

Приведенные данные о химическом и минеральном составе нефритоподобных пород Малокияфарского массива свидетельствуют об их принадлежности к зеленым апоультрамафитовым нефритам.

Проведенный сотрудником Казанского федерального университета А.Г. Николаевым геммологический анализ двух полированных пластин нефрита показал, что по своим характеристикам (окраска, рисунок, просвечиваемость 0,4–0,7 см, декоративность и др.), регламентированным ТУ 41-07-52-90 «Камни цветные природные в сырье», нефритоподобные породы Малокияфарского массива соответствуют поделочному нефриту II сорта при условии минимальной блочности 100×100×50 см.

Таким образом, в результате проведения ревизионных работ в пределах Малокияфарского массива впервые на Кавказе обнаружено проявление нефрита, названное Малокияфарским, а Кяфарская группа массивов ультрамафитов (Малокияфарский, Кяфарский, Агурский, Речепстинский, Церковно-Полянский, Зеленчукский) отнесена к разряду потенциально нефритоносных зон, перспективных на обнаружение промышленных месторождений нефрита.

Таким образом, можно говорить об открытии в России новой Лабино-Малкинской потенциально нефритоносной минерагенической провинции, пространственно совпадающей с одноименным ультрамафитовым поясом.

Нефрит в России в последние годы является наиболее ликвидным и конъюнктурным цветным камнем. Он пользуется ажиотажным спросом на российском и китайском рынках цветных камней: за последние два де-

сятилетия только легальная его добыча и цены на камень увеличились не менее, чем в 10 раз. При этом более 95 % лицензионной добычи нефрита сосредоточены в нефритоносных районах Республики Бурятия: Витимском, где добывается белый (светлоокрашенный) апокарбонатный нефрит, а также в Окинском и Джидинском, где разрабатываются месторождения зеленого апоультрамафитового нефрита.

Приведенная информация о конъюнктуре нефритового сырья и перспективах обнаружения на Кавказе месторождений нефрита определяет необходимость постановки специализированных на нефрит поисковых работ в массивах ультрамафитов Кяфарской потенциально нефритоносной зоны и в первую очередь в Малокияфарском массиве ультрамафитов. Обнаружение и эксплуатация месторождений нефрита на Кавказе позволит решать вопросы социально-экономического развития региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гадиятов, В.Г. Цветные камни Якутии и их месторождения / В.Г. Гадиятов, В.К. Маршинцев. — Екатеринбург: Банк культурной информации, 2000. — 328 с.
2. Плошко, В.В. Гипербазиты Карпато-Крымско-Кавказской складчатой системы / В.В. Плошко. — Киев: Наукова думка, 1986. — 192 с.
3. Полянин, В.С. История геологического развития и минерагения офиолитов Северо-Западного Кавказа / В.С. Полянин, Т.А. Полянина // Отечественная геология. — 2010. — № 4. — С. 61-63.
4. Соболев, Н.Д. Ультрабазиты Большого Кавказа / Н.Д. Соболев. — М.: Госгеолиздат, 1952. — 240 с.

© Коллектив авторов, 2017

Полянин Валерий Сергеевич // root@geolnerud.net
Дусманов Евгений Николаевич // evgeny.dusmanov@gmail.com
Полянина Тамара Александровна // samsam@geolnerud.net
Яковлева Евгения Игоревна // root@geolnerud.net

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.379: 550.361.4

Нерадовский Л.Г. (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН)

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННО-ИНДУКЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В СЛОЕ ГОДОВЫХ ТЕПЛОБОРОТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ЯКУТИИ

Описан новый алгоритм методики вычисления на разной глубине в слое годовых теплооборотов температуры мерзлых грунтов по данным метода дистанционно-индукционного зондирования. На примере одного из инженерных сооружений криолитозоны Якутии показан результат применения методики с анализом ошибок вычислений температуры на глубине 3–10 м по одной из характеристик скорости затухания составляющих гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного то-

чечного диполя (ВВМД) и эффективному электрическому сопротивлению мерзлых грунтов. Предложено апробировать методику в сплошной и прерывисто-островной криолитозоне России с целью изучения пространственно-временной динамики теплового состояния мерзлых оснований инженерных сооружений. **Ключевые слова:** мерзлые грунты, слой годовых теплооборотов, температура, термометрия скважин, метод индукции, поле ВВМД, параметр амплитудного ослабления, эффективное электросопротивление, корреляция, ошибки вычисления.

Neradovskiy L.G. (Melnikov Permafrost Institute SB RAS)
PROCEDURE FOR DETERMINING UPPER-PERMAFROST TEMPERATURE DYNAMICS WITH THE REMOTE INDUCTION SOUNDING METHOD IN YAKUTIA

This paper describes a new procedure for calculating permafrost temperatures within the layer of annual temperature fluctuations from remote induction sounding data. Based on a case

study of an engineering structure in the Yakutian permafrost region, it presents the application of this procedure, along with the error analysis, to predict the ground temperatures at 3–10 m depth from one of the attenuation velocity parameters of the harmonic field of the high-frequency vertical magnetic point dipole (HFVMD) and effective electrical resistivity of frozen ground. It is recommended to test the procedure in continuous and discontinuous permafrost areas across Russia in order to detect the spatiotemporal changes in the thermal state of frozen ground beneath buildings and structures. Keywords: permafrost, layer of annual temperature fluctuation, temperature, borehole thermometry, induction method, HFVMD field, amplitude attenuation parameter, effective electrical resistivity, correlation, calculation errors.

