

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБЪЕМНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПО ВОЛНОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Л. Г. НЕРАДОВСКИЙ

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

На примере изучения архивных материалов проектно-изыскательских работ установлена частная эмпирическая зависимость волновых характеристик от теоретических оценок эффективной объемной теплоемкости мерзлых слоев супесей г. Якутска. Показана принципиальная возможность использования метода георадиолокации для решения задачи расчетного определения по вероятностным математическим моделям не только эффективной объемной теплоемкости мерзлых супесей, но и предположительно – остальных теплофизических характеристик для всего класса мерзлых дисперсных грунтов Центральной Якутии.

Ключевые слова: георадиолокация, волновые характеристики, корреляция, теплоемкость, засоленность, мерзлая супесь.

The study of the existing data from engineering site investigations has shown that a partial empirical relationship exists between the wave characteristics (propagation velocity and attenuation of ground-penetrating radar signals) and the theoretical estimates of effective volumetric heat capacity for frozen sandy silts in Yakutsk. This suggests that the GPR method can be used to predict from the probabilistic mathematical models the effective volumetric heat capacity of frozen sandy silts, and presumably the other thermal properties of all frozen soil types encountered in central Yakutia.

Key words: Frozen sandy silt, heat capacity, salinity, temperature, wave characteristics, ground-penetrating radar, correlation, models – regression equations.

Теплофизические характеристики, в том числе и эффективная объемная теплоемкость, играют важную роль в строительстве в областях распространения вечной мерзлоты. Они применяются в научных и инженерно-технических расчетах, связанных с оценкой механической прочности и термической устойчивости мерзлых грунтовых оснований зданий и сооружений. Однако получение информации по этим характеристикам в полевых или лабораторных условиях с использованием

технических измерительных средств не всегда возможно и представляет собой дорогостоящий трудоемкий процесс. В результате этого, а также в свете стремительного освоения природных богатств Сибири и Дальнего Востока, поиск и разработка новых ресурсосберегающих и не разрушающих природную среду технологий, ориентированных на быстрое изучение приблизительных, но достоверных характеристик состояния и свойств массивов мерзлых грунтов (ММГ), приобретает статус фундаментальной научной концепции и крупной народнохозяйственной проблемы. Один из путей ее решения состоит в использовании возможностей методов малоглубинной геофизики. Однако такие возможности во многом остаются неизученными, в силу сложившихся представлений о целевом предназначении методов геофизики как инструментов изучения геометрического строения границ ММГ.

На протяжении ряда последних лет изучались возможности метода георадиолокации применительно к оцениванию и прогнозу теплового (температурного) состояния мерзлых оснований эксплуатируемых инженерных сооружений в освоенных районах криолитозоны Якутии [1]. В данной работе рассмотрена возможность использования метода георадиолокации для количественного определения теплофизических характеристик мерзлых глинисто-песчаных отложений Центральной Якутии на примере экспериментально установленной связи волновых характеристик с теоретическими оценками эффективной объемной теплоемкости мерзлых супесей г. Якутска. Результаты исследований прошли успешную апробацию, и некоторая их часть была описана в [2].

В качестве объекта исследований были выбраны супеси, слагающие вместе с другими глинисто-песчаными отложениями разрез мерзлой озерно-аллювиальной толщи на участке долины р. Лены «Туймаада» в районе г. Якутске. Слои супесей занимают верхнюю часть разреза преимущественно до глубины 5 – 7 м. Для проведения эксперимента отбирались слои, мощность которых превышала 0,5 м. Такое ограничение связано с разрешающей способностью используемой георадарной техники. Выбор грунта объясняется его уникальной особенностью, обусловленной процессом осадконакопления в речных и озерных системах. Занимая промежуточное место между песчаными и глинистыми фациями, супеси частично сохраняют в себе все их свойства, в том числе теплофизические. Следовательно, целесообразно распространить результаты эксперимента на весь класс мерзлых дисперсных грунтов.

