

$$\text{fun}(\Phi) \equiv f_{ij} v(\Phi) \wedge Co. \quad (21)$$

Третья координата базисного пространства – воздействие сооружения Co – является по определению независимой величиной, замыкающей множество взаимодействующих параметров, т.е. величины gr , w , Co действительно *линейно независимы*, удовлетворяя условию (15), справедливость которого первоначально допущена аксиоматически.

Выводы

1. В целом зависимости (4)–(20) отражают законы, управляющие поведением базисных структур и их взаимодействиями при переходе на каждый следующий уровень размерности базисного пространства. Поэтому созданная система инженерной криолитологии, несмотря на целевой инженерный аспект и соответствующую понятийную базу, обладает признаками фундаментальной науки, объективно вскрывая условия формирования прочности грунтов в рамках собственных базисных структур.

2. Именно инженерный аспект генетических исследований грунтовых массивов и оснований обеспечивает предметное обособление задач и, соответственно, возможность построения независимой системы параметров в базисном пространстве технических свойств геологических объектов.



УДК 550.837: 551.345

Теоретические и экспериментальные аспекты интерпретации результатов радиоимпедансного зондирования мерзлых толщ

В.Н. Ефремов

На основе моделирования частотной зависимости поверхностного импеданса мерзлых грунтов различного состава и строения показано влияние основных слоев геоэлектрического разреза и возможности приближенной интерпретации результатов зондирования. Приведен полученный в результате анализа экспериментальных данных радиоимпедансного зондирования геоэлектрический разрез мерзлых толщ Центральной Якутии, а также факторы, определившие его построение. Рассмотрено влияние сезонных изменений электрических свойств многолетнемерзлого грунта на его эффективное сопротивление по экспериментальным данным.

ЕФРЕМОВ Владимир Николаевич – к.т.н., в.н.с.
ИМЗ СО РАН.

3. Инженерная криолитология, изучающая процессы формирования структур, определяющих макропрочность мерзлых осадочных образований, располагает более широкими возможностями, чем науки прикладного ряда, применяющие известные результаты в решении практических задач.

Литература

1. Гурьянов И.Е. Начала инженерной криолитологии. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2001. – 121 с.
2. Колмогоров А.Н., Драгалин А.Г. Математическая логика. – М.: Изд-во УРСС, 2004. – 240 с.
3. Конищев В.Н. Формирование состава дисперсных пород в криосфере. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1981. – 198 с.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
5. Лысенко М.П. Лессовые породы (Состав и инженерно-геологические особенности). – Л.: Недра, 1978. – 208 с.
6. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Том I. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 212 с.
7. Шанцер Е.В. Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований // Труды ГИН, вып. 161. – М.: Наука, 1966. – 240 с.
8. Шумилов Ю.В. Континентальный литогенез и россыпеобразование в криолитозоне. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1986. – 174 с.

On the basis of modeling frequency the influence of the basic layers of a geoelectrical construction and opportunities of the approached interpretation of results of sounding is shown to dependence of a surface impedance frozen grounds of various structure. Are given, received as a result of the analysis of experimental data of radioimpedance sounding a geoelectrical construction permafrost of Central Yakutia and factors determining his construction. The influence of seasonal changes of electrical properties of a frozen ground on his effective resistance on experimental data is considered.

Поверхностный импеданс однородной изотропной немагнитной среды с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) ρ и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , при зависимости от времени $e^{-i\omega t}$, представляют [1] как

$$Z = \frac{120\pi}{\sqrt[4]{\epsilon + \left(\frac{60\lambda}{\rho}\right)^2}} e^{-i0.5 \arctg\left(\frac{60\lambda}{\rho\epsilon}\right)}, \quad (1)$$

где λ – длина волны в свободном пространстве, м. В радиофизике используют поверхностный импеданс, приведенный к импедансу свободного пространства $Z_0 = 120\pi$, который записывается как отношение $\delta = Z/Z_0$. Для него выражение (1) преобразуют к виду:

$$\delta = |\delta| e^{-i \arg \delta},$$

где $|\delta|$ – модуль приведенного поверхностного импеданса, представляемый как

$$|\delta| = \frac{1}{\sqrt[4]{\epsilon^2 + \left(\frac{60\lambda}{\rho}\right)^2}}, \quad (2)$$