В дополнение к результатам предыдущих исследований [3, 7] в настоящей статье рассматриваются новые методические возможности метода дистанционно-индукционного зондирования (далее, метода индукции) при изучении в слое годовых теплооборотов динамики теплового состояния мерзлых грунтов. Быстрое, экономичное и экологически чистое решение этой задачи исключительно важно в настоящий период времени для развития производительных сил в освоенных и осваиваемых северных территориях России, где построены и эксплуатируются объекты промышленной, гражданской и сельскохозяйственной инфраструктуры по первому принципу, т.е. с сохранением в основаниях мерзлых грунтов.

Цель статьи — познакомить читателей с еще одним результатом, показывающим и подтверждающим реальную возможность метода индукции сравнительно простым путем решить выше обозначенную задачу государственной важности на примере научно-производственного изучения в сплошной криолитозоне Якутии инженерного объекта федерального значения: трассы ж/д «Беркакит-Томмот-Якутск».

Исследования проводились на опасном для эксплуатации ж/д участке между станциями Томмот и Н-Бестях. Этот участок протяженностью 40–45 км находится на Лено-Амгинском междуречье, являющимся крупной частью обширной Центрально-Якутской низменности, где распространен ледовый комплекс. По данным проектно-изыскательских работ ледовый комплекс на участке исследований сложен до глубины 20–60 м толщей мерзлых дисперсных грунтов песчано-глинистого состава. Ниже залегают в разной степени измененные физико-механическим, химическим и криогенным выветриванием коренные породы — скально-полускальные грунты (песчаники, доломиты, известняки). Дисперсные грунты содержат примеси илов, торфа, включения растительных остатков и большое число залежей подземных льдов повторно-жильного генезиса с очень сложной конфигурацией границ, как по латерали, так и по глубине. Подробное описание климатических условий, геологического строения и геокриологических особенностей Лено-Амгинского междуречья находится в работе выдающегося ученого-мерзлотоведа П.А. Соловьева [5].

После строительства и начала пробной эксплуатации ж/д тепловое и соответственно прочностное состояние ее мерзлого основания на участке ледового комплекса стало сильно изменчивым по площади и глубине, хотя и в узком диапазоне температур. На момент проведения исследований в июне 2014 г. температура основания ж/д на максимальной глубине термометрии скважин 10 м изменялась от $-0,1$ до $-2,2$ °С при среднем значении $-1,2$ °С, что в целом соответствует твердомерзлостному состоянию дисперсных грунтов.

Изучение температурного поля в слое годовых теплооборотов выполнялось по ГОСТ 25358-82 [1] методом полупроводниковой термометрии по стволу скважин с шагом 1 м до глубины 6–10 м. Для оценки температуры мерзлых грунтов применялись хорошо себя зарекомендовавшие в практике геотермии терморезисторы ММТ-4. Они были отградуированы с высокой точностью (порядка $0,01$ °С) по разработанной в ИМЗ СО РАН методике, позволяющей достоверно изучать динамику даже высокотемпературного состояния мерзлых грунтов [4].

Поле высокочастотного вертикального магнитного точечного диполя (ВВМД) изучалось методом индукции по линиям одиночных разобщенных профилей, совмещенных с линиями термостворов режимных скважин. Длина профилей не более 200 м. Расстояние между точками индукционных зондирований (далее зондирований) в зависимости от условий проходимости и инженерных особенностей насыпи ж/д изменялось от 5 до 50 м.

Полевые измерения выполнялись уникальной по технико-эксплуатационным характеристикам аппаратурой СЭМЗ¹. Методика измерений похожа на методику оценки фоновое амплитудного уровня вторичного поля ВВМД [2], но не имеет с ней ничего общего по целевой направленности.

Излучение и прием поля осуществлялись на частоте 1,125 МГц точечными диполями — кольцевыми антеннами на высоте около 1 м над поверхностью Земли². Излучающая антенна устанавливалась на треноге с угломерным устройством параллельно поверхности Земли и оставалась в таком положении неподвижной в течение всего процесса измерений на точке скважины или пикете профиля. Оператор с приемной антенной удалялся от излучающей антенны в выбранном направлении вдоль насыпи ж/д, начиная делать измерения через 5 м в диапазоне расстояний 5–30 м. При горизон-

¹ Выпускалась в начале 1990-х годов в г. Красноярск НПО «Сибцветметавтоматика» для Министерства цветных и редких металлов и обеспечивала изучение мерзлых грунтов на частотах 0,281; 0,563; 1,125; 2,250 МГц. Ее цифровой аналог — КАВ-ЭММ — выпускается в настоящее время в Красноярском техническом госуниверситете в эксклюзивном исполнении творческой группой радиоинженеров научно-технического центра радиотехники «Мезон». О надежности аппаратуры СЭМЗ свидетельствует факт, что за 25 лет работы в тресте ЯкутГИСИЗ и ИМЗ СО РАН она всего один раз требовала ремонта, причем незначительного.

² Внешний и внутренний диаметр антенн 0,32-0,30 м. При таком размере антенн и расстоянии между ними 5-30 м установку зондирования можно рассматривать как установку с точечными диполями генерации и измерения электромагнитного поля.

Таблица 1

Непараметрическая матрица коэффициентов парных корреляций температуры мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м

Переменные	1 м	2 м	3 м	4 м	5 м	6 м	7 м	8 м	9 м	10 м	t_{sr}
1 м	1.00										
2 м	0.82	1.00									
3 м	0.48	0.60	1.00								
4 м	0.40	0.53	0.96	1.00							
5 м	0.34	0.48	0.92	0.98	1.00						
6 м	0.34	0.46	0.90	0.95	0.99	1.00					
7 м	0.28	0.38	0.84	0.88	0.93	0.95	1.00				
8 м	0.32	0.40	0.83	0.90	0.95	0.97	0.91	1.00			
9 м	0.31	0.38	0.78	0.82	0.88	0.91	0.97	0.91	1.00		
10 м	0.34	0.38	0.80	0.83	0.88	0.91	0.96	0.90	0.99	1.00	
t_{sr}	0.34	0.46	0.91	0.97	0.99	0.99	0.94	0.97	0.91	0.90	1.00

Примечание: Выделенные шрифтом значения означают интервал глубин, где между средним значением и частными значениями температуры мерзлых грунтов существует почти функциональная зависимость.

