменения температуры грунтов и их эффективного сопротивления в течение года во временном ряду образуют периодическую форму колебаний, имеющую два полупериода перемены значений, названных в оценке по времени, как период охлаждения грунтов, сопровождаемый нарастанием сопротивления, и период растепления грунтов, сопровождаемый его понижением (рис. 1, а). При этом периоды растепления и охлаждения грунтов соответствуют наступившим одноименным стадиям их температурно-влажностного режима.

Границы периодов охлаждения и растепления грунтов существенно зависят от глубины их залегания, степени и длительности воздействия климатических факторов. Для грунтов сезонно-талого слоя характерны пятимесячный период растепления (март–июль) и более длительный семимесячный период охлаждения (август–февраль следующего года). Для многолетне-мерзлых грунтов слоя годовых колебаний температуры характерны задержка на месяц начала периода растепления и продление его до конца года (апрель–декабрь). Длительность последующего периода охлаждения сокращается до трех месяцев (январь–март).

В отличие от температуры периодические сезонные колебания эффективного сопротивления дисперсных грунтов имеют более сложную форму (рис. 1, б), которая предопределена иной зависимостью его значений от объемной льди-

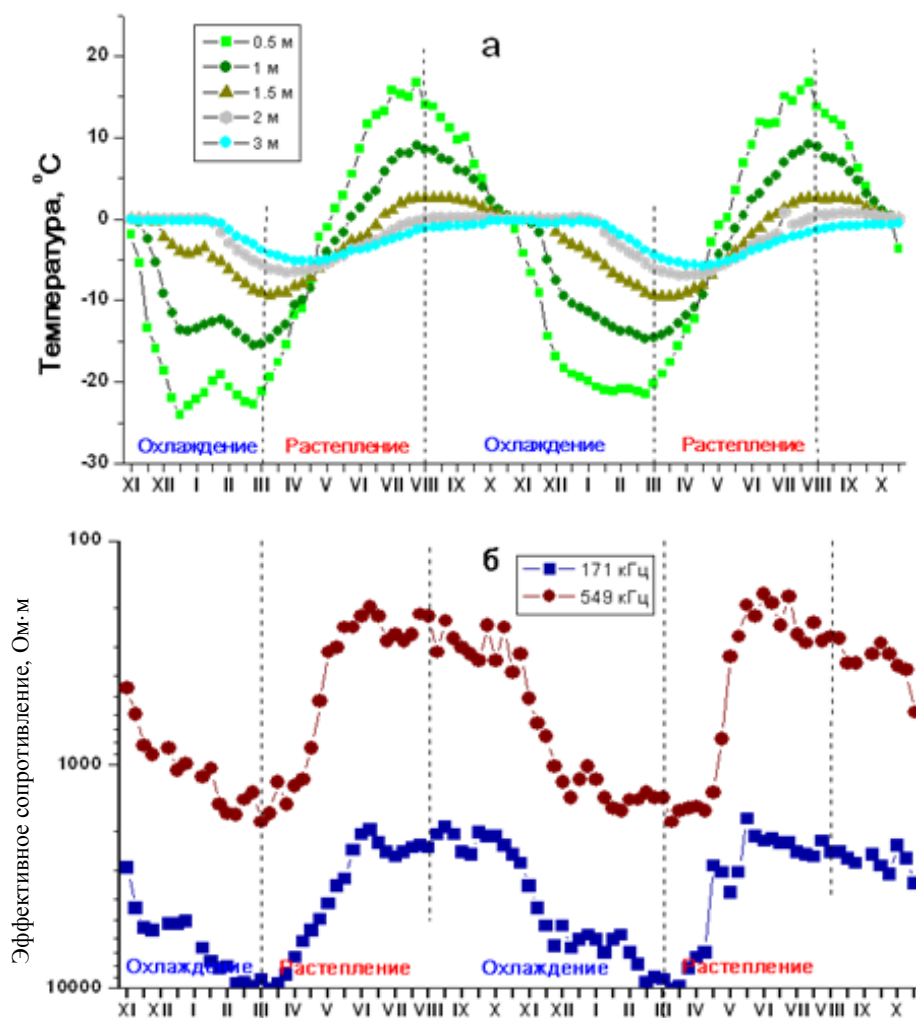


Рис. 1. Сезонные изменения температуры грунтов на различной глубине (а) и эффективного сопротивления для двух частот (б) на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН (пригород г. Якутска)