а $\arg \delta$ – его аргумент (фаза), представляемый как

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

Модуль приведенного поверхностного импеданса определяется отношением амплитуд электрической и магнитной горизонтальных составляющих поля и принимает значения $0 < |\delta| < 1$. Аргумент импеданса характеризует отставание или опережение по фазе магнитной составляющей относительно электрической и находится в пределах $-\pi/2 \leq \arg \delta \leq \pi/2$. Электромагнитное поле, проникая в толщу пород, в зависимости от частоты поля и электрических свойств пород, вызывает в ней токи проводимости, определяемые УЭС пород, и токи смещения, оп-

ределяемые диэлектрической проницаемостью. Отношение плотности токов проводимости к плотности токов смещения представляется в виде:

$$\left| \frac{j_{np}}{j_{см}} \right| = \left| \frac{E}{\rho \omega \epsilon_0 E} \right| = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon \epsilon_0} = \frac{60\lambda}{\rho \epsilon} \quad (4)$$

и является параметром, определяющим электрические свойства среды для переменного поля определенной частоты. Если $60\lambda/\rho \gg \epsilon$, то в среде преобладают токи проводимости, а сама она по свойствам приближается к проводнику. При $60\lambda/\rho \ll \epsilon$ преобладают токи смещения, а среда близка по свойствам к диэлектрику. Соотношение между токами проводимости и смещения содержится в выражениях для модуля и аргумента приведенного поверхностного импеданса однородного полупространства (2, 3) и определяет характер их частотной зависимости.

Величину отношения токов проводимости и смещения (4) определим, используя (3), как

$$\frac{60\lambda}{\rho \epsilon} = \tg(2 \arg \delta). \quad (5)$$

Отсюда следует, что если в однородной среде преобладают токи проводимости, то $\arg \delta \leq -42^\circ$, а если токи смещения, то $\arg \delta \geq -3^\circ$.

По функциональной зависимости поверхностного импеданса, выражающейся для слоистой среды рекуррентным соотношением, сложно представить изменение импеданса на различных частотах в зависимости от изменения параметров слоев. Поэтому нами был проведен массовый счет сети вариантов для многослойной модели мерзлой толщи с различными параметрами слоев, соответствующими типовым геоэлектрическим разрезам, определенным электроразведкой на постоянном токе. Результаты расчетов позволили проанализировать, показать графически, оценить характер и пределы изменений частотной зависимости поверхностного импеданса мерзлой толщи в диапазоне частот $10^1 \dots 10^5$ кГц.

Частотная зависимость поверхностного импеданса слоистой среды определяется мощностью слоев, участвующих в формировании структуры поля на ее поверхности, а также различием соотношений токов проводимости и смещения в слоях. Характер изменения кривых частотной зависимости модуля $|\delta|$ и аргумента $\arg \delta$ приведенного поверхностного импеданса для типового геоэлектрического разреза мерзлой толщи

при отсутствии и наличии сезонного протаивания в качестве примера показан на рис. 1. Для сравнения здесь же штриховыми линиями показаны кривые $|\delta|$ и $\arg \delta$ для однородного полупространства со значениями УЭС, соответствующими горизонтам талых скальных пород (ТСП), мерзлых скальных пород (МСП), мерзлых рыхлых отложений (МРО) и сезонно-талого слоя (СТС).

