

# ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И НАЛЕДИ

УДК 550.370+550.379

doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-81-92

## Оценка объёмной льдистости дисперсных грунтов Центрально-Якутской низменности по данным георадиолокации

© 2019 г. Л.Г. Нерадовский

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

## The GPR-based estimation of the volumetric ice content of dispersed ground in the Central Yakut lowland

L.G. Neradovsky

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia  
leoner@mpi.ysn.ru*Received February 15, 2018 / Revised July 19, 2018 / Accepted October 16, 2018***Keywords:** *annual heat flows layer, Central Yakutia lowland, dispersed frozen ground, ground-penetration radar data, volume ice content.*

### Summary

The previously unknown dependence between the volume ice content of frozen dispersed soils and their radiophysical properties (the speed of propagation and specific attenuation of the amplitude of electromagnetic waves) was studied in the layer of annual heat flows of Central Yakutia. The correlation between these characteristics determined in the laboratory and the method of discrete georadiolocation is established. The peculiarity of the connection is the sharp decline in the sensitivity of the propagation speed and the specific attenuation of electromagnetic waves in frozen dispersed soils with high volume ice content (more than 60%). In general, the specific attenuation of electromagnetic waves is more responsive to the change in the volume of ice content of frozen dispersed soils and, thus, it is more preferable to solve the problem of quantitative evaluation of this characteristic. The proposed method of reusable measurements of signals of georadiolocation with changing position and azimuth of antennas of georadars in the vicinity of the network points of geological and geophysical observations allows to estimate the average values of the propagation speed and specific attenuation of electromagnetic waves with an error of not more than 10%. Due to this, according to the equations of logistic functions it is possible to calculate the average values of volume ice content with an error of 7–11%. With this error, the picture of the probability distribution according to the georadiolocation values of the volume ice content in the averages is completely identical to the laboratory data. On this basis, the found regression equations are recommended to be used for the calculation of the speed of propagation and specific attenuation of electromagnetic waves of background or average values of the volume ice content of frozen dispersed soils of the annual heat transfer layer in any part of the ice complex of the Central Yakut lowland.

**Citation:** Neradovsky L.G. The GPR-based estimation of the volumetric ice content of dispersed ground in the Central Yakut lowland. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (1): 81–92. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-81-92.

*Поступила 15 февраля 2018 г. / После доработки 19 июля 2018 г. / Принята к печати 16 октября 2018 г.*

**Ключевые слова:** *георадиолокация, мёрзлые дисперсные грунты, объёмная льдистость, слой годового теплооборота, Центрально-Якутская низменность.*

Установлена достаточно тесная корреляционная связь между объёмной льдистостью и радиофизическими свойствами мёрзлых дисперсных грунтов в слое годового теплооборота, позволяющая вычислить средние значения объёмной льдистости с ошибкой 7–11%. Это даёт возможность использовать предлагаемые уравнения регрессии для расчёта фоновых значений объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов по их радиофизическим свойствам в слое годовых теплооборотов.

### Введение

Изучение льдистости горных пород, используемых в качестве грунтовых оснований фундаментов инженерных сооружений, — актуальная задача инженерного мерзлотоведения при изучении

инженерно-геологических условий строительства инженерных объектов в криолитозоне России. Труднодоступность этой обширной территории с суровыми климатическими условиями создаёт серьёзные препятствия при организации и проведении инженерно-геологических изысканий с бу-

рением, термометрией скважин и лабораторным опробованием мёрзлых грунтов. В таких условиях важны методы геоэлектрики, к которым относится и метод георадиолокации. Однако в силу разных причин петрофизический потенциал метода при сравнении с хорошо известными картографическими возможностями пока изучен недостаточно.

Цель работы — ознакомить специалистов с результатами обобщения экспериментальных данных по Центрально-Якутской низменности, полученных методом дискретной георадиолокации в точках бурения инженерно-геологических скважин с помощью ранее не известной зависимости усреднённых в слое годового теплооборота характеристик радиофизических и физических свойств мёрзлых дисперсных грунтов. К радиофизическим свойствам мёрзлых дисперсных грунтов относятся скорость распространения (далее скорость) и удельное затухание амплитуды (далее затухание) электромагнитных волн. Базовая характеристика физических свойств мёрзлых дисперсных грунтов — объёмная льдистость.

Обобщение экспериментальных данных предусматривало изучение следующих позиций: а) законов вероятностного распределения средних или, как их называют в грунтоведении, нормативных значений скорости и затухания электромагнитных волн, а также объёмной льдистости на исследуемой нами площади Центрально-Якутской низменности; б) формы эмпирической зависимости скорости и затухания электромагнитных волн от объёмной льдистости в их парных корреляционных отношениях; в) вопроса погрешности количественной оценки в слое годовых теплооборотов средних значений объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов в зависимости от средних значений скорости и затухания электромагнитных волн, определённых методом георадиолокации по новой методике многократных измерений в окрестностях точек сети геолого-геофизических наблюдений, времени задержки и амплитуды радиоотражений, наблюдаемых в сигналах георадиолокации.

### Район исследований

Исследования выполнялись в 1985–1989 гг. Якутским трестом инженерно-строительных изысканий (ЯкутГИСИЗ) под проекты генпланов и детальной планировки сёл и посёлков Цен-

тральной Якутии. Эти населённые пункты расположены преимущественно на правом берегу долины р. Лена, на площади Лено-Амгинского и Лено-Алданского междуречий, которые относятся к обширной территории аласной провинции Центрально-Якутской низменности, где широко развит ледовый комплекс. В формулировке П.А. Соловьева комплекс представляет «особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащеобразно залегающий на обширных участках Центрально-Якутской низменности, но неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности» [1]. Согласно геологическим исследованиям, ледовый комплекс Центрально-Якутской низменности сложен мёрзлой толщей кайнозоя преимущественно аллювиального генезиса, которая повсеместно перекрывает коренное основание долины р. Лена из палеозойских и мезозойских пород. Мощность аллювия изменчива и при среднем значении около 20–30 м в углублениях кровли коренных пород может достигать 60–100 и 200–300 м.