Предметом исследований стало изучение эмпирических зависимостей волновых характеристик с теоретическими оценками значений эффективной объемной теплоемкостью $C_{об}$ мерзлых супесей. Кроме них рассматривались вспомогательные характеристики физических свойств, такие как суммарная влажность $W_{сум}$, засоленность D_3 и температура t . В число волновых характеристик входили: скорость распространения v и удельное затухание амплитуды сигналов георадиолокации G^1 . Объемная теплоемкость тесно связана с другими теплофизическими характеристиками (теплопроводностью и температуропроводностью), следовательно, изученные вместе с ней эмпирические зависимости волновых характеристик могут быть перенесены на другие теплофизические характеристики.

Для проведения эксперимента необходимо решить следующие задачи:

- по материалам проектно-изыскательских работ из всей совокупности речных образований сформировать репрезентативную в статистическом отношении выборку слоев супесей, встречающихся на территории г. Якутска;

- по выбранным слоям супесей составить матрицу значений всех переменных эксперимента ($C_{об}$, $W_{сум}$, D_3 , t , v , G);

- провести комплексный статистический анализ и найти вероятностные математические модели, адекватно описывающие прямую и обратную зависимости v , G от $C_{об}$;

- изучить погрешности вычисления $C_{об}$.

Для решения первой задачи потребовалась работа над архивным материалом, полученным в 1985 – 1995 гг. при проведении в Якутии опытно-производственных работ Якутским трестом инженерно-строительных изысканий с использованием одного из первых образцов

¹ В соответствии с последней принятой в грунтоведении классификацией В. А. Королева [3], к электрическому подклассу физических свойств отнесены электромагнитные или волновые характеристики (транспортные и емкостные). К транспортным волновым характеристикам относится скорость распространения сигналов георадиолокации, а к емкостным – затухание амплитуды этих сигналов. Многолетние научные исследования показывают, что в сравнении со скоростью затухание более чувствительно к изменению состояния и свойств ММГ (влажности, засоленности, прочности и температуры). Данная особенность сохраняется и в отношении к характеристике эффективной объемной теплоемкости мерзлых супесей.

отечественной георадарной техники – аппаратуры 17ГРЛ-1. Потребовалась обработка первичной информации с последующим сохранением результатов многократных зондирований и вероятностно-статистического принципа цифрового анализа сигналов георадиолокации [4].

Из множества пробуренных на территории г. Якутска изыскательских скважин для изучения зависимости ν , G от $C_{об}$ удалось отобрать несколько десятков, в разрезе которых присутствовали слои мерзлых супесей мощностью не менее 0,5 м с известными значениями всех исследуемых характеристик. Показатели влажности и засоленности определяли в лабораторных условиях по соответствующим стандартным методикам. Удельные значения волновых характеристик вычисляли по результатам георадиолокационных зондирований, а температуры – по данным термометрии скважин до глубины 10 – 20 м.

Выполнение работ методом георадиолокации и термометрии скважин всегда совпадало по времени. Температуру мерзлых супесей измеряли терморезисторными датчиками ММТ-4 с погрешностью калибровки порядка $\pm 0,01$ °С². При изыскательских работах замеры теплофизических характеристик пород и грунтов не проводили, а значения $C_{об}$ слоев мерзлых супесей вычисляли теоретически. Из всех известных схем расчета была выбрана формула Р. И. Гаврильева и Г. П. Кузьмина [5]

$$C_{об} = \frac{(1 + w)(c_s/\rho_s + w_w c_w/\rho_w + ((w - w_w)c_i/\rho_i))}{(\rho_s^{-1} + w_w/\rho_w + ((w - w_w)/\rho_i))^2}, \quad (1)$$

где c_s , c_w , c_i – удельные теплоемкости минеральных частиц, воды и льда, кДж/(кг·К); ρ_s , ρ_w , ρ_i – плотности минеральных частиц, незамерзшей воды и льда, г/см³; w , w_w – содержания гравитационной воды при

² В условиях полевых работ по причине влияния разных неконтролируемых факторов погрешность определения температуры мерзлых пород и грунтов подобными датчиками в подавляющем большинстве случаев не превышает $\pm 0,1$ °С.

³ Это внесистемная единица измерения влажности, устанавливающая отношение массы воды, удаленной из грунта способом высушивания до постоянной массы, к массе высушенного грунта. По [7] допускается выражать влажность мерзлых и немерзлых дисперсных грунтов без жестких структурных связей как в долях единицы, так и в процентах.