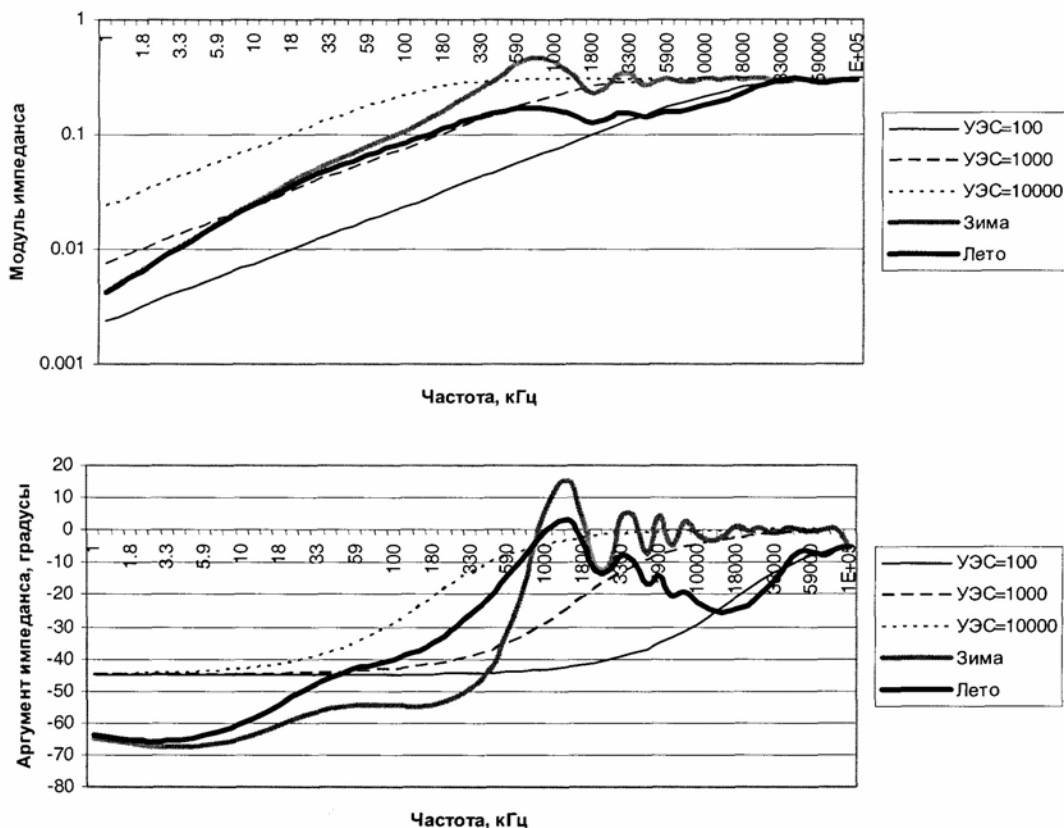


Рис. 1. Частотные зависимости модуля и аргумента приведенного поверхностного импеданса для модели мерзлой толщи в зимний и летний периоды

Результаты моделирования показывают, что с повышением частоты происходит переход кривых $|\delta|$ от соответствия электрическим параметрам подстилающего горизонта к соответствию электрическим параметрам перекрывающего. Переход кривых сопровождается осцилляцией, которая тем значительней, чем больше различаются соотношения токов проводимости и сме-

щения в подстилающем и перекрывающем горизонтах. С повышением частоты, по мере уменьшения влияния подстилающего горизонта, амплитуда осцилляции уменьшается. Местоположение и протяженность участков перехода, относительно частотной оси, а также период и амплитуда осцилляций определяются мощностью и электрическими параметрами подстилающих и перекрывающих горизонтов, участ-

вующих в формировании структуры поля в данном частотном диапазоне. То же самое относится и к кривым $\arg \delta$. Однако в данном случае характерна принадлежность значений $\arg \delta$ к областям, соответствующим слабо- или сильноиндуктивным средам. Следует отметить, что ярко выраженная осцилляция значений модуля и аргумента поверхностного импеданса наблюдается тогда, когда в верхнем слое преобладают токи смещения, а в нижнем – токи проводимости. Наличие в верхней части мерзлой толщи проводящего сезонно-талого слоя приводит к изменению соотношения токов проводимости и смещения в толще рыхлых отложений, составленной мерзлыми и тальми породами, которое, в свою очередь, приводит к уменьшению амплитуды осцилляций, либо устраняет их.

Таким образом характер изменения формы частотных кривых модуля и аргумента импеданса с повышением частоты объясняется переходом от значений, соответствующих импедансу однородного полупространства с электрическими параметрами подстилающего горизонта, к значениям, соответствующим импедансу перекрывающего. Переход сопровождается осцилляцией значений с периодом и амплитудой, зависящими от различия соотношений токов проводимости и смещения в подстилающем и перекрывающем горизонтах, а также от их мощности.

Частотная зависимость модуля импеданса мерзлой толщи имеет следующие характерные участки (частотные интервалы приведены ориентировочно для распространенных значений УЭС слоев):

- очень низкочастотная асимптотика ($f < 1$ кГц), определяемая УЭС горизонта тальных скальных пород;
- низкочастотная переходная область (1...10 кГц);
- низкочастотная асимптотика (10...30 кГц), определяемая УЭС горизонта мерзлых скальных пород и мощностью мерзлоты;
- среднечастотная переходная область (30...100 кГц);
- среднечастотная асимптотика (100...1000 кГц), определяемая УЭС и мощностью мерзлых рыхлых отложений;
- высокочастотная переходная область (1...10 МГц), отличающаяся ярко выраженной осцил-

ляцией значений и выходом на горизонтальную асимптоту;

– высокочастотная горизонтальная асимптотика (10...100 МГц) на уровне, определяемом диэлектрической проницаемостью верхнего слоя, и на который выходят затухающие осцилляции.