тальном и вертикальном положении приемной антенны оператор микровольтметром измерял значения амплитуд вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_r) составляющих поля ВВМД. Точность измерений составляющей H_z изменялась от 1,2 до 4,8 мкВ при среднем значении 3,2 мкВ, а составляющей H_r от 3,7 до 11,3 мкВ при среднем значении 5,7 мкВ.

По данным зондирований на скважинах глубина изучения засоленных глинистых грунтов с эффективным электрическим сопротивлением $\rho_{ef} < 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ не превышала 8 м, а льдистых глинистых грунтов и нельдистых песчаных грунтов с $\rho_{ef} > 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ достигала 15 м.

Таким образом, выбранные параметры зондирования (частота, расстояние между антеннами, высота антенн над поверхностью Земли) обеспечили изучение в слое годовых теплооборотов до глубины термометрии скважин как хорошо, так и плохо проводящих переменный электрический ток мерзлых грунтов.

Методика вычисления температуры грунтов

Методика не требует сложных вычислений и не выходит за границы общедоступного статистического анализа электронных таблиц Microsoft Excel. Общий алгоритм вычислений состоит в последовательном выполнении следующих действий:

1) расчет по каждой скважине термометрии среднего медианного значения температуры мерзлых грунтов (t_{sr}) в слое годовых теплооборотов ниже сезонноталого слоя до глубины термометрии скважин;

2) составление по данным термометрии скважин общей таблицы значений t_z — температуры мерзлых грунтов ниже глубины залегания сезонноталого слоя и соответствующих им средних значений t_{sr} ;

3) вычисление и построение графиков значений эффективного электрического сопротивления ρ_{ef} мерзлых грунтов в выбранном диапазоне расстояния между излучающей и приемной антеннами;

4) вычисление по п. 3 среднего значения ρ_{ef} ;

5) вычисление и построение графиков по каждой точке зондирования значений амплитуд отношения и

модуля H_z , H_r (квадратного корня из суммы квадратов их значений) в выбранном диапазоне расстояния между излучающей и приемной антеннами;

6) аппроксимация степенной функцией графиков амплитуд и присваивание значений показателя функции характеристике относительной скорости затухания поля ВВМД, т.е. параметру амплитудного ослабления отношения ($k_{Hz/Hr}$) и модуля (k_{MOD}) H_z и H_r ;

7) оценка типа и уровня корреляции характеристик t_{sr} и t_z на разной глубине;

8) расчет матриц корреляции характеристик t_{sr} и t_z , ρ_{ef} , $k_{Hz/Hr}$, k_{MOD} ;

9) выбор интервала глубин с максимумами корреляции характеристик температурного поля и поля ВВМД;

10) расчет по уравнениям полиномов сначала значений t_{sr} по значениям ρ_{ef} , $k_{Hz/Hr}$, k_{MOD} , а затем значений t_z на разной глубине по t_{sr} ;

Обсуждение результатов

Матрица корреляции характеристик температурного поля мерзлого основания ж/д показывает сильную зависимость t_{sr} от t_z в интервале глубин 3–10 м (табл. 1). Происходит это потому, что на исследуемой территории Лено-Амгинского междуречья в летний и осенний сезоны года процесс периодических колебаний температуры приземного воздуха распространяется до нижней границы слоя годовых теплооборотов в виде монотонно затухающей волны. В результате между значениями температуры на соседних горизонтах глубин образуется преемственная связь, по которой передается рост количества тепловой энергии, вызывающий рост температуры талых грунтов в сезонноталом слое и мерзлых грунтов в нижележащем слое. Мера этой закономерной динамики в мерзлых грунтах во избежание искажающего влияния со стороны ошибок термометрии и локальных тепловых вариаций приблизительно оценивается по среднему медианному значению температуры.

В другой матрице корреляций статистически значимые связи (в табл. 2 они обозначены шрифтом) установлены для t_{sr} , k_{MOD} и ρ_{ef} . Характеристика $k_{Hz/Hr}$ слабо

Таблица 2

Непараметрическая матрица коэффициентов парной корреляции между характеристиками электрофизических свойств мерзлых грунтов

Переменные	t_{sr}	k_{MOD}	$k_{Hz/Hr}$	ρ_{ef}
t_{sr}	1.000			
k_{MOD}	-0.780	1.000		
$k_{Hz/Hr}$	-0.341	0.487	1.000	
ρ_{ef}	-0.674	0.606	0.468	1.000

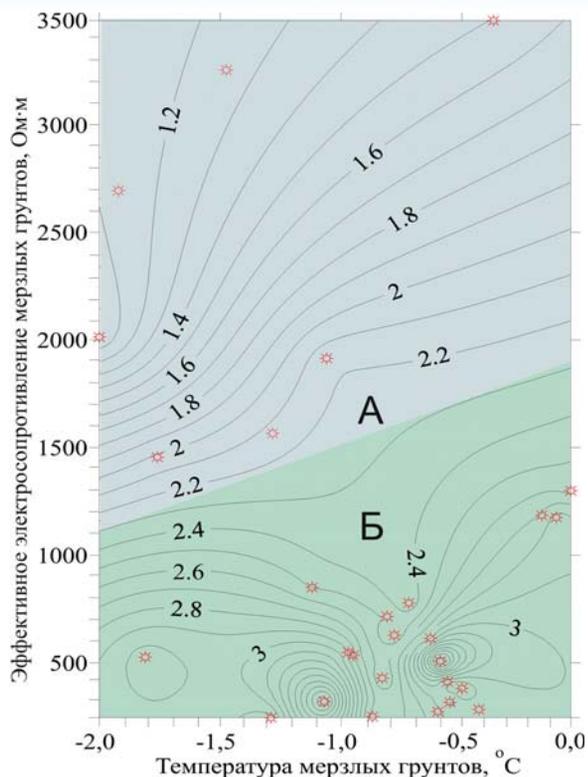


Рис. 1. План изолиний параметра амплитудного ослабления k_{MOD} (модуля значений вертикальной и горизонтальной составляющей поля ВВМД) на частоте 1,125 ГГц в причинной зависимости от средних значений эффективного электрического сопротивления ρ_{ef} и корреляционной связи со средней температурой мерзлых грунтов t_{sr} в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м. Пояснения в тексте