положительных температурах вблизи нуля градусов и незамерзшей воды при отрицательных температурах в относительных единицах³.

В расчетах $C_{об}$ по (1) приняты следующие значения входных параметров, взятых из работы [6]: $\rho_w = 1,00$, $\rho_i = 0,918$, $\rho_s = 2,70$, $c_s = 0,84$, $c_w = 4,20$, $c_i = 2,10$.

Формула (1) применима для всего класса незасоленных мерзлых дисперсных грунтов Центральной Якутии за исключением маловлажных разностей, где газовая составляющая не принимается во внимание, при этом четко не указана граница маловлажных грунтов, но из представленного в их работе материала следует, что к таковым следует относить грунты со значением $W_{сум} < 0,2$ %. Заметим, что данный критерий не учитывает естественную разность влажности песчаных и глинистых отложений. По данным [8] в ряду увеличения степени дисперсности мерзлых грунтов средний модальный показатель $W_{сум}$ Центральной Якутии возрастает от 18 % у мелко-среднезернистых песков до 40 % у суглинков. Что касается засоленности, то по инженерно-геологической классификации выборка слоев исследуемых супесей принадлежит к классу мерзлых незасоленных глинистых грунтов. Даже по максимальному значению D_3 супеси считаются слабозасоленными, не выходя за границы интервала 0,2 – 0,5 %, установленного в [9]. Из этого следует, что включение характеристики D_3 в совокупность экспериментальных данных не нарушает условий (1) для определения теоретических оценок $C_{об}$.

Материал эксперимента представлен выборкой из 52 значений переменных (табл. 1) и необходим для изучения эмпирической зависимости ν , G от $C_{об}$. Под этим подразумевается изучение изменчивости значений $C_{об}$ в зависимости от вариаций значений $W_{сум}$, D_3 , t . В дальнейшем связи между этими характеристиками могут оказаться полезными для расчетного определения теоретических оценок $C_{об}$ по данным изыскательских работ, включающих в себя лабораторные определения и георадиолокационные зондирования в точках буровых скважинах.

По результатам проверки по трем статистическим критериям следует, что значения переменных эксперимента распределены по разным вероятностным законам (табл. 2). Ячейки таблицы со знаком плюс соответствуют закону Гаусса, а ячейки со знаком минус – остальным.

Таким образом, из числа переменных эксперимента только ν , G и отчасти $W_{сум}$ подчиняются закону нормального распределения. Остальные характеристики близки в распределении значений к логнормальному закону или закону γ -распределения.

Матрица эксперимента

Номер опыта	$W_{эм}, \%$	$D, \%$	t, K	$C_{об}, кДж/(м^3 \cdot K)$	$G, дБ/м$	$v, м/нс$
1	0,11	0,033	270,95	3183	2,82	0,118
2	0,11	0,061	269,85	3143	1,61	0,123
3	0,12	0,072	271,25	3200	2,83	0,120
4	0,12	0,085	271,75	3222	3,72	0,105
5	0,12	0,107	272,05	3273	4,03	0,107
6	0,14	0,093	272,35	3250	3,92	0,106
7	0,15	0,122	269,15	2930	2,22	0,105
8	0,16	0,161	271,45	3121	3,11	0,115
9	0,16	0,193	273,15	4087	4,34	0,103
10	0,18	0,150	271,35	3100	3,55	0,107
11	0,18	0,063	271,15	3083	4,04	0,109
12	0,18	0,098	271,05	3062	3,66	0,113
13	0,18	0,138	272,45	3628	3,82	0,102
14	0,22	0,047	272,65	3551	5,05	0,096
15	0,24	0,040	270,75	3060	3,03	0,112
16	0,26	0,093	272,85	4165	4,64	0,114
17	0,28	0,170	272,05	3220	4,53	0,107
18	0,28	0,233	273,15	4431	6,06	0,087
19	0,29	0,251	272,25	3297	4,33	0,098
20	0,29	0,267	270,65	3083	3,11	0,116
21	0,34	0,086	269,75	3212	2,02	0,100
22	0,34	0,152	272,95	4415	5,66	0,091
23	0,35	0,077	269,25	3000	2,22	0,116
24	0,35	0,167	272,75	4063	5,15	0,088
25	0,36	0,053	268,15	2950	2,02	0,113
26	0,37	0,038	267,15	2917	1,77	0,120
27	0,37	0,027	266,15	2907	2,12	0,118
28	0,37	0,250	272,35	3444	4,41	0,110
29	0,38	0,066	265,15	2890	2,08	0,121
30	0,39	0,288	272,05	3305	4,62	0,092
31	0,42	0,280	272,15	3330	4,08	0,105
32	0,44	0,340	272,45	3683	5,16	0,103
33	0,45	0,175	271,15	3122	3,03	0,116
34	0,45	0,082	270,15	3060	2,22	0,121
35	0,47	0,055	269,15	2972	1,81	0,126
36	0,48	0,063	271,35	3173	3,11	0,096
37	0,48	0,233	272,05	3312	4,77	0,107
38	0,49	0,225	270,95	3103	2,65	0,100
39	0,54	0,165	269,45	2970	2,07	0,106