По данным ЯкутГИСИЗ, верхняя часть верхнечетвертичных отложений, распространённых на площади населённых пунктов Центральной Якутии, сложена до изученной глубины 10–20 м дисперсными грунтами с закономерной фациальной сменой суглинков, супесей, пылеватых мелко-, средне- и крупнозернистых песков с повсеместным включением растительных остатков и илистых частиц. Ниже залегают маркерный слой гравийно-галечниковых отложений. На этом фоне материнской средой для залежей ископаемых льдов повторно-жильного генезиса служат участки, сложенные толщей глинистых грунтов озёрно-болотного генезиса с доминированием лёссовидных суглинков серого или тёмно-коричневого цвета. Залежи повторно-жильных льдов (ПЖЛ) встречаются и в песках, но гораздо реже. Согласно существующим геохронологическим представлениям, ПЖЛ и вмещающие отложения ледового комплекса образовались в каргинское (МИС-3) и сартанское (МИС-2) время позднего плейстоцена. За длительный период своего существования в условиях экзогенного и эндогенного криогенного метаморфизма изначально строгая полигональная трещинно-жильная структура, наблюдаемая для молодых ПЖЛ на дневной поверхности, была нарушена и покрыта слоем наносов. На

Лено-Амгинском междуречье положение верхней границы ПЖЛ чаще всего находится на глубине 1,5–3,0 м с отклонением в меньшую (1,0–1,2 м) или большую сторону (4–5 м). Положение нижней границы очень изменчиво, но обычная глубина её залегания составляет 9–12 м.

Общая статистика по источникам, собранным в работе П.А. Соловьева, показывает, что на Лено-Амгинском междуречье мощность ледового комплекса с залежами ПЖЛ распределена по вероятностному закону Гаусса в диапазоне 5–60 м со средним значением  $30 \pm 7,6$  м на уровне доверительной вероятности 95%. Показатель видимого содержания в керне количества ледяных включений  $I_i$  часто превышал 0,4 дол. ед. В таких случаях грунты классифицируются как льдистые [2], хотя в предыдущих версиях стандартов (ГОСТ 25100–95 и ГОСТ 25100–82) их считали сильно льдистыми грунтами и ледогрунтами, что более соответствует их внешнему облику в образцах керна. Суммарная сегрегационная (текстурная) и структурная (залежи льдов) объёмная льдистость может быть очень высокой на возвышенных участках рельефа с сохранившимися залежами ПЖЛ, достигая 70–90%. В понижениях рельефа, представленных озёрно-аласовыми котловинами, грунты, как правило, сложены слабольдистыми или нельдистыми засоленными гумусированными супесями, суглинками и илами. Однако и здесь возможно присутствие в разрезе сохранившихся фрагментов древних залежей ПЖЛ.

По данным И.Н. Вотякова, на площади Центральной Якутии влажность мёрзлых грунтов песчано-глинистого состава изменяется от 12–18% у крупнозернистых песков до 30–60% у суглинков и озёрных пылевато-илистых отложений аласов [3]. При этом соблюдается известная закономерность: чем дисперснее грунты, тем более они засолены легкорастворимыми солями. Район исследований относится к области сплошного распространения многолетне-мёрзлых пород. Их средняя мощность на южной окраине Центрально-Якутской низменности – Лено-Амгинском междуречье, которое В.М. Калинин и В.С. Якупов называют Нижнеалданской равниной, с вероятностью 95% равна  $360 \pm 43$  м [4]. По данным многочисленных проектно-изыскательских работ температура мёрзлых дисперсных грунтов Централь-

но-Якутской равнины в нижней части слоя годового теплооборота на глубине 10 м варьирует от  $-0,7$  до  $-4,1$  °С при среднем значении  $-2,0$  °С. По данным Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН) осреднённый температурный режим мёрзлых грунтов на этой глубине в районе г. Якутск и прилегающих к нему правобережных Бестяхской, Тюнгюлюнской, Абалахской, Маганской террас долины р. Лена несколько ниже и составляет  $-2,4 \div -3,5$  °С [5].

### Материалы и методика исследований

Фактический материал исследований получен при личном участии автора настоящей работы в ходе проведения в 1985–1991 гг. опытно-методических работ методом дискретной георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях ЯкутГИСИЗ в Центральной Якутии. Обобщение и статистическая обработка фактического материала выполнены в ИМЗ СО РАН. Из большого числа объектов изысканий использованы лишь те объекты, по которым был сохранён фактический материал, полученный при изысканиях под проекты генеральных планов и детальной планировки населённых пунктов Центральной Якутии. Общая выборочная совокупность фактического материала составила 159 значений скорости затухания и объёмной льдистости, полученных по результатам параметрического георадиолокационного зондирования слоя годового теплооборота в точках колонковых инженерно-геологических скважин, пробуренных с отбором из керна грунтовых проб на лабораторный анализ показателей свойств мёрзлых грунтов.

Геологическая характеристика представлена средними лабораторными значениями объёмной льдистости  $L_{ob}$  (%), а геофизические характеристики – средними значениями скорости  $V$  (м/нс) и затухания  $G$  (дБ/м) электромагнитных волн. Совокупность из 159 значений независимой переменной  $L_{ob}$  и двух зависимых переменных  $V$  и  $G$  служила исходным материалом для комплексной статистической обработки с использованием программы «STADIA» [6]. Значения суммарной влажности и объёмной массы мёрзлого грунта, необходимые для вычисления объёмной льдистости  $L_{ob}$ , определялись в лабо-

ратории способом высушивания по ГОСТ 5180–84 [7]. Пробы грунтов отбирали из керна скважин равномерно по глубине. Расстояние между участками отбора проб равно 1 м, как и расстояние между измерением температуры грунтов ртутными «заленивленными» термометрами.

Значения показателя объёмной льдистости  $L_{ob}$  вычислялись по известной в мерзлотоведении и грунтоведении формуле И.Н. Вотякова [3]:

$$L_{ob} = \frac{\gamma_{ск} W_{tot}}{0,9} 100, \%,$$

где  $\gamma_{ск}$  – объёмная масса минерального скелета мёрзлого грунта, г/см<sup>3</sup>;  $W_{tot}$  – суммарная влажность, %; 0,9 – объёмная масса льда, г/см<sup>3</sup>.