связана с ними³, хотя теоретически связь с k_{MOD} должна быть функциональной. Причина этому в том, что в отличие от идеальной модели горизонтальной и бесконечно протяженной границы двух полупространств (верхнего — воздушного и нижнего — грунтового с однородным строением и изотропными свойствами) методом индукции в полевых условиях исследуется сложная природно-техническая система. В верхней части она представлена насыпью ж/д с негоризонтальными границами и «бесконечно» длинным электронным проводником — рельсами, а также неравномерно распределенных вдоль трассы объектов эксплуатации и обслуживания вместе с природными неоднородностями (участками растительности с сухой и обводненной поверхностью). В нижней части природно-техническая система сложена неоднородными по строению и анизотропными по свойствам мерзлыми дисперсными грунтами. Совокупное влияние верхней и нижней частей системы приводит к рассогласованию взаимной динамики характеристик H_z и H_r . Тем самым в их отношениях появляется элемент случайности, непредсказуемости, разрушающий функциональные или, говоря на языке статистики, детерминированные отношения.

³ Поэтому в дальнейшем обсуждении результатов исследований она не рассматривается.

Двумерная визуализация статистических отношений k_{MOD} с t_{sr} и ρ_{ef} показана на плане изолиний (рис. 1)⁴. Почему говорится о статистических отношениях, обходя общеупотребляемые термины «зависимость» и «связь»? Делается это потому, что эти отношения включают оба термина вместе.

Характеристика скорости затухания поля ВВМД в слое годовых теплооборотов находится в точном понимании причинно-следственной зависимости от эффективного электрического сопротивления мерзлых грунтов. Теоретически и практически эта базовая характеристика электрофизических свойств мерзлых грунтов вместе с другой базовой характеристикой — диэлектрической проницаемостью⁵ регулирует скорость затухания поля ВВМД, делая ее больше или меньше в случаях низких или высоких значений ρ_{ef} . При этом динамика скорости затухания при высоких значениях ρ_{ef} по параметру k_{MOD} (рис. 1) носит нелинейный монотонный характер (область «А»). Начиная с $\rho_{ef} > (1000 \div 1500)$ Ом·м, монотонная динамика нарушается и сменяется на неустойчивую динамику в зависимости от температуры мерзлых грунтов (область «Б»). С этой характеристикой у k_{MOD} нет причинно-следственной зависимости, так как обе они равноправны, а их поведение корреляционно согласовано с перераспределением потоков тепловой энергии в слое годовых теплооборотов, инициированных процессом теплообмена массива мерзлых грунтов в этом слое с атмосферой Земли. Первопричиной в этом процессе выступает источник тепловой энергии — Солнце, а происходящие от нее изменения термодинамики, фазового состава и всего комплекса свойств мерзлых грунтов являются следствием. Все вместе они образуют сложнейшую по структуре, но понятную по существу и наблюдаемую на плоскости коррелирующей иерархическую систему смешанных детерминированных и вероятностных отношений, результатом которых становится видимый облик мерзлых грунтов с их строительными качествами.

Корреляционная связь k_{MOD} с t_{sr} , как и зависимость k_{MOD} от ρ_{ef} , неоднозначна и менее предсказуема в области «Б» (рис. 1) при сравнительно низких значениях ρ_{ef} (сотни омметров) и повышенных значениях t_{sr} (выше $-1,4$ °C).

В целом план изолиний k_{MOD} , построенный по нерегулярной сети точек определенных программой *Surfer-10* с использованием алгоритма регуляризирующей интерполяции *Kriging*, говорит о тенденции роста скорости затухания поля ВВМД в слое годовых теплооборотов до изученной глубины 10 м⁶ при снижении электропроводности и температуры мерзлых грунтов. Этот графический образ двумерной связи сам по себе достаточен для быстрого приблизительного нахождения зна-

⁴ Красными звездочками на плане обозначены точки определения значений исследуемых характеристик.

⁵ Так как она вычислена по программе VMD-1D с учетом диэлектрической проницаемости.

⁶ В построении плана изолиний участвовали не все скважины, а только те, в которых глубина термометрии и индукционного зондирования достигала 10 м. Таких скважин оказалось 28.