Номер опыта	$W_{\text{сум}}, \%$	$D_3, \%$	t, K	$C_{\text{об}}, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$	$G, \text{дБ}/\text{м}$	$\nu, \text{м}/\text{нс}$
40	0,54	0,043	268,75	2910	1,82	0,121
41	0,54	0,433	272,95	4530	6,03	0,085
42	0,58	0,183	269,45	2934	2,27	0,106
43	0,58	0,100	270,95	3044	3,66	0,100
44	0,61	0,091	269,85	2933	3,03	0,103
45	0,67	0,228	272,05	3250	4,04	0,097
46	0,67	0,223	270,35	2920	3,28	0,108
47	0,67	0,100	270,45	2950	3,77	0,106
48	0,68	0,099	269,85	2911	2,55	0,117
49	0,73	0,050	268,75	2807	1,72	0,121
50	0,84	0,033	265,45	2720	1,31	0,126
51	0,84	0,015	265,15	2750	1,58	0,123
52	0,84	0,042	271,45	2982	4,24	0,096

Примечание. G, ν – средние значения удельных волновых характеристик, определенные по методике многократных измерений сигналов георадиолокации в окрестности точек скважин [4]. Их относительная точность определения не более 10 – 15 %. Точность лабораторного определения значений $W_{\text{сум}}, D_3$ в материалах изыскательских работ не указывается.

Таблица 2

Проверка гипотезы о нормальном распределении переменных

Переменная эксперимента	Соответствие по статистическому критерию		
	Колмогорова	Ω^2	χ^2
$C_{\text{об}}$	—	—	—
$W_{\text{сум}}$	+	+	—
D_3	—	—	—
t	—	—	—
ν	+	+	+
G	+	+	+

Законы вероятностного распределения значений переменных обусловлены их физической природой, однако в экспериментальных исследованиях эти проявления зачастую искажаются при использовании небольших по объему выборок. В таких случаях невозможно доказать принадлежность переменной, изучаемой в одном эксперименте, к классу нормальных вероятностных распределений. Поэтому в

рассматриваемом случае остается ограничиться констатацией факта разных законов распределений и учесть это при построении прямых и обратных вероятностных математических моделей⁴, устанавливающих качественные и количественные отношения между исследуемыми переменными. Вместе с тем необходимо изучить описательные статистики переменных не только для построения общего статистического портрета физико-химических свойств мерзлых супесей, но и установления границ области изменений этих характеристик, влияющих на $C_{об}$.

Выполним преобразования для приведения $C_{об}$, D_3 , t к нормальному закону распределения для последующего вычисления их параметрических статистик. Это можно сделать, последовательно убирая из гистограмм переменных, так называемые, «тяжелые хвосты», т. е. редко встречающиеся значения. Подобную операцию нужно выполнять до тех пор, пока переменные не будут распределены по нормальному закону. Заметим, что при изучении корреляций переменных этого делать нельзя, так как редкие значения часто несут в себе необходимую информацию о взаимосвязях переменных на границах выборочной совокупности. Результат преобразований переменных к единому закону нормального распределения с вычислением описательных статистик приведен в табл. 3.