По совокупности значений  $L_{ob}$ , вычисленных по формуле (1), находили средние медианные значения  $L_{ob}$  для всего слоя годовых теплооборотов, изученного скважинами в основном до глубины 10–15 м. Использование вместо средних арифметических значений медианные объясняется следующим. В небольших выборках исходных данных эта метрика непараметрического, т.е. любого вероятностного распределения не подчиняющегося закону Гаусса, исключительно устойчива к искажению, сдвигу истинного местоположения середины вариационного ряда исследуемых величин. Обычно это происходит в результате случайного появления в выборке исходных данных единичных аномально высоких или низких значений.

Значения  $V$  и  $G$  определялись для каждой скважины по результатам параметрических измерений аппаратурой «17ГРЛ-1» в сигналах георадиолокации времени задержки и амплитуды радиоотражений от границ слоёв мёрзлых грунтов в пределах исследуемого слоя годовых теплооборотов. Он интересен для исследований тем, что в нём постоянно происходят сложнейшие и пока слабо-изученные процессы теплового, механического и химического взаимодействия фундаментов инженерных сооружений с мёрзлым грунтовым основанием. Что касается аппаратуры «17ГРЛ-1», то её передающая и приёмная антенны работали в полосе частот 30–150 МГц. Центральную частоту спектра излучения-приёма электромагнитных волн изготовители аппаратуры не указывают.

В отличие от методики непрерывной одно-разовой записи сигналов дискретной георадиолокации в виде радарограмм [8], применялась

более сложная и трудоёмкая методика много-разовых измерений сигналов георадиолокации с изменением положения и азимута приёмно-передающих антенн в окрестности точек поисково-разведочной сети геолого-геофизических наблюдений [9]. Методика последовательно разрабатывалась автором на протяжении многих лет сначала в ЯкутГИСИЗ, а затем в ИМЗ СО РАН с целью более достоверного и всестороннего изучения методом дискретной георадиолокации в природных условиях и на застроенных территориях сложных неоднородных анизотропных геологических сред. В частности, мёрзлых дисперсных грунтов, которым особенно присущи качества анизотропии. Подробное описание методики многоразовых измерений изложено в патенте [9] и методическом руководстве [10].

Первым в нашей стране методику много-разовых измерений сигналов дискретной георадиолокации предложил в 1968 г. Л.А. Суханов и успешно испытал её в Приэльбрусье для определения мощности ледника Джанкуат с очень сложным строением и тепловым состоянием [11]. В этой методике результат действия стохастической природы георадиолокации, выражаемый в непредсказуемой случайной флуктуации значений амплитудно-фазовых характеристик, частично подавлялся путём наложения зарисовок на одну и ту же кальку (прозрачную бумагу) осциллограмм эхо-сигналов, полученных при разнесении одной антенны относительно другой с шагом 0,4 м на расстояние до 8 м [11]. Какая антенна была неподвижной, а какая перемещалась, в работе не уточнено. Стохастическая природа сигналов георадиолокации также нашла своё экспериментальное подтверждение в 1975 г. в работе В.В. Богородского. В ней предлагалось при наземном изучении методом георадиолокации ледниковых покровов в Антарктиде и Арктике использовать методы математической статистики и теории вероятности для подавления амплитудных флуктуаций импульсов, отражённых от границы соприкосновения ледников с ложем коренных пород, [12].

В нашем случае для изучения зависимости объёмной льдистости от скорости и затухания электромагнитных волн в окрестности точек скважин время задержки и амплитуда радиоотражений в сигналах георадиолокации измерялись аппаратурой «17ГРЛ-1» по 36 раз с перемещением

излучающей и приёмной антенн по линии окружности радиусом не более 5 м. При таком числе измерений относительная погрешность определения средних значений  $V$  и  $G$  не превышает 10% для инженерно-геологических условий Центрально-Якутской низменности [10].

Математическая обработка и геологическая интерпретация многоазовых измерений сигналов георадиолокации основываются на последовательном построении и анализе разного уровня обобщения физико-геокриологических моделей (ФГКМ) мёрзлых грунтов. На начальном этапе с помощью ФГКМ высокого уровня обобщения для региона или района работ выявляются геокриологические и геофизические закономерные особенности общего строения мёрзлых грунтов. На последующих этапах с помощью построения ФГКМ конкретного участка работ или серии отдельных скважин на фоне закономерностей выделяются и изучаются детали строения мёрзлых грунтов вместе с локальными особенностями формирования на их структурно-петрофизических границах геофизических полей.

Главное при обработке и интерпретации многоазовых измерений сигналов георадиолокации – идентификация в поле случайных амплитудно-фазовых вариаций радиоотражений когерентных импульсов, которые при любом расположении на поверхности Земли приёмно-передающих антенн георадара образуются на опорных радиоконтрастных границах инженерно-геологического разреза. Протяжённость таких плоских границ, как показывает опыт георадиолокации, должна не менее чем в 10–15 раз превышать длину электромагнитной волны. Опорной границей, применительно к задачам настоящей работы, в толще мёрзлых дисперсных грунтов песчано-глинистого состава, формирующей когерентные радиоотражения, служит нижняя граница слоя годовых теплооборотов. На этой границе происходит смена быстрой изменчивости температуры мёрзлых грунтов в верхней части слоя годовых теплооборотов на практически неизменную температуру мёрзлых грунтов (в пределах погрешности измерения  $\pm 0,1$  °C) в нижней части этого слоя. Эта граница на Центрально-Якутской низменности залегает на глубине не более 10–15 м с отклонением в меньшую сторону до 5–8 м.

Зная глубину залегания нижней границы слоя годового теплооборота и координаты от-

ражённых от неё когерентных импульсов, обнаруженных по результатам многоазовых измерений сигналов георадиолокации, средние значения  $V$  и  $G$  вычисляем по формулам

$$V = H/\tau \text{ и } G = (A_0 - A_{sgt})/H,$$

где  $V$  и  $G$  – соответственно скорость и затухание электромагнитных волн в слое годового теплооборота, м/нс и дБ/м;  $H$  – мощность слоя годового теплооборота, м;  $\tau$  и  $A_{sgt}$  – соответственно прямое время задержки и амплитуда когерентных импульсов, отражённых от нижней границы слоя годового теплооборота, нс и дБ;  $A_0$  – амплитуда начального (зондирующего) импульса, излучённого передающей антенной георадара, дБ.