Fig. 1. Seasonal changes of temperature of soils at different depths (a) and apparent resistivity for two frequencies (b) at station «Tuymaada» (suburb of Yakutsk) of P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS

стости грунтов и количества содержащейся в них незамерзшей воды. Температура грунтов на заданной глубине зависит как от теплофизических характеристик грунтов на этой глубине, так и от теплофизических характеристик всех перекрывающих грунтов. Эффективное сопротивление на данной частоте зависит от УЭС грунтов, находящихся в пределах толщины скин-слоя для этой частоты, и определяется их объемной льдистостью. Поэтому изменения эффективного сопротивления в большей степени реагируют на изменения степени промороженности грунтов, нежели их температура.

Понижение значений эффективного сопротивления грунтов, вызванное протаиванием грунтов сезонноталого слоя и повышением температуры многолетнемерзлых грунтов, происходит весьма интенсивно в первые два месяца периода растепления (май–июнь) и не столь значительно, достигая стабильности значений в последующие месяцы (июль–август). Повышение значений эффективного сопротивления многолетнемерзлых грунтов, вызванное их промораживанием, наиболее интенсивно проявляется в первые три месяца периода охлаждения (октябрь–декабрь), затем отмечается некоторая стабилизация значений (январь–февраль) и завершается дополнительным повышением значений в последующие два месяца (март–апрель).

Незначительность понижения эффективного сопротивления грунтов в июле–августе объясняется снижением теплопроводности сезонноталого слоя за счет его увлажнения в талом состоянии. Напротив, дополнительное весеннее повышение эффективного сопротивления грунтов вызвано увеличением их объемной льдистости в мерзлом состоянии.

Если на полученных графиках изменения температуры (рис. 1, а) выбрать узловые точки, в которых сходятся температурные кривые для различных глубин, то в те недели, на которые приходится эти точки, значения температуры на различных глубинах будут примерно одинаковыми. Если сопоставить соответствующие этим неделям значения эффективного сопротивления и температуры, то можно отметить, что понижению температуры грунтов от 0 до -5°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°C соответствует уменьшение эффективного сопротивления за тот же период также в 2,7

раза. Полученная здесь температурная зависимость эффективного электрического сопротивления на частотах 549 и 864 кГц [3] показала, что понижение температуры от $-4,5$ до -8°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 грунтов в диапазоне частот 100–1000 кГц можно определять влияние величины отрицательной температуры на степень их промороженности.

Изменение температуры грунтов зависит, в основном, от температуры приземного воздуха, поэтому последняя и была использована нами для сравнительной оценки влияния климатических факторов на степень промороженности массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов и величину их эффективного электрического сопротивления по результатам мониторинга.

Результаты мониторинга сезонных изменений эффективного электрического сопротивления песчаных грунтов, полученные нами на лесном участке территории, прилегающей к стационару «Туймаада» ИМЗ СО РАН, показали следующее (рис. 2). 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 сезонноталого слоя. С мая по июнь происходит резкое понижение эффективного сопротивления, отражающее интенсивное протаивание сезонноталого слоя. В июле и августе асимптотические уровни величины эффективного сопротивления отражают две степени пониженной промороженности грунтов: летнюю и осеннюю.

Таким образом, сезонные изменения эффективного сопротивления отражают четыре степени промороженности грунтов: зимнюю, весеннюю, летнюю и осеннюю.