По среднеарифметическому показателю мерзлые супеси г. Якутска при повышенной естественной влажности (0,37 – 0,39 %), температуре около 272 К (–1,1 ... – 1,2 °С) и засоленности 0,08 % характеризуются теплоемкостью на уровне 3100 кДж/м³·К и отличаются низкой скоростью и повышенным затуханием. По коэффициенту вариации сильной изменчивостью отличаются $W_{сум}$, D_3 и G .

Рассмотрим линейную и нелинейную парные взаимосвязи между переменными путем расчета по данным табл. 2 параметрической и непараметрической матриц коррелиции. Расчет сделан в программе «Stadia» [10], а результат представлен в табл. 4.

⁴ Прямая модель в той или иной степени описывает корреляционно-регрессионный характер причинно-следственных отношений, имеющих физический смысл. В отличие от прямой модели обратная не имеет физического смысла и формально описывает корреляционно-регрессионные отношения между переменными с одной прагматической целью – использовать эти отношения для решения производственных задач.

Описательная статистика переменных эксперимента

Параметр статистики	$W_{\text{сум}}, \%$	t, K	$D, \%$	$v, \text{м/нс}$	$G, \text{дБ/м}$	$C_{\text{об}}, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$
Среднее арифметическое	0,39	271,77	0,087	0,108	3,36	3106
Медианное	0,37	272,05	0,084	0,107	3,20	3083
среднее	0,28	272,05	0,063	0,107	2,22	2950
Модальное	0,21	0,85	0,046	0,010	1,24	212
Стандартное отклонение	53,8	0,3	52,3	9,2	36,9	6,8
Коэффициент вариации, %	0,11	270,15	0,015	0,085	1,31	2720
Минимум	0,61	273,15	0,175	0,126	6,06	3683
Максимум	0,06	0,29	0,015	0,003	0,34	63
Уровень надежности 95 %	44	35	38	52	52	46
Число определений						

Т а б л и ц а 4

Матрица парных коэффициентов корреляций (r)

Переменные	$W_{\text{сум}}, \%$	t, K	$D, \%$	$C_{\text{об}}, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$	$v, \text{м/нс}$	$G, \text{дБ/м}$
$W_{\text{сум}}$	1	-0,35	0,02	-0,46	0,01	-0,21
t	-0,40	1	0,59	0,94	-0,67	0,93
D_3	0,01	0,55	1	0,57	-0,54	0,62
$C_{\text{об}}$	-0,31	0,70	0,52	1	-0,62	0,82
v	0,04	-0,67	-0,56	-0,64	1	-0,72
G	-0,22	0,84	0,61	0,81	-0,77	1

П р и м е ч а н и е . Показатели, выделенные цветом – параметрические оценки коэффициентов корреляции, остальные – непараметрические. Критический уровень параметрической корреляции 0,27.

В табл. 4 представлены все значимые оценки парных корреляций переменных, не только зависящие от теплоемкости, но и влияющие на нее. В число зависимых переменных входят скорость и затухание с корреляцией около -0,6 и 0,8. В число независимых переменных,

определяющих значения теплоемкости, в порядке уменьшения коэффициента корреляции: температура 0,70 – 0,94, засоленность 0,52 – 0,57, влажность – (0,31 – 0,46). Более высокие значения непараметрических оценок парной корреляции переменных являются признаком нелинейной связи между ними.

Между D_3 и $W_{\text{сум}}$ корреляции нет, что вполне естественно, но ее отсутствие между ν , G и $W_{\text{сум}}$ оценивается по-разному. С одной стороны, отсутствие влияния $W_{\text{сум}}$ на G согласуется с результатами натуральных экспериментов [11] и лабораторных исследований [12]. С другой стороны, отсутствие влияния $W_{\text{сум}}$ на ν не вписывается в теоретические представления и противоречит практическому опыту георадиолокации применительно к немерзлым породам и грунтам. Возникшее противоречие объясняется разным строением мерзлых и немерзлых пород и грунтов глинистого состава, к которым относятся супеси. В процессе замерзания содержащейся в них воды, кроме образования в минеральном скелете равномерно распределенного порового льда, дополнительно образуется неравномерно распределенный сегрегационный лед в виде слоисто-сетчатых криогенных текстур. Непредсказуемый и неконтролируемый характер изменчивости содержания льда в этих текстурах приводит к разрушению влияния суммарной влажности $W_{\text{сум}}$ на характеристики сигналов георадиолокации.