чений t_{sr} по заданным значениям k_{MOD} и ρ_{ef} , но для получения более точных результатов и анализа ошибок вычислений их нужно связать одним общим или двумя частными уравнениями регрессии. Разведочный статистический анализ показывает, что с точки зрения приемлемой точности и информационной полноты вычислений сделать это лучше по одному уравнению квадратичной (параболической) регрессии:

$$t_{sr} = 5,2583 - 3,1984 \cdot k_{MOD} - 0,0054 \cdot \rho_{ef} + 0,3811 \cdot k_{MOD}^2 + 0,0017(k_{MOD} \cdot \rho_{ef}) + 0,0000006765 \cdot \rho_{ef}^2 \quad (1)$$

В отличие от уравнений, полученных в работе [3], уравнение (1) освобождает исследователей от довольно сложного кластерного анализа исходного экспериментального материала с разделением и классификаций на статистически однородные группы одинакового минерально-гранулометрического состава и криогенного строения мерзлых дисперсных грунтов. Однако такое удобство применимо только в мониторинговой сети термостворов режимных скважин в пределах изученного ледового комплекса. В этом ограничении уравнение имеет конкретную производственную ценность в части контроля динамики теплового состояния мерзлого основания ж/д на участке, потенциально опасном для ее эксплуатации, причем даже в тех случаях, когда по ряду причин некоторые скважины окажутся непригодными для полупроводниковой термометрии. Такое дублирование утраченных точек режимных скважин точками электромагнитной термометрии имеет особое технологическое значение для сохранения и поддержания сети температурного мониторинга в рабочем состоянии в течение длительного времени эксплуатации ж/д.

Описательная статистика ошибок вычислений t_{sr} по уравнению (1), полученная по 28 точкам скважин, пробуренных до максимальной глубины термометрии 10 м, представлена в табл. 3. Из нее следует, что значение средней ошибки практически равно нулю и с вероятностью 95 % варьирует в интервале $\pm 0,15$ °С. Среднеквадратичный разброс значений ошибок единичных вычислений или частных ошибок, оцененный на уровне вероятности 70 %⁷, заключен в интервале $\pm 0,37$ °С. Если выполнить более детальный анализ распределения количества дискретных значений частных ошибок, округленных до десятого знака, то их разброс с вероятностью 84 % не превысит $\pm 0,4$ °С.

Такой уровень давно принят в геологоразведке за номинально допустимый уровень достоверности и качества поисково-разведочных геофизических работ, принимая во внимание некорректность и неоднозначность решения обратных задач геофизики.

Конечно, такой уровень погрешности вычислений, если и приемлем для единичных определений, то только для оценки предельно низких значений температу-

ры, которая в слое годовых теплооборотов равна $-(1,5 \pm 2,0)$ °С. При изучении мерзлых грунтов с более высокой температурой относительная погрешность растет и при температуре $-(0,1 \pm 0,2)$ °С достигает сотен процентов. При таких температурах даже общепринятая для изучения низкотемпературных мерзлых грунтов погрешность полупроводниковой термометрии $\pm 0,1$ °С становится неудовлетворительной. Однако если во главу угла ставить не знание абсолютных значений температуры грунтов, а знание их относительной изменчивости, то погрешность вычислений температуры, в равной мере распределенная в ту или другую сторону в полосе заданной доверительной вероятности, потеряет свою значимость, не вообще, а в частном порядке, переставая оказывать дестабилизирующее влияние на динамику изменчивости темпера-

Таблица 3
Описательная статистика ошибок вычисления среднего значения температуры мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м

Основные статистики	Ошибка, °С
Среднее	0.02
Стандартная ошибка	0.07
Медиана	0.02
Мода	Нет данных
Стандартное отклонение	0.37
Минимум	-0.93
Максимум	0.59
Количество определений	28
Уровень доверительной вероятности 95%	0.153219

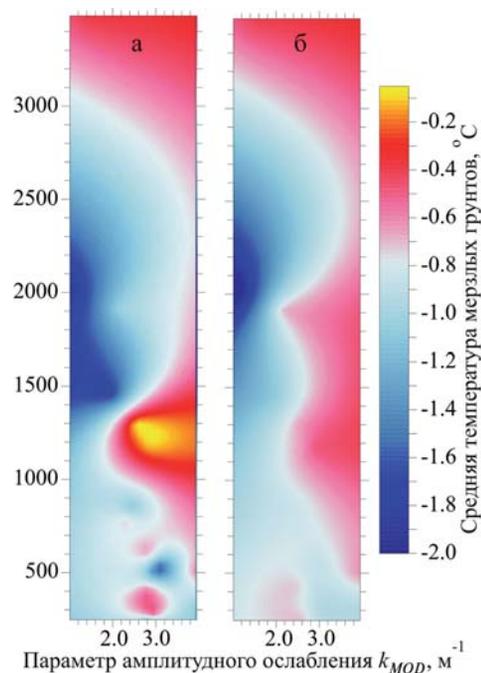


Рис. 2. Двумерные интерполяционные изображения средних значений характеристики температурного поля t_{sr} в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м: а — данные скважинной термометрии; б — результаты вычислений по уравнению (1)

⁷ Такой уровень давно принят в геологоразведке за номинально допустимый уровень достоверности и качества поисково-разведочных геофизических работ, принимая во внимание некорректность и неоднозначность решения обратных задач геофизики.

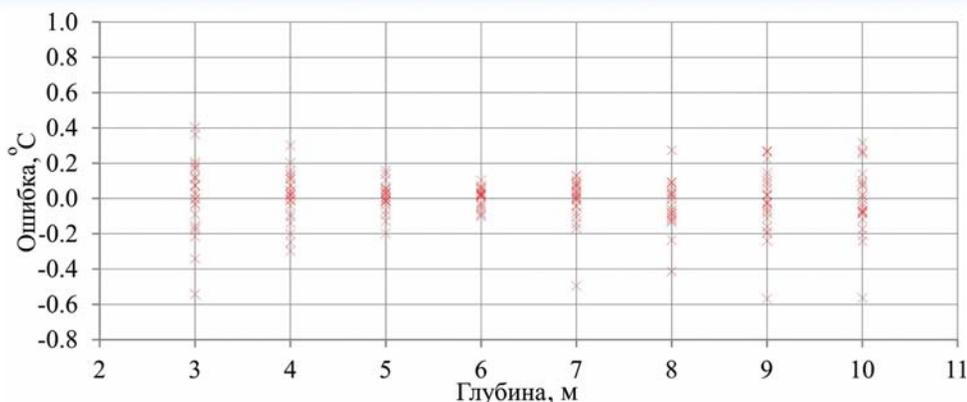


Рис. 3. Вариационный ряд ошибок вычисления в июне 2014 г. по уравнениям (2) — (9) температуры мерзлых грунтов основания ж/д на глубине 3–10 м по параметру амплитудного ослабления k_{MOD} .