Общая процедура построения ФГКМ, поиска когерентных импульсов и определение по их координатам (времени задержки и амплитуде) послойных, интервальных или общих по всему инженерно-геологическому разрезу средних значений  $V$  и  $G$  подробно описана в патенте [9] и методическом руководстве [10].

### Обсуждение результатов исследований

Статистика выборочной совокупности фактического материала исследований, состоящая из 159 значений геолого-геофизических характеристик мёрзлых дисперсных грунтов, приведена в табл. 1 и проиллюстрирована гистограммами вероятностных распределений этих характеристик (рис. 1). Очевидно, что собранный фактический материал, хотя и удовлетворяет по числу наблюдений проведению статистического анализа и принятию корректных решений, но, за исключением объёмной льдистости, не подчиняется теоретическому закону нормального распределения (закону Гаусса). Из этого следует, что средним арифметическим можно пользоваться только для объёмной льдистости. В условиях непараметрического вероятностного распределения значений скорости и затухания электромагнитных волн место метрики среднего арифметического значения занимает универсальная по своим статистическим свойствам метрика среднего медианного значения.

С учётом сказанного изученная территория Центрально-Якутской низменности имеет следующие обобщённые или нормативные оценки

Таблица 1. Статистика геолого-геофизических характеристик мёрзлых дисперсных грунтов слоя годового теплооборота Центрально-Якутской низменности\*

Статистика характеристик	Объёмная льдистость $L_{ob}$ , %	Скорость электромагнитных волн $V$ , м/нс	Затухание электромагнитных волн $G$ , дБ/м
Среднее арифметическое	60,7	0,151	1,16
Медианное среднее	59,0	0,154	1,02
Модальное среднее	60,0	0,147	1,31
Стандартное отклонение	16,4	0,013	0,66
Минимальное значение	29,0	0,120	0,13
Максимальное значение	100,0	0,174	3,30
Коэффициент вариации, %	27,0	8,70	57,4
Уровень доверия 95%	2,6	0,002	0,11

\*Число скважин – 159.

геолого-геофизических характеристик мёрзлых дисперсных грунтов в слое годового теплооборота: среднее арифметическое значение объёмной льдистости  $60,7 \pm 2,6\%$  (уровень доверия 95%) и средние медианные значения скорости и затухания соответственно 0,154 м/нс и 1,02 дБ/м (см. табл. 1). Чаще всего значения скорости распределены в интервале 0,140–0,170 м/нс (в 75% случаев), а значения затухания – в интервале 0,5–1,5 дБ/м (в 65% случаев). Низкие (менее 0,120 м/нс) и высокие (более 0,170 м/нс) значения скорости – редкие события и в совокупности встречаются с вероятностью не более 5% (см. рис. 1, б и в). Затухание отличается максимальной динамикой площадной изменчивости (коэффициент вариации 57,4%) и склонностью к большей вероятности (14%) появления низких значений (менее 0,5 дБ/м), чем высоких (более 2,5 дБ/м), с общей вероятностью 5%.

Высокая пространственная изменчивость затухания по сравнению со скоростью, у которой коэффициент вариации не превышает 10%, косвенно означает большую информационную ёмкость затухания и свидетельствует о её чувствительности к изменению всего внутреннего облика мёрзлых дисперсных грунтов, слагающих слой годового теплооборота. Природная изменчивость объёмной льдистости, оцениваемая по коэффициенту вариации, не так высока, как у затухания, но существенно выше, чем у скорости, и составляет 27%. В большинстве случаев (77%) значения  $L_{ob}$  сосредоточены в интервале 40–80%

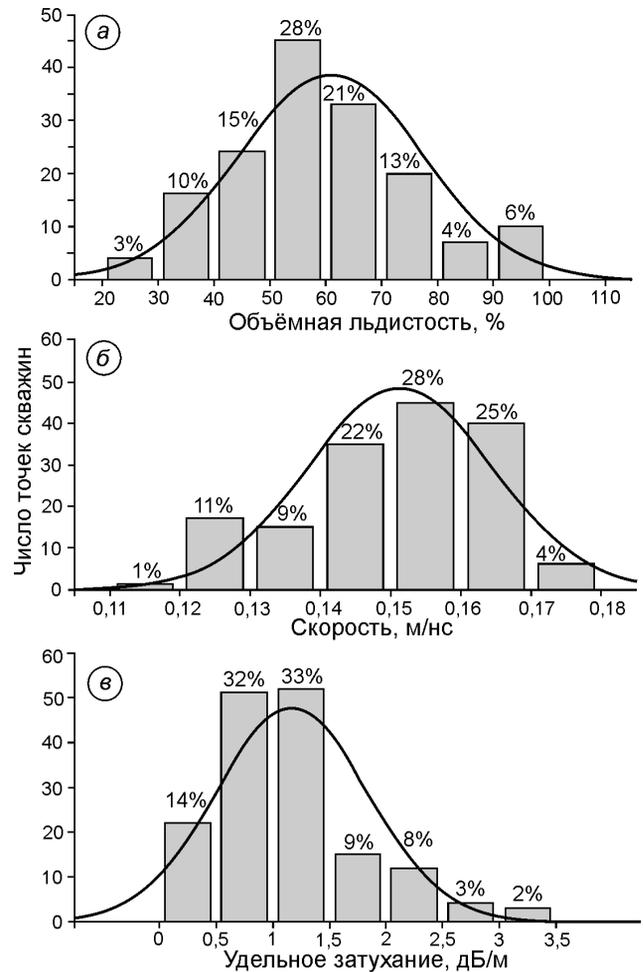


Рис. 1. Гистограммы геолого-геофизических характеристик в слое годового теплооборота Центрально-Якутской низменности:

а – объёмная льдистость мёрзлых дисперсных грунтов песчано-глинистого состава; б, в – скорость и затухание амплитуды электромагнитных волн; кривые красного цвета означают значения теоретической плотности нормального вероятностного распределения, аппроксимирующего эмпирические вероятностные распределения

Fig. 1. Histograms of geological and geophysical characteristics in the layer of annual heat flow of the Central Yakut lowland:

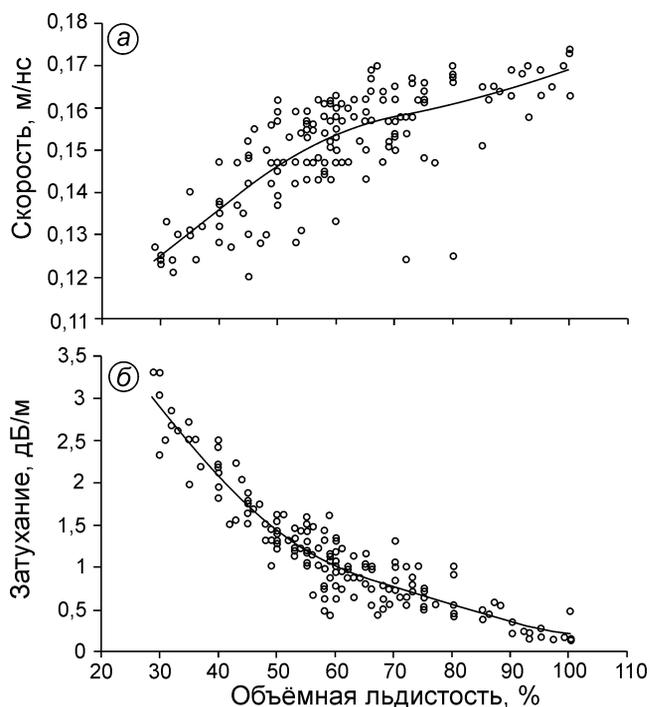
а – volume ice content of frozen dispersed soils of sandy-clay composition; б, в – speed and attenuation of the amplitude of electromagnetic waves; the red curves indicate the values of the theoretical density of the normal probable distribution approximating the empirical probable distributions

с максимумом встречаемости (28%) в узкой полосе значений 50–60% (см. рис. 1, а). Встреча в слое годового теплооборота слабольдистых грунтов ( $L_{ob} = 20 \div 30\%$ ) и грунтов с очень высокой льдистостью ( $L_{ob} = 80 \div 90\%$ ) равновероятна и составляет 3–4%. Залежи ПЖЛ, пронизывающие

весь слой годового теплооборота и повышающие его объёмную льдистость до максимально возможных значений 80–100%, вскрываются скважинами с вероятностью 6%. Такие редкие события и особенно встреча значений объёмной льдистости равной 100% происходят в тех случаях, когда скважины при бурении слоя годового теплооборота случайно обнаруживают скопление залежей, а также единственную залежь ПЖЛ или пластовых льдов, вскрывая их на полную мощность от верхней до нижней границы.

Считая  $L_{ob}$  итоговым выражением показателя видимых включений льда в керне  $I_l$ , приходим к выводу, что слой годового теплооборота изученной части Центрально-Якутской низменности преимущественно сложен, согласно классификации ГОСТ 25100–95, сильно льдистыми и очень сильно льдистыми мёрзлыми дисперсными грунтами. Их наиболее часто встречаемые значения  $L_{ob} = 40 \div 80\%$  рекомендуется рассматривать как фоновые интервальные значения для всей низменности. Средние значения скорости распространения и удельного затухания электромагнитных волн, полученные с аппаратурой «17ГРЛ-1» в полосе частот 30–150 МГц, допускается использовать при изучении мёрзлых дисперсных грунтов слоя годовых теплооборотов Центрально-Якутской низменности методом георадиолокации в дискретном или непрерывном варианте с любой другой георадарной техникой измерения сигналов георадиолокации. Правда, антенны этой техники конструктивно должны быть настроены на центральную частоту спектра приёма–излучения электромагнитного поля от импульсного источника тока в диапазоне 1 МГц–1 ГГц. Допущение расширенного применения средних значений радиофизических свойств мёрзлых дисперсных грунтов в такой широкой частотной области делается на основании теоретического существования так называемого «георадарного плато» для неидеальных диэлектриков, к которым относятся мёрзлые дисперсные грунты. В этом плато значения действительной и мнимой комплексной диэлектрической проницаемости, регулирующие скорость распространения и удельного затухания электромагнитных волн, практически не изменяются на частоте 1 МГц–1 ГГц [13].

На этом фоне неблагоприятных для строительства инженерных объектов инженерно-гео-



**Рис. 2.** Эмпирическая зависимость средних значений скорости (а) и затухания амплитуды (б) электромагнитных волн от объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов слоя годового теплооборота Центрально-Якутской низменности

**Fig. 2.** The empirical dependence of the average meanings of the speed (a) and attenuation (b) of electromagnetic waves upon the volume ice content of the frozen dispersed soils of the annual heat flow layer of the Central Yakut lowland

логических условий след корреляции в поле рассеяния значений  $V$  и  $G$  имеет явно выраженный нелинейный характер и сильно зависит от изменчивости значений объёмной льдистости по площади Центрально-Якутской низменности. Графики этой зависимости, построенные в программе «Statistica-6» методом взвешенного наименьшего квадрата, показаны на рис. 2. На нём видно, что рост объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов в слое годового теплооборота приводит к росту скорости и спаду затухания электромагнитных волн, распространяющихся в этом слое. На таком фоне проявляются важные локальные особенности, а именно: резкое снижение чувствительности скорости и затухания волн к изменению объёмной льдистости в области сильно льдистых грунтов с суммарным содержанием сегрегационного и структурного (залежей ПЖЛ) льда более 60%.

Множественный коэффициент детерминации  $R^2$  рассматриваемой зависимости в адекватной аппроксимации степенной функцией, оценённый по выборке из 159 наблюдений, в целом выше у затухания, чем у скорости электромагнитных волн, и равен для этих параметров 0,789 и 0,575. Обратная зависимость, формально устанавливающая нереальные причинно-следственные отношения между объёмной льдистостью, скоростью и затуханием волн, но необходимая для решения научно-практических задач с максимально возможной точностью, описывается уравнениями логистической функции:

$$L_{ob} = 35,35 + 9859E^9 / (1 + 341E^{12} \exp^{-43,89V}),$$

$$R^2 = 0,571; \quad (1)$$

$$L_{ob} = 1426 - 1403 / (1 + 0,05645 \exp^{-0,7369G}),$$

$$R^2 = 0,833. \quad (2)$$

Видно, что в этом пространстве вероятностно-статистических отношений характеристик физических и радиофизических свойств мёрзлых дисперсных грунтов, связанных логистической функцией, доминантная роль действия характеристики объёмной льдистости на затухание электромагнитных волн ещё более возросла. Проанализируем, с какой погрешностью вычисляются средние значения  $L_{ob}$  по уравнениям (1) и (2). Статистика результатов сравнения вычисленных и лабораторных значений в пределах имеющейся выборочной совокупности, состо-