Рассмотрим влияние $C_{\text{об}}$ мерзлых супесей на ν и G сигналов георадиолокации. Известно, что среди всех характеристик физико-химических свойств мерзлых дисперсных пород и грунтов, фактор температуры имеет доминирующее влияние на $C_{\text{об}}$. При значениях отрицательных температур, близких к нулю, теоретическая функциональная зависимость $C_{\text{об}} = f(t)$ приобретает экстремальный характер [5, с. 53].

Зависимость волновых характеристик сигналов георадиолокации от теплоемкости, описанная смешанной детерминированно-стохастической моделью нелинейного типа, приведена на рис. 1. Детерминированная составляющая модели проявляет себя в закономерном нелинейном спаде ν и росте G при повышении $C_{\text{об}}$. Появление в модели стохастической составляющей обусловлено неконтролируемым влиянием на волновые характеристики совокупности геологических факторов. Результат этого воздействия проявляется в неоднозначном изменении значений ν , G при заданном значении независимой переменной $C_{\text{об}}$. Соотношение меры детерминированного и стохастического

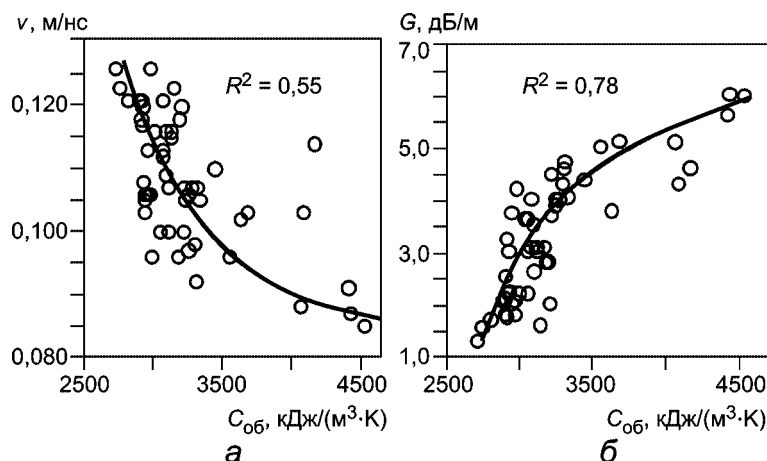


Рис. 1. Точечные диаграммы рассеяния экспериментальных данных с графиками эмпирической зависимости скорости распространения (а) и удельного затухания амплитуды сигналов георадиолокации (б) от теоретических оценок эффективной объемной теплоемкости мерзлых супесей г. Якутска

ческого влияний в математической статистике принято оценивать квадратом множественного коэффициента корреляции R^2 . В рассматриваемом случае его значение достигает максимума при использовании логистической функции в качестве описания детерминированной составляющей зависимости волновых характеристик от теплоемкости. Подбор коэффициентов уравнения этой функции, минимизирующий суммарную разницу между исходными и прогностическими (регрессионными) значениями скорости и затухания, выполнен в программе «Stadia». В результате получены следующие уравнения:

$$v = 1610 + 1330 / (1 - 132 \exp(-64,3 C_{об})) + \delta, \quad R^2 = 0,55; \quad (2)$$

$$G = 2890 + 3450 / (1 + 407 \exp(-0,976 C_{об})) + \delta, \quad R^2 = 0,78, \quad (3)$$

где δ – случайная ошибка, дБ/м.

Коэффициенты в (2), (3) фактически представляют собой эмпирически установленную для заданных условий проведения эксперимента степень вероятностного влияния теплоемкости на волновые характеристики и потому их нельзя рассматривать с метрологических или иных позиций, устанавливающих точные функциональные

причинно-следственные количественные отношения между главными и производными размерностями единиц физических величин.