турного поля в слое годовых теплооборотов. Доказательным примером этому служит устойчивость интерполяционных изображений температурного поля (рис. 2), полученных по термометрии скважин и вычисленных по уравнению (1). Изображения мало чем отличаются в главных особенностях динамики температурного поля по характеристике t_{sr} . Степень подобия изображений, полученных разными методами, хотя и не высока⁸, но достаточна для правильного анализа общих закономерностей или, иначе говоря, тенденций, в данном случае — тенденции изменчивости t_{sr} в зависимости от k_{MOD} и ρ_{ef} .

Все вышесказанное необходимо для понимания преемственности достоверности результатов дальнейших вычислений по t_{sr} значений температур на глубине 3, 4, 5, 6, ... 10 м. Ради достижения максимально возможной точности аппроксимации исходных данных вычисления выполняются по системе уравнений регрессии в виде полиномов 2-го порядка с разными коэффициентами для разной глубины:

$$t_3 = -0,00844 + 0,295 \cdot t_{sr} - 0,272 \cdot t_{sr}^2 \quad (2)$$

$$t_4 = -0,00690 + 0,599 \cdot t_{sr} - 0,194 \cdot t_{sr}^2 \quad (3)$$

$$t_5 = -0,00451 + 0,934 \cdot t_{sr} - 0,059 \cdot t_{sr}^2 \quad (4)$$

$$t_6 = -0,00347 + 1,190 \cdot t_{sr} - 0,083 \cdot t_{sr}^2 \quad (5)$$

$$t_7 = -0,00401 + 1,420 \cdot t_{sr} - 0,188 \cdot t_{sr}^2 \quad (6)$$

$$t_8 = -0,01540 + 1,350 \cdot t_{sr} - 0,135 \cdot t_{sr}^2 \quad (7)$$

$$t_9 = -0,00397 + 1,810 \cdot t_{sr} - 0,403 \cdot t_{sr}^2 \quad (8)$$

$$t_{10} = -0,00516 + 1,900 \cdot t_{sr} - 0,450 \cdot t_{sr}^2 \quad (9)$$

Проверка уравнений (2) — (9) на фактическом материале, состоящем из 200 определений в интервале глубин 3–10 м, показывает, что с вероятностью 95 % нулевые значения средней ошибки находятся в интервале $\pm 0,03$ °С, т.е. практически стабильны. Разброс частных ошибок с вероятностью 70 % не превышает $\pm 0,19$ °С. Разброс единичных ошибок достигает $\pm (0,57 \div 1,63)$ °С.

⁸ По коэффициенту параметрической корреляции, равному 0,67.

Графический анализ ошибок в зависимости от глубины исследования (рис. 3) свидетельствует, что вычисления по уравнениям (2) — (9) с равной вероятностью завышают или занижают температуру мерзлых грунтов по отношению к данным полупроводниковой термометрии скважин. За исключением одной точки с аномальной ошибкой выше $1,5$ °С на глубине 8 м (на рис. 3 эта точка не показана) поле ошибок распределено в двух типовых группах. В первой группе температура на глуби-

не 5–7 м вычисляется с ошибкой не более $\pm 0,2$ °С. Во второй группе погрешность вычисления вне интервала 5–7 м увеличивается в два раза и в большинстве случаев равна $\pm 0,5$ °С.

По общим правилам аддитивного сложения накапливаемых на разных этапах измерения или вычисления физических величин ошибки вычисления значений температур мерзлых грунтов по формулам (2) — (9) нужно увеличить на величину ошибки вычисления t_{sr} по уравнению (1). В итоге общая средняя ошибка и ее разброс вычисления разноглубинных температур практически не изменятся, а разброс частных ошибок с вероятностью 70 % достигнет $\pm (0,37 + 0,19) = \pm 0,56$ °С. Конечно же, это низкая точность по сравнению с точностью полупроводниковой термометрии скважин $\pm (0,1 \div 0,001)$ °С, но даже этот уровень точности⁹ допустим для метода индукции, если ориентироваться на изучение относительной динамики теплового состояния мерзлых оснований инженерных сооружений. Не зря же метод струнной термометрии с датчиками ПТС-60, обеспечивающими точность оценки температуры $\pm 0,5$ °С, по рекомендации ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева узаконен стандартом предприятия ОАО РАО «ЕЭС РОССИИ» [6] для обязательного включения в систему контрольно-измерительной аппаратуры с целью контроля теплового состояния гидротехнических сооружений, построенных и эксплуатируемых на мерзлых грунтах.

Пример итогового результата производственного применения модифицированной методики корреляци-

⁹ Он может быть повышен до уровня точности полупроводниковой термометрии скважин, если пользоваться при оценке температуры не единичными определениями k_{MOD} и ρ_{ef} , а серией определений в нескольких точках зондирования. При таком допущении, как показывает приведенная в статье статистика, *средний показатель точности* вычисления температуры в вероятностном сочетании единичных определений может оказаться равным даже 0 °С при 28 определениях. В любом случае, и это надо помнить, при таком подходе повышается статистическая оценка точности, и вместе с ней повышается достоверность принимаемых интерпретационных решений по поведению теплового состояния мерзлых грунтов. Но за это приходится платить потерей деталей этого поведения и, порой, очень важных для безопасной эксплуатации инженерных сооружений.