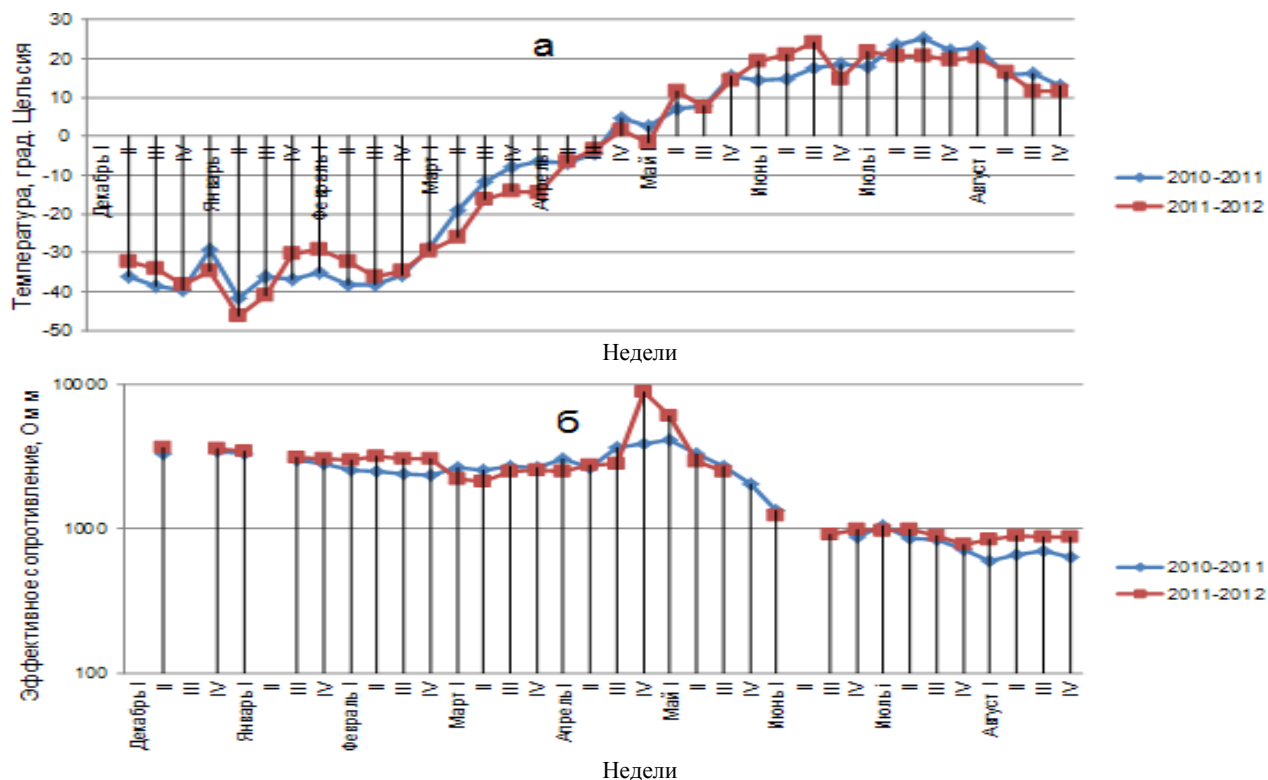


Рис. 2. Сезонные изменения средних за неделю температур воздуха (а) и еженедельно измеренных значений эффективного сопротивления грунтов на частоте 864 кГц (б) на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН (пригород г. Якутска) в 2010–2012 гг.

Fig. 2. Seasonal changes of average weekly air temperatures (a) and weekly measured values of apparent resistivity of soils at frequency of 864 kHz (b) at station «Tuymaada» (suburb of Yakutsk) of P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS in 2010–2012

Степень промороженности грунтов, отражаемая величиной 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 его довольно высокий июньский уровень в эти годы (рис. 3). 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. В целом, с 2005 по 2008 г., весенней степени промороженности грунтов соответствует средний уровень эффективного сопротивления 3900 Ом·м, летней – 1900 Ом·м и осенней – 900 Ом·м. Таким образом, уровни эффективного сопротивления грунтов, соответствующие выделенным степеням промороженности, отличаются примерно в два раза.

Просматривая временные ряды (рис. 3) в ретроспективе нетрудно заметить, что аномально низкому положению летнего уровня эффективного сопротивления (2007 г.) предшествует аномальное снижение его весеннего уровня. Весеннюю аномалию эффективного сопротивления можно объяснить значительными снего-

выми осадками в третьей декаде апреля 2007 г. Этот аномальный по своей мощности снеговой покров помешал дальнейшему весеннему охлаждению грунтов, которое затем отразилось на их пониженной летней степени промороженности.

Таким образом, весенняя степень промороженности влияет на летнюю в зависимости от климатических факторов. Отсюда следует, что помимо температуры приземного воздуха значительное влияние на состояние грунтов оказывают и атмосферные осадки, воздействуя на него через такие элементы климата, как мощность 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 перечисленных элементов, так и длительность их воздействия. Малая мощность снегового покрова весной 2012 г. привела к дополнительному повышению эффективного сопротивления грунтов за счет дальнейшего их промерзания и повышения льдистости, а его существенная мощность весной 2007 г. понизила эффективное сопротивление грунтов, по сравнению с 2006 и 2008 гг. (рис. 4), в результате уменьшенного охлаждения грунтов.