Электрические свойства мерзлых скальных пород могут определять величину поверхностного импеданса на средних частотах при незначительной мощности рыхлых отложений или при наличии значительного по продольной проводимости сезонно-талого слоя, компенсирующего их влияние.

Влияние горизонта мерзлых рыхлых отложений проявляется на частотах 1...1000 кГц в увеличении модуля поверхностного импеданса и сдвиге его аргумента в область значений $-46...-89^\circ$, характерных для сильноиндуктивной подстилающей среды, а на частотах выше 1 МГц в появлении значительной осцилляции значений, затухающей с дальнейшим повышением частоты. Осцилляции на частотах ниже 1 МГц могут появиться при сочетании большой мощности горизонта мерзлых рыхлых отложений (более 20 м) с его высоким УЭС (десять тысяч Ом · м). Приблизленно влияние мерзлых рыхлых отложений на модуль приведенного поверхностного импеданса можно оценить выражением

$$\Delta|\delta|_{MPO} = 1,5 \cdot 10^{-5} f (\text{кГц}) \cdot h (\text{м}).$$

Сезонно-талый слой компенсирует влияние мерзлых рыхлых отложений в степени, определяемой его продольной проводимостью, уменьшая, тем самым, амплитуду осцилляций либо устраняя их вовсе. Приблизленно влияние сезонно-талого слоя на модуль приведенного поверхностного импеданса можно оценить выражением

$$\Delta|\delta|_{CTC} = 1,28 \cdot 10^{-5} f \cdot \rho_3 \cdot h_1 / \rho_1.$$

Значительное влияние на поверхностный импеданс мерзлой толщи оказывает тонкий проводящий слой, представляемый межмерзлотными таликами, водоносными горизонтами, криопэгами, засоленными отложениями. Его влияние особенно велико на средних частотах (30...3000 кГц) и может быть значительным даже при малой толщине (порядка 10 см). Влияние проявляется в уменьшении модуля импеданса и сдвиге значений его аргумента в сильноиндуктивную область ($-46...-89^\circ$).

Плохопроводящий промежуточный слой в

горизонте рыхлых отложений, представляемый сильнольдистыми отложениями и подземными льдами, оказывает значительное влияние на поверхностный импеданс в диапазонах средних и высоких частот при малой глубине залегания (до 10 м). Его влияние проявляется в увеличении модуля импеданса прямо пропорционально мощности слоя, сдвиге значений его аргумента в сторону сильноиндуктивной области на средних частотах и в сторону слабоиндуктивной области на высоких частотах. Сочетание высоких значений удельного электрического сопротивления мощных мерзлых рыхлых отложений с низкими значениями УЭС подстилающего тонкого проводящего слоя может привести к осцилляции частотной зависимости поверхностного импеданса на средних частотах.

На практике, при радиоимпедансном зондировании, используется диапазон 10...1000 кГц, для которого характерны низкочастотная и среднечастотная асимптотики частотной зависимости модуля импеданса.

Наличие среднечастотной асимптотики позволило вывести следующие формулы для приближенной оценки величины УЭС и глубины залегания проводящего горизонта в мерзлой толще для двухслойной модели по измерениям модуля импеданса на двух частотах ($f_1 > f_2$):

$$\rho_n = \frac{1,8 \cdot 10^7}{f_1 \cdot f_2} \left(\frac{f_1/\delta_2 - f_2/\delta_1}{\sqrt{f_1} - \sqrt{f_2}} \right)^2, \quad (6)$$

$$h_g = \frac{6,67 \cdot 10^4 (\Delta\delta_{изм} - \Delta\delta_n)}{f_1 - f_2}, \quad (7)$$

где

$$\Delta|\delta|_{изм} = |\delta|_1 - |\delta|_2;$$

$$\Delta|\delta|_n = \sqrt{\frac{f_1 \rho_n}{1,8 \cdot 10^7}} + \sqrt{\frac{f_2 \rho_n}{1,8 \cdot 10^7}}.$$

В области низкочастотной асимптотики формулы (6, 7) можно применить для приближенной оценки мощности многолетней мерзлоты и УЭС подмерзлотного горизонта.

Для трехслойной модели, включающей опорный горизонт МСП и перекрывающие горизонты МРО и СТС, используя низкочастотную и среднечастотную асимптотики, с помощью формулы (6) можно приближенно оценить величину УЭС горизонта мерзлых скальных пород по значениям

модуля импеданса, измеренным на двух частотах диапазона 10...300 кГц, различающихся по величине более чем в 1,5 раза.