онно-регрессионного пересчета характеристик поля ВВМД в характеристики электромагнитных свойств мерзлых грунтов и через них в характеристики температурного поля мерзлого основания ж/д показан по одному из термостворов режимных скважин, где трасса ж/д пересекает на ПК 7489 безымянный ручей (рис. 4).

Разрез поймы ручья сложен нерегулярным чередованием по глубине и по линии термоствора мерзлых слоев дисперсных грунтов: нельдистых песков, льдистых супесей и реже суглинков и пылеватых песков массивной и слоисто-сетчатой криотекстуры. Сверху они перекрыты несколькими слоями крупнообломочных грунтов (глыбово-щепнистый материал с незначительным содержанием глинистого заполнителя) насыпи ж/д и притрассовых, технологических дорог.

Сравнительный анализ цветных изображений геотермических разрезов убеждает в том, что если они и отличаются по данным полупроводниковой в скважинах и электромагнитной термометрии на поверхности Земли, то в отдельных деталях, а не в передаче относительных тенденций — общей пространственной закономерности динамики температурного поля в текущий

момент времени. Общим и главным здесь в июне 2014 г. является картина поперечной неустойчивости теплового состояния основания ж/д в слое годовых теплооборотов до глубины 10 м. В пределах этого слоя на глубине 3–10 м наблюдается чередование участков с разным тепловым режимом мерзлых грунтов около $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Первый режим характерен для боковых примыканий трассы ж/д (скв. 10/11, 2/12, 13/11), в разной мере затронутых процессом техногенного растепления до глубины 7–10 м в ходе проведения строительных работ. Второй режим типичен для основания ж/д с восстановленным или сохранившимся естественным низкотемпературным режимом под насыпями дорог разного назначения, а также под телом насыпи ж/д (скв. 11/11). Эта закономерность в целом лучше воспроизводится по характеристике ρ_{ef} (рис. 4 б), но по точности локализации границ теплового состояния мерзлого основания под насыпью ж/д уступает характеристике k_{MOD} (рис. 4 в).

Все вместе взятое говорит о том, что на начальной диагностической стадии и последующих контрольных стадиях мониторинга относительная пространственно-временная динамика теплового состояния мерзлого основания ж/д будет заведомо достовернее оцениваться между опорными точками скважин режимной термометрии по совокупности легко определяемых значений ρ_{ef} и k_{MOD} грунтов. Из общей картины изменения средней ошибки вычисления температуры по этим характеристикам (рис. 4 г) видно, что расчетная оценка температуры мерзлых грунтов в центральной части термоствора оказывается преимущественно заниженной на $0,2\text{--}0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (участки синего цвета), а в боковых частях — завышенной на $0,5\text{--}0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (участки красного цвета). В остальных частях термоствора ошибки электромагнитной термометрии распределены около нуля градусов в полосе значений $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. В общем объеме определений доля этих ошибок не так уж и мала — 29 %.

Итак, несмотря на непредсказуемое поведение ошибок разной величины и знака, картина относительной динамики теплового состояния мерзлого основания ж/д на изученном термостворе, как и на других термостворах, результаты по которым в работе не представлены, воспроизводится по данным метода индукции правильно.

Заключение

Результаты исследований на федеральной трассе ж/д показали, что модифицированная методика вычисления по данным метода дистанционно-индукционного зондирования температуры мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов в интервале глубин 3–10 м с шагом 1 м пригодна для диагностики и контроля в сетях мониторинга относительной динамики теплового состояния оснований инженерных сооружений. Ими могут быть как линейные, так и площадные сооружения, построенные и эксплуатируемые на мерзлых дисперсных грунтах не только Лено-Амгинского междуречья, но и всей Центрально-Якутской низменности.

Обязательным условием применения методики на этой территории криолитозоны Якутии, как и в любом другом ее месте, должна быть начальная привязка данных метода индукционного зондирования к геологиче-

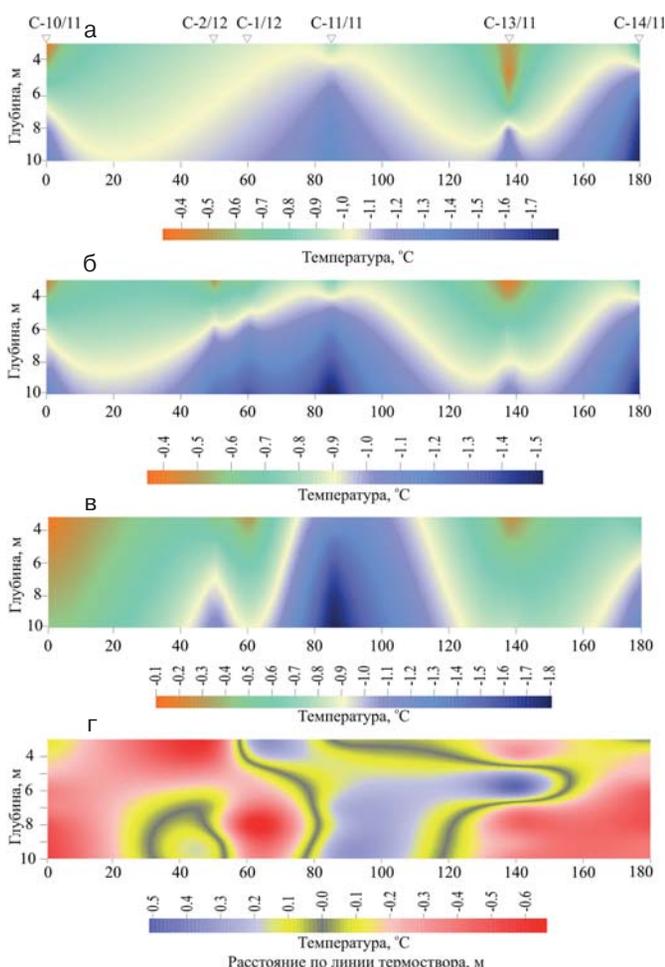


Рис. 4. Геотермические разрезы, построенные по данным термометрии скважин (а) индукционного зондирования (б — среднее эффективное электрическое сопротивление мерзлых грунтов ρ_{ef} ; в — параметр амплитудного ослабления k_{MOD} ; г — ошибки вычисления температуры мерзлых грунтов по уравнению (1))

ским данным. Этот недостаток, присущий всем методам геофизики, образно говоря, является их уязвимой «ахиллесовой пятой». Другой серьезный недостаток, но уже частного порядка, касается метода индукционного зондирования и состоит в отсутствии технической возможности точно контролировать глубину изучения мерзлых грунтов.