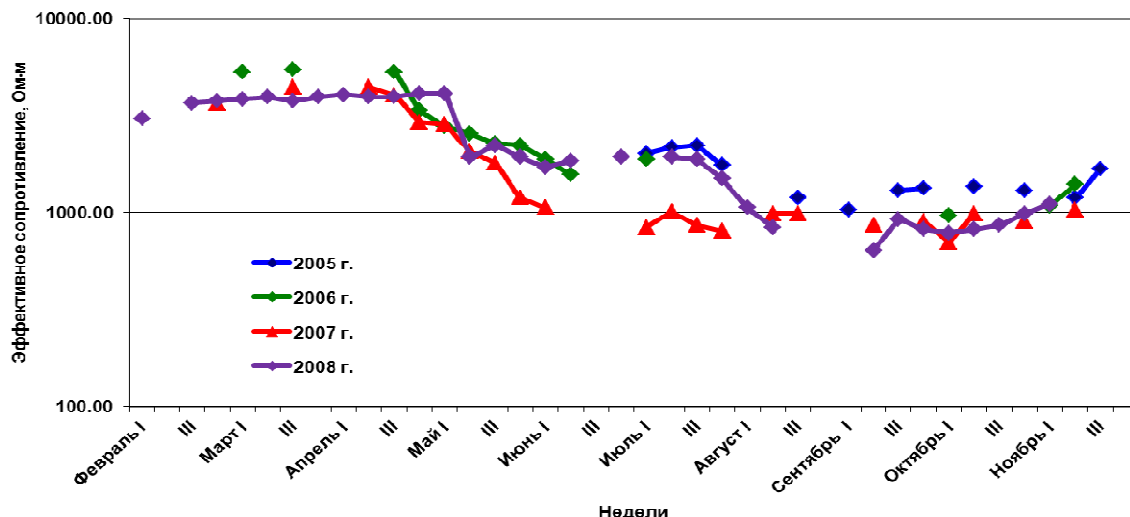


Рис. 3. Сезонные и межгодовые изменения эффективного сопротивления песчаных грунтов на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН (пригород г. Якутска) в 2005–2008 гг.

Fig. 3. Seasonal and interannual changes of apparent resistivity of sandy soils at station «Tuymaada» (suburb of Yakutsk) of P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS in 2005–2008

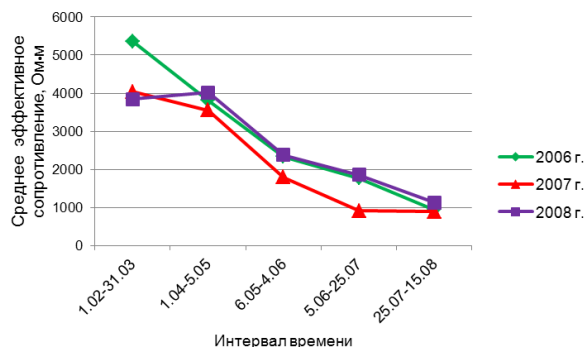


Рис. 4. Межгодовые изменения среднего по интервалу времени эффективного электрического сопротивления песчаных грунтов на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН (пригород г. Якутска)

Fig. 4. Interannual changes of average over time interval of apparent resistivity of sandy soils at station «Tuymaada» (suburb of Yakutsk) of P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS

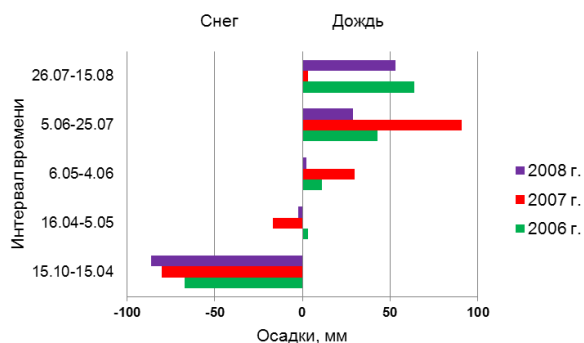


Рис. 5. Межгодовые изменения средних по интервалу времени осадков в г. Якутске

Fig. 5. Interannual variations of averages over time interval of precipitation in Yakutsk

Тенденция к почти линейному снижению эффективного сопротивления грунтов при перехо-