Таблица 2. Абсолютная погрешность вычисления средних значений объёмной льдистости по данным георадиолокации\*

Статистика погрешности	Погрешность по скорости (числитель) и затуханию (знаменатель) электромагнитных волн, %
Среднее арифметическое	0,00/1,38
Стандартная ошибка	0,84/0,52
Медианное среднее	-1,41/0,97
Модальное среднее	-7,70/-3,79
Стандартное отклонение	10,6/6,55
Минимум (завышение лабораторных данных)	-20,7/-19,8
Максимум (занижение лабораторных данных)	37,7/23,5
Уровень доверия 95%	1,66/1,03

\*Число скважин – 159.

ящей из 159 скважин, приведена в табл. 2. Графики линейного представления на изученной части площади Центрально-Якутской низменности изменчивости результатов вычислений объёмной льдистости по скорости (график 2) и затуханию (график 3) электромагнитных волн показаны на рис. 3. Сравнительная динамика объёмной льдистости по данным метода дискретной георадиолокации рассматривается в условном ряду номеров скважин, расположенных в порядке возрастания объёмной льдистости по лабораторным данным (график 1).

Визуальный анализ рис. 3 показывает, что данные георадиолокации близки к лабораторным

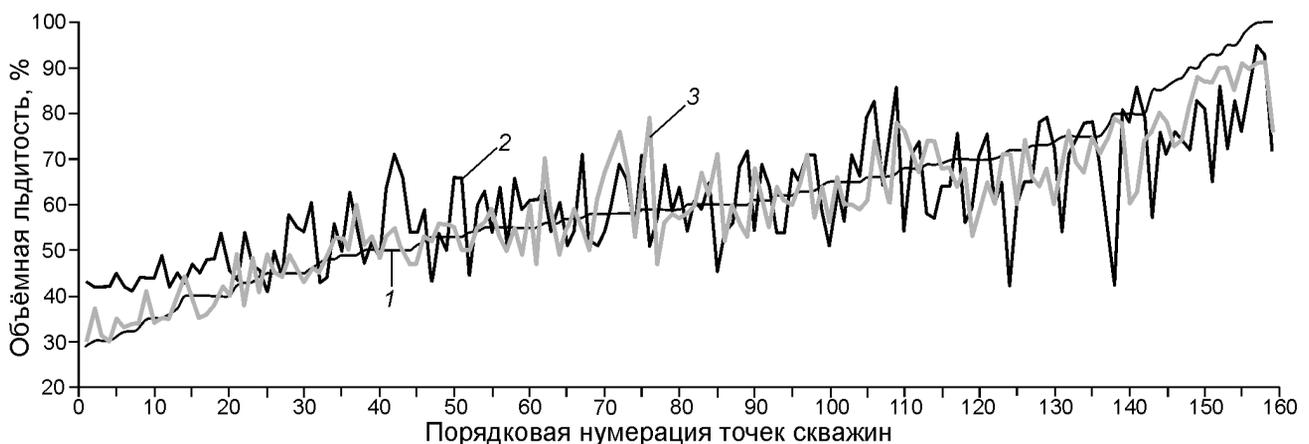


Рис. 3. Линейное представление по отношению к лабораторным данным (1) изменчивости по площади Центрально-Якутской низменности средних значений объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов в слое годового теплооборота по скорости (2) и затуханию амплитуды (3) электромагнитных волн

Fig. 3. Dynamics of average values of volume ice content of frozen dispersed soils in the layer of annual heat flow of the Central Yakut lowland according to laboratory data (1) and on the speed (2) and attenuation (3) of electromagnetic waves.

Таблица 3. Основные статистики вероятностного распределения значений объёмной льдистости по данным георадиолокации и лабораторного анализа\*

Статистика льдистости	Метод георадиолокации		Лабораторный анализ
	по скорости	по затуханию	
Среднее арифметическое	60,7	59,3	60,7
Стандартная ошибка	1,0	1,2	1,3
Медианное среднее	60,3	59,4	59,0
Модальное среднее	53,7	52,5	60,0
Стандартное отклонение	12,5	14,5	16,4
Минимальное значение	41,0	30,0	29,0
Максимальное значение	95,0	91,0	100,0
Коэффициент вариации, %	20,6	24,5	27,0
Уровень доверия 95%	2,0	2,3	2,6

\*Число скважин – 159.

данным в передаче главных особенностей обобщённой пространственной динамики объёмной льдистости, т.е. тренда или фона этой важнейшей характеристики мёрзлых дисперсных грунтов слоя годового теплооборота Центрально-Якутской низменности. Приемлемая точность описания на качественном уровне согласованной относительной изменчивости объёмной льдистости по данным георадиолокации сохраняется с равновероятным отклонением в отдельных точках в ту или другую сторону от лабораторных данных в интервале, примерно равном 50–70% и охватывающем 80 скважин из 159, т.е. половину выборочной совокупности. При меньших значениях объёмной льдистости погрешность систематически завышается, а при больших значениях, наоборот, систематически занижается. Причём мера завышения–занижения существенно больше у скорости, чем у затухания электромагнитных волн.