Предлагается всем заинтересованным специалистам и организациям апробировать разработанную в ИМЗ СО РАН методику в ходе научной или производственной деятельности в других регионах России. В случае положительной апробации можно рекомендовать методику к применению в производстве проектно-изыскательских работ в сложных инженерно-геологических условиях малообжитых и труднодоступных северных территорий России. Цель одна — минимизировать риск нарушения природного теплового состояния криолитозоны и тем самым обеспечить в ней безопасную эксплуатацию объектов промышленно-гражданской инфраструктуры, что является главнейшей частью одной из приоритетных государственных задач рационального природопользования.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры. — М.: Изд-во Госкомитета СССР по делам строительства, 1982. — 14 с.
2. Задегиголова, М. М. Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии / М. М. Задегиголова. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 32 с.
3. Нерадовский, Л. Г. Связь затухания электромагнитной волны с эффективным электрическим сопротивлением и температурой мерзлых грунтов / Л. Г. Нерадовский // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 4. — С. 26–32.
4. Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геотермических измерений / В. Т. Балобаев, Б. В. Володько, В. Н. Девяткин и др. — Якутск: ИМЗ СО РАН СССР, 1985. — 48 с.
5. Соловьев, П. А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П. А. Соловьев. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 144 с.
6. СТО 17330282.27.140.004-2008. Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений ГЭС. Условия создания. Нормы и требования. — М.: ОАО «ЕЭС РОССИИ», 2008. <http://www.nchzk.ru/lib/54/54041/index.htm>.
7. Шестернев, Д. М. Изучение методом индукции теплового состояния основания автодороги федерального значения «Амур» (Чита-Хабаровск) / Д. М. Шестернев, Л. Г. Нерадовский, А. В. Литовко // Криосфера Земли. — 2016. — Т. XX. — № 2. — С. 100–111.

© Нерадовский Л. Г., 2017

Нерадовский Леонид Георгиевич // leoner@mpi.ysn.ru

УДК 550.83:553.495

Голомолзин В. Е. (ФГУНПП «Геологоразведка»)

МЕСТО И ЗАДАЧИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАМКАХ СТАДИЙНОСТИ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ РАБОТ НА УРАН (ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

*Излагается современный взгляд на место и роль геофизических и геохимических методов при прогнозно-поисковых работах на уран. Обосновывается необходимость обработки ретро- и вновь получаемых материалов с использованием современной компьютерной технологии и цифровых геофизических моделей урановорудных объектов (УРО) разного масштаба. Подчеркивается необходимость научно обоснованного выбора рациональных методов исследований, и предлагаются их эффективные комплексы для разных масштабов. **Ключевые слова:** геофизика, компьютерная технология, уран, прогноз, поиски.*

Голомолзин В. Е. (Geologorazvedka) THE PLACE AND ROLE OF GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS IN THE FRAMEWORK OF THE STAGES OF PROSPECTING WORKS ON URANIUM (HYDROTHERMAL DEPOSITS)

*The article presents a modern view of the place and role of geophysical and geochemical methods in prospecting works on uranium. The necessity of treatment of retro — and reobtained materials using modern computer technology and digital geophysical models of uranium ore objects (UB) of a different scale. Stresses the need for an evidence-based choice of rational complexes of methods of research and offers effective systems for different scales. **Keywords:** geophysics, computer technology, uranium, prediction, searches.*

За последние 30 лет в России не выявлено ни одного промышленного гидротермального месторождения урана крупного и даже среднего масштаба. Это можно объяснить тем, что большинство легко открываемых месторождений уже выявлено, остались слабо проявленные погребенные месторождения, а объемы дорогостоящего бурения (в сравнении с советским периодом) резко сократились. Для выявления рудоконтролирующих структур в этих условиях важнейшую роль должны были играть дистанционные геофизические и геохимические методы, новые технологии обработки материалов.

В Забайкалье — основном регионе, где работы на уран в последние 10 лет велись под девизом «ревизионно-поисковых и поисково-оценочных», в качестве основной задачи ставилась переоценка (дооценка) выявленных ранее рудных объектов с подсчетом запасов. Методика исследований ничем не отличалась от той, что существовала в середине XX века и была рассчитана на широкое применение буровых работ. В настоящее время объемы бурения оказались несопоставимыми с теми, что были ранее, а возможности геофизических методов по выявлению новых рудоконтролирующих структур использовались слабо. Этим можно объяснить тот факт, что за счет ревизии ранее выявленных рудных объектов получить какую-либо существенную добавку по приросту запасов не удалось, а новые промышленные объекты не были выявлены.

Примеры таких работ имеются по АО «Сосновгео» (Чарский урановорудный район (УРР), Акуинская вулкано-тектоническая структура (ВТС), Таширский УРР), БФ «Сосновгеология» (Черепановская, Окунайская площади Аkitканского УРР, Мухор-Галинская ВТС), ФГУГП «Читагеологоразведка» (Родниковая зона, Уртуйская ураново-рудная зона (УРЗ), Урово-Урюмканский УРР) и др.