Из сравнения графиков уравнений (2), (3) следует, что более сильное влияние с показателем $R^2=0,78$ оказывает теплоемкость на затухание сигналов георадиолокации. Это означает, что доля ее влияния на затухание составляет почти 80 %. На долю случайных вариаций G , связанных с действием неучтенных геологических факторов (льдистости, температуры и др.) остается около 30 %.

Таким образом, существенное преобладание детерминированной составляющей модели над случайными составляющими является достаточным основанием для решения обратной петрофизической задачи, а именно вычисления по волновым характеристикам регрессионных оценок теплоемкости. Для этого в (2), (3) достаточно поменять местами переменные. При этом между переменными нарушаются причинно-следственные отношения⁵, но с точки зрения необходимости количественной оценки теоретической теплоемкости это оправдано.

У практической реализации эмпирической зависимости волновых характеристик с теплоемкостью есть два пути. Первый использует отбор переменных по критерию максимума корреляции, тем самым, ограничивает поиск уравнением, устанавливающим нелинейные количественные отношения $C_{об}$, G . Он самый компактный и точный, но менее достоверный, так как не учитывает скоростную характеристику мерзлых супесей. Поэтому было принято решение идти по второму пути и искать уравнение расчетного определения теоретических оценок $C_{об}$ по двум волновым характеристикам v и G .

$$C_{об} = 2514 - 1667v + 270,2G + \delta, R^2 = 0,65. \quad (4)$$

Коэффициенты (4) имеют такой же смысл, как и в (2), (3), но в отличие от них они фиксируют вероятностную меру необходимых для решения практических задач математически формальных соотношений переменных.

⁵ Они являются не корневыми, а промежуточными отношениями, строго соответствующими определенному уровню иерархии рассматриваемых характеристик физических свойств геологического образования. Анализ физической природы и механизма влияния теплоемкости на волновые характеристики в общей системе взаимосвязей качественных и количественных характеристик всех свойств массивов мерзлых пород и грунтов в данном случае не проводится.

Проверка (4) на материале эксперимента показывает, что оно равно-вероятно завышает–занижает значения теоретических оценок $C_{об}$, вычисленных по (1). При заданном уровне доверительной вероятности 95 % неопределенность значения теплоемкости, вычисленной по данным георадиолокации, заключена в интервале ± 71 кДж/м³·К. Разброс частных значений не превышает ± 513 кДж/м³·К, что в относительной метрике составляет $\pm(11 - 14)$ %.

Перечислим действия, необходимые для получения $C_{об}$ по (4). Во-первых, в некоторой окрестности пробуренной скважины следует выполнить георадиолокационные зондирования и несколько раз измерить сигналы георадиолокации. Во-вторых, измеренные сигналы нужно обработать по специальной методике⁶ и выделить когерентные отражения от плоских литологических границ разреза скважины. В-третьих, идентифицировать данные отражения к границам слоя или слоев супесей, если их несколько в разрезе скважины. В-четвертых, вычислить средние показатели скорости распространения и удельного затухания амплитуды когерентных импульсов в слоях супесей. В-пятых, подставить эти значения в (4) и вычислить среднее значение теоретической оценки теплоемкости.

При необходимости допускается использование (4) в проектно-изыскательских работах или мониторинговых исследованиях для расчетного определения теоретических оценок $C_{об}$ мерзлых супесей за пределами г. Якутска в освоенных районах Центральной Якутии, разрез которых сложен однотипными по возрасту и генезису мерзлыми дисперсными (глинисто-песчаными) отложениями. Однако при этом необходимо соблюдать границы изменчивости физических свойств супесей (влажности, засоленности) и температуры в соответствии с данными, приведенными в табл. 3.

Визуальный анализ последовательной серии опытов показывает согласованную изменчивость теоретических оценок неизвестных

⁶ Методика подробно изложена в руководстве [4] и предусматривает анализ частоты распределения совокупности измеренных импульсов на амплитудно-фазовой плоскости и нахождения максимумов двумерной функции их вероятностного распределения с использованием программы «Signal». Полное описание процедур комплексного статистического анализа экспериментальных данных с изучением корреляций переменных и построения между ними уравнений регрессии изложено в [10].