Полученные в результате численного моделирования приближенные оценки влияния слоев и формулы для определения параметров отдельных горизонтов позволяют использовать метод снятия слоев при интерпретации данных радиоимпедансного экспресс-зондирования. Учитывая вполне определенное влияние основных горизонтов на величину поверхностного импеданса мерзлых толщ, обратная задача может решаться последовательным устранением известного влияния на измеряемую эффективную величину поверхностного импеданса слоев, перекрывающих и подстилающих исследуемый горизонт (после оценки их параметров). Выделив, таким образом, импеданс исследуемого горизонта, можно определить его электрические свойства. Применяя современный портативный компьютер, можно провести обработку данных измерений и их автоматическую интерпретацию с использованием формул приближенной оценки в режиме реального времени на пункте измерений. Это дает возможность применить новые возможности электроразведочного профилирования. Вместо традиционного профилирования по измеряемому эффективному параметру можно проводить профилирование по исследуемому параметру, например по величине удельного электрического сопротивления горизонта мерзлых рыхлых отложений. Кроме того, моментальная интерпретация дает возможность во время проведения работ на исследуемом участке скорректировать их детальность или дальнейшее продолжение профиля.

Результаты интерпретации данных многочисленных радиоимпедансных зондирований, проведенных на территории Центральной Якутии, позволяют уточнить геоэлектрическое строение данной территории. Геоэлектрический разрез мерзлой толщи Центральной Якутии по результатам радиоимпедансного зондирования представляется следующим:

- верхний сезонно-талый (с апреля по октябрь) слой рыхлых отложений – мощность 0...5 м, УЭС в пределах 20...60 Ом · м для тонкодисперсных и 100...500 Ом · м для грубодисперсных отложений;
- верхний сезонно-мерзлый (с ноября по март) слой рыхлых отложений – мощность 0...5 м, УЭС в пределах 80...300 Ом · м для тонкодисперсных

и 200...1000 Ом·м для грубодисперсных отложений;

- промежуточный многолетнемерзлый слой рыхлых отложений с годовыми колебаниями УЭС (температуры) – мощность 2...4 м, УЭС $10^2...10^4$ Ом·м;

- промежуточный сильнольдистый слой рыхлых отложений или слой льда (тонкий плохопроводящий слой) – мощность 0...10 м, УЭС $10^3...10^5$ Ом·м;

- промежуточный пластично-мерзлый или талый слой рыхлых отложений (тонкий проводящий слой) – мощность 0...5 м, УЭС 20...80 Ом·м;

- средний многолетнемерзлый слой рыхлых отложений – мощность 1...100 м, УЭС $10^3...10^4$ Ом·м;

- опорный слой мерзлых скальных пород с УЭС 200...5000 Ом·м.

Здесь предполагается, что в Центральной Якутии мощность мерзлой толщи превышает глубину радиоимпедансного зондирования на нижней частоте.

Как показали результаты радиоимпедансных зондирований, промерзший сезонно-талый слой может отличаться от многолетнемерзлого гори-

зонта меньшим значением УЭС [2], поэтому он показан отдельно в геоэлектрическом разрезе.

Многолетнемерзлый слой рыхлых отложений с годовыми колебаниями УЭС выделен нами по результатам исследования сезонных вариаций поверхностного импеданса на открытой и покрытой лесом площадках (рис. 2). На открытой площадке измеренный модуль импеданса в большей степени подвержен сезонным вариациям, чем на залесенной. Рассчитанное по нему эффективное сопротивление с промерзанием грунта продолжает расти до конца апреля, т.е. до того времени, когда начинает появляться сезонно-талый слой, но еще продолжается охлаждение слоя годовых теплооборотов грунта, приводящее к увеличению его УЭС. В мае увеличение глубины протаивания, совместно с повышением температуры слоя годовых теплооборотов, приводит к резкому снижению эффективного сопротивления грунта. Изменения величины эффективного сопротивления незначительны в период с августа до первой половины ноября, а со второй половины ноября начинается его рост, определяемый совместным действием промерзания сезонно-талого слоя и охлаждением мерзлого слоя годовых теплооборотов.