Большой интерес вызывает сравнение вероятностных распределений значений объёмной льдистости по лабораторным данным и георадиолокации. Статистика этих распределений дана в табл. 3, а графики их теоретических вариограмм – на рис. 4. Очевидно, что и по точности воспроизведения нормального закона вероятностного распределения объёмной льдистости на территории Центрально-Якутской низменности затухание в отличие от скорости электромагнитных волн более предпочтительно использовать при количественной оценке объёмной льдистости методом дискретной георадиоло-

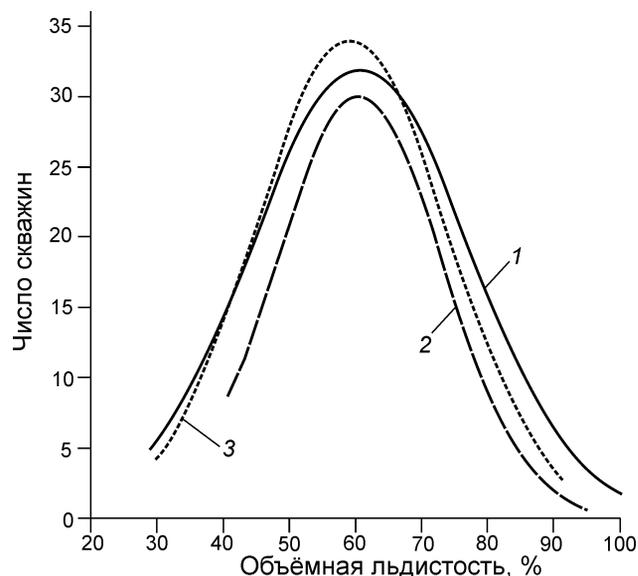


Рис. 4. Теоретическая аппроксимация значений объёмной льдистости законом нормального вероятностного распределения:

1 – лабораторные данные; 2 и 3 – соответственно скорость и затухание электромагнитных волн

Fig. 4. Theoretical approximation of the meanings of the volume ice content by the law of the normal probable distribution:

1 – laboratory data; 2 and 3 – the speed and attenuation of electromagnetic waves

кации. Впрочем, при решении этой задачи лучше использовать оба атрибута радиофизических свойств мёрзлых грунтов, так как они взаимно усиливают полноту достоверности получаемого результата со стороны действительной (формула (1)) и мнимой (формула (2)) части комплексной диэлектрической проницаемости с учётом токов смещения связанных зарядов и проводимости свободных электрических зарядов.

По средним показателям объёмной льдистости данные георадиолокации практически не отличаются от материалов лабораторного анализа (см. табл. 3). Разброс абсолютных единичных ошибок вычислений по формулам (1) и (2) на уровне доверительной вероятности 70% не превышает соответственно  $\pm 10,6$  и  $\pm 6,55\%$ . Такой уровень доверия используют в геологоразведке для оценки достоверности результатов геофизических работ, которым свойственны неоднозначность и некорректность решения обратных задач с построением ФГКМ геологической среды.

Погрешность вычислений объёмной льдистости по скорости и затуханию электромагнит-

ных волн немаленькая, так как лабораторные и георадиолокационные количественные оценки объёмной льдистости содержат разномасштабную точечную (в точке скважины) и объёмную информацию (в окрестности точки скважины) об изучаемом слое годового теплооборота. Даже если допустить, что эти оценки связаны функциональной зависимостью, то она может быть полностью скрытой и ненаблюдаемой при неравномерном распределении суммарной сегрегационно-структурной объёмной льдистости в окрестности скважин. Действительно, если скважина случайным образом окажется пробуренной в промежутке между залежами ПЖЛ, то результат лабораторного анализа в этой точке покажет низкую объёмную льдистость мёрзлых грунтов. Напротив, результат определения высокой скорости и низкого затухания в окрестности скважины, занятой залежами ПЖЛ, укажет на высокую объёмную льдистость мёрзлых грунтов в этом пространстве. Таких вариантов множество, и все они затрудняют изучение истинных петрофизических закономерностей в полевых условиях. Однако другого пути, кроме сравнения точечных лабораторных изыскательских данных с объёмными геофизическими данными, не существует и с этим надо считаться при проведении любых петрофизических экспериментов на поверхности Земли.

В данной ситуации весьма перспективен путь количественной оценки объёмной льдистости не по единичным точкам георадиолокационных зондирований с многократными измерениями сигналов, а по некоторой их совокупности из нескольких точек. Если исследование методом дискретной георадиолокации необходимо выполнять в сетях геолого-геофизических наблюдений, равномерно покрывающих площадь исследований, то совокупность, например, из 15 точек зондирований образует окно осреднения, скользящее с заданным шагом перемещения по профилям и между профилями. В варианте проведения мерзлотной съёмки и инженерно-геологического районирования застраиваемой территории совокупность  $n$ -точек зондирований будет уже определяться конфигурацией границ и размерами мезо- и макроключевых участков местности [14]. В любом из предлагаемых вариантов осреднения полученные в скользящем окне или на ключевом участке средние значения скорости и затухания электро-

магнитных волн используются для вычисления средних значений  $L_{ob}$  по уравнениям (1) и (2). Эти значения, как показал ранее сделанный сравнительный анализ вероятностных распределений геолого-геофизических характеристик, будут не только близки к лабораторным данным объёмной льдистости, но и, что самое главное, точно воспроизведут обобщённую картину относительной изменчивости этой важнейшей характеристики криогенных систем на территории Центрально-Якутской низменности.

Предложенный путь количественной оценки объёмной льдистости мёрзлых грунтов в настоящее время не может быть реализован в производственных масштабах без применения автоматизированных георадарных систем с быстрым сбором и переработкой огромного объёма многократных измерений сигналов георадиолокации в окрестности точек сети геолого-геофизических наблюдений. Такие системы, пока не существующие, уже в полевых условиях должны давать информацию о скорости распространения и удельного затухания электромагнитных волн и возможность построения по ним карт и графиков объёмной льдистости мёрзлых грунтов слоя годового теплооборота.

### Заключение

Экспериментальные исследования, выполненные методом дискретной георадиолокации на Центрально-Якутской низменности, позволили установить статистически значимое влияние средней объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов слоя годового теплооборота на средние значения скорости и затухания электромагнитных волн в этом слое. Такое влияние имеет нелинейный характер и адекватно описывается методом взвешенных наименьших квадратов. Особенности зависимости заключаются в резком спаде чувствительности скорости и затухания волн при переходе дисперсных грунтов в область их сильно льдистых разностей с объёмной льдистостью более 60%. При этом затухание волн сильнее реагирует на изменение объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов. Такая особенность делает эту радиофизическую характеристику более предпочтительной, чем скорость, при количественной оценке объёмной льдистости.