истинных значений $C_{об}$ мерзлых супесей г. Якутска (рис. 2), полученных разными способами. Из графиков рис. 2 следует, что при случайном сочетании значений температуры, влажности и засоленности и иных неучтенных факторов, влияющих на значение $C_{об}$, наблюдается одинаковый относительный характер изменения этой характеристики не только в целом, но и в экстремумах как по (1), так и по данным георадиолокации.

Таким образом, экспериментальные исследования, выполненные по архивным материалам проектно-изыскательских работ, установили существенное влияние теплоемкости слоев мерзлых супесей г. Якутска на скорость распространения и затухание амплитуды сигналов георадиолокации в широком спектре изменчивости влажности, засоленности и температуры. Практический результат исследований заключался в принципиальной возможности использования метода георадиолокации с целью вычисления по вероятностным математическим моделям – уравнениям регрессии, приблизительных теоретических оценок теплоемкости мерзлых супесей как на территории г. Якутска, так и за его пределами в сходных инженерно-геокриологических условиях, например, на обширной территории Центрально-Якутской низменности. Также можно предположить, что установленная в частном эксперименте

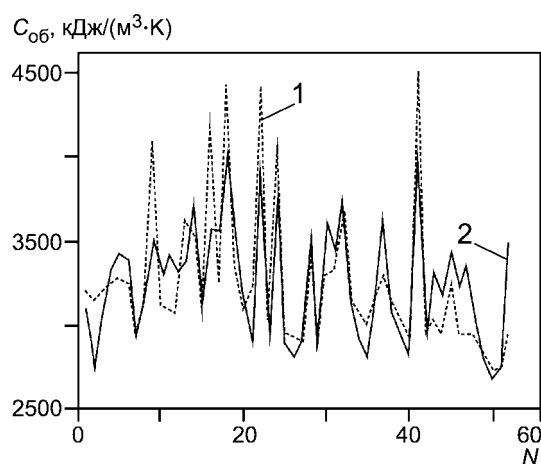


Рис. 2. Сравнительные графики воспроизводимости значений теоретических оценок эффективной объемной теплоемкости мерзлых супесей г. Якутска:

1 – по (1); 2 – по данным метода георадиолокации; N – номер опыта

связь волновых характеристик с теплоемкостью имеет более общий характер и распространяется на все теплофизические характеристики для всего класса мерзлых дисперсных отложений. Это предположение базируется на двух известных положениях. Во-первых, супесь не является каким-либо независимым обособленным образованием и в процессе осадконакопления занимает в толще четвертичных отложений строго определенное место между песчаными и глинистыми фациями. Тем самым, она частично наследует в себе все свойства фаций, в том числе, теплофизические. Во-вторых, теплоемкость тесно связана с теплопроводностью и температуропроводностью.

Изложенный подход косвенного определения теплоемкости методом георадиолокации оправдан с экономической и информационной точки зрения. В дальнейшем разработка математического аппарата регрессионных уравнений может существенно расширить область их практических приложений с использованием иных нерадолокационных методов дистанционных исследований состояния и свойств массивов мерзлых грунтов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Нерадовский Л. Г.** Вычисление температуры мерзлых грунтовых сред по математическим моделям температурной зависимости сигналов георадиолокации // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 52 – 57; **Neradovskii L. G.** Calculation of the temperature of frozen ground on the basis of mathematical models of the temperature dependence of ground penetrating radar signals // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 8. P. 931 – 938.
2. **Нерадовский Л. Г.** Зависимости атрибутов сигналов георадиолокации от свойств мерзлых супесей // Инженерные изыскания. 2012. № 7. С. 46 – 54.
3. **Трофимов В. Т. и др.** Грунтоведение / Под ред. В. Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005.
4. **Нерадовский Л. Г.** Методическое руководство по изучению многолетне-мерзлых пород методом динамической георадиолокации. М.: Изд-во РАН, 2009.
5. **Гаврильев Р. И., Кузьмин Г. П.** Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом // Наука и образование. 2009. № 4 (56). С. 51 – 54.
6. **Гаврильев Р. И.** Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск: Наука, 1998.
7. **ГОСТ 5180–84.** Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.