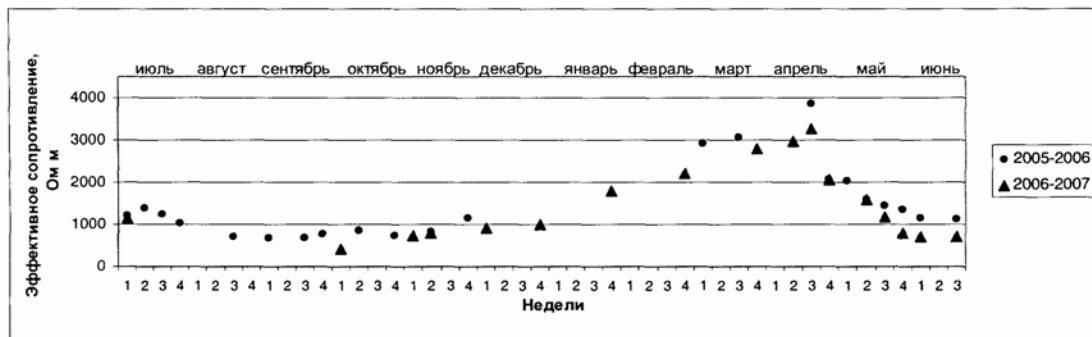


Рис. 2. Сезонные вариации эффективного сопротивления на частоте 549 кГц многолетнемерзлого грунта открытой площадки

Образование тонкого проводящего слоя в многолетнемерзлом грунте может быть вызвано различными причинами [2]. Так, к образованиям, представляющим тонкие проводящие слои в многолетнемерзлом грунте, относятся следующие: межмерзлотные талики и таликовые пресные воды; засоленные отложения и криопэги; глинистые и суглинистые отложения в условиях

высокотемпературной мерзлоты; органогенные отложения.

Тонкие плохопроводящие слои, представленные сильнольдистыми отложениями и подземными льдами, образуются в основном в области распространения пород ледового комплекса.

Представленный материал можно дополнить следующими выводами:

1. Предложенное деление кривых зависимостей модуля и аргумента импеданса мерзлой толщи от частоты в диапазоне $10^{-1} \dots 10^5$ кГц на отдельные переходные и асимптотические участки способствует лучшему пониманию характера изменения кривых в тех фрагментах, с которыми могут иметь дело исследователи. Кроме того, это деление может быть использовано при планировании эксперимента и выборе частотного поддиапазона для исследования отдельных параметров геоэлектрического строения, а также для выбора способов интерпретации.

2. Полученные приближенные оценки влияния отдельных горизонтов мерзлой толщи на поверхностный импеданс и соотношения для определения некоторых их параметров можно использовать для облегчения, ускорения и автоматизации процесса интерпретации.

3. Значительное влияние на поверхностный импеданс мерзлой толщи, кроме сезонно-талого слоя, тонких проводящих и плохопроводящих слоев, имеет слой годовых изменений электрического сопротивления, расположенный под деятельным слоем и соответствующий известному слою годовых теплооборотов. С учетом его влияния электроразведочные работы рекомендуется проводить в период с августа по октябрь.

Литература

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972. – 336 с.
2. Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых земных покровов // Наука и образование. – 2006. – № 4 (44). – С. 83–89.



УДК 550.42:541.183

Жидкоподобная пленка на поверхности льда как среда миграции растворимых химических веществ*

О.В. Минликаева

Существование жидкоподобной пленки на поверхности льда в настоящее время является общепризнанным фактом. Однако свойства жидкоподобной пленки на поверхности льда, ее роль в переносе химических веществ практически не изучены. Очевидна необходимость проведения физико-химических экспериментов для определения ее характерных свойств, что позволит дать оценку роли поверхности льда в миграции химических веществ в мерзлых системах.

Existence of a similar liquid of a film on a surface of ice now is the conventional fact. However properties of a similar liquid of a film on surfaces of ice, its role in carry of chemical substances practically are not investigated. Necessity of carrying out of physical and chemical experiments is obvious to definition of its characteristic properties that will allow assessing a role of a surface of ice in migration of chemical substances in frozen systems.

Одной из главных задач в геохимии мерзлых пород является изучение характера миграции ионов, формирующих геохимические ореолы рассеяния элементов-индикаторов месторождений полезных ископаемых, а также элементов-загрязнителей природной среды. Важная роль в

распространении элементов в грунтовых массах принадлежит диффузии вещества по жидким пленкам поровых растворов, особенно в многолетнемерзлых породах, где нет напорного перемещения поровой влаги. В таких породах могут присутствовать два типа прослоек незамерзшей воды. Это могут быть растворы с первоначально высоким содержанием солей, когда количество незамерзшей воды определяется их качествен-

МИНЛИКАЕВА Оксана Викторовна – соискатель ИМЗ СО РАН.

*Статья принята к печати 27 декабря 2006 г.