По средним достоверным значениям скорости и затухания электромагнитных волн, получаемых по новой методике многоазовых измерений сигналов георадиолокации в окрестности точек сети геолого-геофизических наблюдений, по уравнению логистической функции можно вычислить средние значения объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов с абсолютной погрешностью 7–11%. Несмотря на такую небольшую погрешность, картина вероятностного распределения средних значений объёмной льдистости по данным георадиолокации на площади Центрально-Якутской низменности в главных тенденциях полностью идентична лабораторным данным. Благодаря этому регрессионные уравнения логистической функции рекомендуется использовать в производственных целях для расчёта по скорости и затуханию электромагнитных волн фоновых значений объёмной льдистости мёрзлых дисперсных грунтов в

любой части ледового комплекса Центрально-Якутской низменности. Главное в этой информации, предоставляемой в виде карт и графиков, — знание не точных абсолютных значений объёмной льдистости, а фоновых и локальных (аномальных) особенностей её относительной изменчивости в природных условиях или на застраиваемых территориях.

Отметим ещё один практический аспект выполненных петрофизических исследований: найденные в пределах слоя годового теплооборота Центрально-Якутской низменности средние значения характеристик радиофизических свойств мёрзлых грунтов допускается использовать при проведении работ методом дискретной или непрерывной георадиолокации с любой георадарной техникой, правда, её антенны конструктивно должны быть настроены на центральную частоту спектра излучения—приёма электромагнитных волн 1 МГц–1 ГГц.

## Литература

## References

1. Соловьёв П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 144 с.
2. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. М.: Национальный стандарт РФ, 2010. 56 с.
3. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мёрзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 175 с.
4. Калинин В.М., Якупов В.С. Региональные закономерности поведения мощности мёрзлых толщ. Якутск: изд. ЯНЦ СО АН СССР, 1989. 144 с.
5. Скрябин П.Н., Варламов С.П., Скачков Ю.Б. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 144 с.
6. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М.: Форум, Инфра-М, 2006. 512 с.
7. ГОСТ 5180–84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Издание официальное. Государственный комитет СССР по делам строительства. М.: Изд-во стандартов, 1985. 18 с.
8. Омельяненко А.В. Георадиолокация мёрзлых рыхлых отложений: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 1989. 194 с.
1. Soloviev P.A. *Kriolitizona severnoy chasti Leno-Amginskogo mezhdurech'ya*. Permafrost in the Northern Part of the Lena-Amga Watershed. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1959: 144 p. [In Russian].
2. *GOST 25100-2011. Grunty. Klassifikatsiya*. Soils. Classification. Moscow: RF National Standard, 2010: 56 p. [In Russian].
3. *Votyakov I.N. Fiziko-mekhanicheskie svoystva myorzlykh i ottai-vayushchikh gruntov Yakutii*. Physical and mechanical properties of frozen and thawing soils in Yakutia. Novosibirsk: Nauka, 1975: 175 p. [In Russian].
4. *Kalinin V.M., Yakupov V.S. Regional'nye zakonomernosti povedeniya moshchnosti myorzlykh tolshch*. Regional patterns of permafrost thickness behavior. Yakutsk, Yakutsk Scientific Center, Siberian Branch of the USSR Academy of Science, 1989: 144 p. [In Russian].
5. *Skryabin P.N., Varlamov S.P., Skachkov Yu.B. Mezhhodovaya izmenchivost' teplovogo rezhima gruntov rayona Yakutska*. Inter-annual variability of the ground thermal regime in the Yakutsk area. Novosibirsk: Siberian Branch of the USSR Academy of Science, 1998: 144 p. [In Russian].
6. *Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh*. Methods and tools for integrated data analysis. Moscow: FORUM, INFRA-M Publ., 2006: 512 p. [In Russian].
7. *GOST 5180-84. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik. Izdanie ofitsial'noe. Gosudarstvennyi komitet SSSR po delam stroitel'stva*. GOST 5180-84. Soils. Laboratory methods for determining the physical characteristics. Official publication. USSR State Committee for Construction. Moscow: Standards Publishing House, 1985: 18 p. [In Russian].

9. Патент 2490671 RU, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88. Способ георадиолокации многолетнемерзлых пород / Л.Г. Нерадовский; заяв. Л.Г. Нерадовский. № 2011125238/28; заявл. 17.06.2011; опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23. 11 с.
10. *Нерадовский Л.Г.* Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации (Серия «Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий: ежегодное издание МСНТ / Гл. ред. Н.П. Ершов). М.: Изд-во РАН, 2009. 337 с.
11. *Суханов Л.А.* Измерение мощности горных ледников радиолокационным методом // МГИ. 1973. Вып. 22. № 2. С. 58–64.
12. *Богородский В.В.* Радиозондирование льда. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 63 с.
13. *Владов М.Л., Судакова М.С.* Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
14. *Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Романовский Н.Н., Максимова А.Н., Чижов А.Б.* Методика мерзлотной съемки. М.: Изд-во МГУ, 1979. 358 с.
8. *Omelyanenko A.V.* *Georadiolokatsiya myorzlykh rykhlykh otlozheniy.* Ground probing radar for study of frozen deposits. PhD. Moscow: MSU, 1989: 194 p. [In Russian].
9. *Patent 2490671 RU.* Patent 2490671 RU, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88. Method for ground penetrating radar study of permafrost materials. L.G. Neradovskii; appl. L.G. Neradovskii. 2011125238/28; appl. 17.06.2011; publ. 20.08.2013, Bull. 23: 11 p. [In Russian].
10. *Neradovskiy L.G.* *Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu mnogoletnemyorzlykh porod metodom dinamicheskoy georadiolokatsii.* Guidelines for permafrost investigation by dynamic GPR method. Moscow: Russian Academy of Sciences Press, 2009: 337 p. [In Russian].
11. *Suhanov L.A.* Measurements of mountain glacier thickness using the GPR method. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1973, 22 (2): 58–64. [In Russian].
12. *Bogorodskiy V.V.* *Radiozondirovanie l'da.* Radio sounding of ice. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975: 63 p. [In Russian].
13. *Vladov M.L., Sudakova M.S.* *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravleniy.* Ground probing radar. From physical principles to promising directions. Moscow: GEOS Publ., 2017: 240 p. [In Russian].
14. *Kudryavtsev V.A., Garagulya L.S., Kondratieva K.A., Romanovskiy N.N., Maksimova A.N., Chizhov A.B.* *Metodika merzlotnoy s'emki.* Methods of permafrost survey. Moscow: MSU Press, 1979: 358 p. [In Russian].