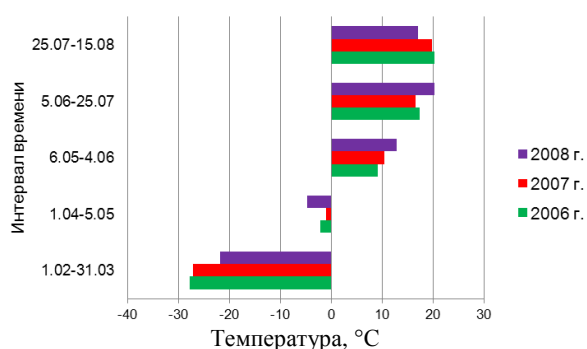


Рис. 6. Межгодовые изменения средней по интервалу температуры воздуха в г. Якутске

Fig. 6. Interannual changes of average over interval of air temperature in Yakutsk

де от отрицательных зимних температур воздуха к положительным летним (рис. 4) сохраняется не всегда. Так, малая мощность снежного покрова зимой 2006 г. (рис. 5) привела к более значимому зимнему промораживанию грунта, чем в 2007 и 2008 гг., выраженному большим эффективным сопротивлением, даже при незначительной отрицательной температуре приземного воздуха (рис. 6). Большая же мощность снежного покрова зимой 2008 г. отразилась в меньшем эффективном сопротивлении грунтов (рис. 4). Большое количество осадков в виде дождя в конце весны и начале лета 2007 г. (рис. 5) значительно понизило эффективное сопротивление грунтов, но затем, благодаря снижению теплопроводности и повышению льдистости многолетнемерзлых грунтов, привело к повышению эффективного сопротивления грунтов к концу лета, к концу лета до значений для того же периода в 2006 и 2008 гг.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на территории стационара «Туймаада» ИМЗ СО РАН, 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 электрического сопротивления многолетнемерзлых дисперсных грунтов отражают изменения температуры грунтов слоя годовых колебаний температуры, происходящие в результате воздействия климатических факторов, а их уровни могут служить критериями по отношению к степени промороженности определенных типов грунтов.

2. Соответственно уровням сезонных асимптотических значений 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, мощностью снегового покрова и обильностью дождевых осадков.

3. Величина эффективного электрического сопротивления массива многолетнемерзлых дисперсных грунтов значительно 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 под воздействием климатических факторов ко времени проведения измерений.

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

5. Эффективное (по терминологии радиоимпедансного зондирования) или аналогичное ему кажущееся (по терминологии радиоманнителлурического зондирования) сопротивление репрезентативно отражает влияние климатических факторов на степень промороженности и состояние грунтов слоя годовых колебаний температуры.

6. Анализ результатов геофизического мониторинга и последствий воздействия климатических факторов в 2007 г. показывает, что аномальное (катастрофическое) растепление песчаных многолет-

немерзлых грунтов в летний период может быть вызвано последовательной реализацией и сочетанием следующих сезонных климатических факторов: потепление приземного воздуха; значительные снеговые осадки в апреле; большое количество дождевых осадков в начале и до середины лета.

7. Зависимость степени промороженности массива многолетнемерзлых грунтов в летний период от ее величины в предшествующий весенний период предполагает возможность краткосрочного прогноза состояния многолетнемерзлых грунтов для оперативного принятия превентивных мер по защите зданий и инженерных сооружений в криолитозоне в условиях потепления климата.

Таким образом, применение радиоимпедансного зондирования, как и аналогичное применение радиоманнителлурического зондирования 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 ИМЗ СО РАН, 2013. 204 с.
2. *Мельников В.П.* Электрофизические исследования мерзлых пород. Новосибирск: Наука, 1977. 108 с.
3. *Efremov V.N.* Seasonal Variations of Surface Radiowave Impedance of Frozen Ground // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost. Alaska, Fairbanks, 2008. V. 1. P. 409–414.
4. *Ефремов В.Н.* Температурная зависимость сезонных изменений электрического сопротивления многолетнемерзлых грунтов // Наука и образование. 2011. № 1. С. 50–54.
5. *Efremov V.N.* Monitoring of permafrost condition based on longitudinal conductivity of the transition layer // Journal of Engineering of Heilongjiang University. 2014. V. 5, no. 3, P. 257–261.
6. *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 ИМЗ СО РАН, 2017. С. 241–242.
7. *Архив погоды в Якутске* // Интернет. <https://rp5.ru/архив погоды в Якутске>.
8. *Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А.А.* Метод радиоманнителлурических зондирования с контролируемым источником // Геофизика. 2014. № 1. С. 18–25.
9. *Якупов В.С.* Определение мощности со-временных рыхлых отложений методом верти-

кального электрического зондирования в районах с низкой температурой многолетнемерзлых пород // Региональные мерзлотно-геофизические исследования: Труды Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. XV. С. 144–183.

10. *Боровинский В.А.* Электро- и сейсмометрические исследования многолетнемерзлых горных пород и ледников. М.: Наука, 1969. 184 с.

11. *Снегирев А.М.* Скважинная электрометрия мерзлой зоны литосферы. М.: Изд-во СИП РИА, 2002. 274 с.

12. *Некрасов И.А.* Региональное распространение многолетнемерзлых пород // Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / Под ред. П.И. Мельникова. Новосибирск: Наука, 1974. 191. С. 46–58.

13. *Фотиев С.М.* Строение и мощность многолетнемерзлой толщи пород // Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М.: Недра, 1989. С. 261–263.

14. *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 zondirovaniye merzlykh gruntov. Yakutsk: Izd-vo Institut merzlotovedeniya SO RAN, 2013. 204 s.

2. *Mel'nikov V.P.* Elektrofizicheskie issledovaniya merzlykh porod. Novosibirsk: Nauka, 1977, 108 s.

3. *Efremov V.N.* Seasonal Variations of Surface Radiowave Impedance of Frozen Ground // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost. Alaska, Fairbanks, 2008. V.1. P. 409–414.

4. *Efremov V.N.* Temperaturnaya zavisimost' sezonnykh izmeneniy elektricheskogo soprotivleniya mnogoletnemerzlykh gruntov // Nauka i obrazovanie. 2011. № 1. S. 50–54.

5. *Efremov V.N.* Monitoring of permafrost condition based on longitudinal conductivity of the transition layer // Journal of Engineering of Heilongjiang University. 2014, V. 5, № 3. P. 257–261.

6. *Efremov V.N.* Metod monitoringa sostoyaniya mnogoletnemerzlykh gruntov po elektricheskim parametram perekhodnogo sloya // Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya. Magadan (Rossiya), 5–8 sentyabrya 2017 g. Yakutsk: Izd-vo Institut merzlotovedeniya SO RAN, 2017. S. 241–242.

7. *Arkhiv pogody v Yakutske* // Internet. <https://rp5.ru/архив погоды в Якутске>.

8. *Saraev A.K., Simakov A.E., Shlykov A.A.* Metod radiomagnitotelluricheskikh zondirovanij s kontroliruemym istochnikom // Geofizika. 2014. № 1. S. 18–25.

9. *Yakupov V.S.* Opredelenie moschnosti sovremennykh rykhlykh otlozhenij metodom vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniya v rajonakh s nizkoj temperaturoj mnogoletnemerzlykh porod // Regional'nye merzlotno-geofizicheskie issledovaniya: Trudy Instituta merzlotovedeniya im. V.A. Obrucheva. M.: Izd-vo AN SSSR, 1959. V. XV. S. 144–183.

10. *Borovinskij V.A.* Elektro- i sejsmometricheskie issledovaniya mnogoletnemerzlykh gornykh porod i lednikov. M.: Nauka, 1969. 184 s.

11. *Snegirev A.M.* Skvazhinnaya elektrometriya merzloy zony litosfery. 2002. M.: Izd-vo SIP RIA. 274 s.

12. *Nekrasov I.A.* Regional'noe rasprostraneniye mnogoletnemerzlykh porod // Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya Vostochnoj Sibiri / Pod red. P.I. Mel'nikova. Novosibirsk: Nauka, 1974. S. 46–58.

13. *Fotiev S.M.* Stroenie i moschnost' mnogoletnemerzloy tolschi porod // Geokriologiya SSSR. Srednyaya Sibir'. M.: Nedra, 1989. S. 261–263.

14. *Parfent'ev P.A., Pertel' M.I.* Izmeritel' pov-erkhnostnogo impedansa na SDV-SV diapazonakh // Nizkochastotnyj volnovod «Zemlya – ionosfera». Alma-Ata: Galym, 1991. S. 133–135.

Поступила в редакцию 12.11.2018

Об авторе

ЕФРЕМОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-3648-4604>, vne@mpi.ysn.ru.

About the author

EFREMOV Vladimir Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-3648-4604>, vne@mpi.ysn.ru.