

## ОБ ОТОБРАЖЕНИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ДВУМЕРНЫХ МОДЕЛЯХ ГЕОЭЛЕКТРИКИ

Сергеев К.С.<sup>1</sup>, Белоусов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина», Москва, Россия (119991, г. Москва, Ленинский проспект, 65/1), e-mail: seis@gubkin.ru

Проведено моделирование верхней части геологического разреза (до первых сотен метров), содержащей включения многолетнемерзлых пород (ММП), характерных для северных районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Дифференциация свойств моделей выполнена по значениям удельных электрических сопротивлений. Для набора моделей рассчитаны соответствующие геоэлектрические разрезы на основе электротомографического эксперимента. По полученным разрезам решалась обратная задача восстановления геологической модели и изучались поля ошибок. Также исследовалось влияние латеральной и вертикальной изменчивости сопротивлений на характер отображения ММП в поле постоянного тока. Установлено, что по рассчитанным разрезам удельных сопротивлений возможно довольно точно восстановить исходные модели, за исключением вертикальных размеров аномалий из-за наличия эквивалентных связей между сопротивлением и мощностями пород. Сделаны выводы о необходимых и достаточных условиях успешности детального картирования многолетнемерзлых пород в реальных условиях.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы (ММП), электропрофилирование, электротомография, моделирование.

## ON THE PERMAFROST REPRESENTATION IN TWO-DIMENSIONAL GEOELECTRIC MODELS

Sergeev K.S.<sup>1</sup>, Belousov A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia (119991, Moscow, Leninsky prospect 65/1), e-mail: seis@gubkin.ru

We performed a modeling study of the upper part of the geological section (down to a few hundred metres), containing inclusions of permafrost (PF), typical for the northern parts of the West Siberian petroleum province. Differentiation of model properties was made by the values of electric resistivity. For a set of models the corresponding geoelectric sections were calculated based on the electrotomographic experiment. Then the inverse problem (restoration of the initial model) was solved for the obtained sections, and study of the error field performed. We also studied the effect of the lateral and vertical variation in the nature of the resistance in the PF representation in geoelectric models. It is found that the calculated resistivity sections allow to quite accurately restore the original model, with the exception of the vertical dimensions of the anomalies due to the presence of equivalent relations between the resistance and the thickness of the rocks. The conclusions about the necessary and sufficient conditions for the success of detailed mapping of permafrost in the real world are made.

Keywords: permafrost (MMP), electric profiling, electric tomography, modeling.

Под многолетнемерзлыми породами (ММП) понимаются породы, постоянно находящиеся в условиях отрицательных среднегодовых температур [4]. На территории России многолетняя мерзлота распространена, главным образом, на территории Сибири и Урала [2; 6]. Мощность зон вечной мерзлоты может изменяться от первых десятков метров до нескольких километров.

Вопрос изучения распространения и характеристик зон вечной мерзлоты остро стоит при проектировании, сооружении и эксплуатации трубопроводов, скважин, различных объектов нефтегазового комплекса (НГК), жилых зданий и помещений. Исследование и мониторинг зон распространения ММП является неотъемлемой частью общественной и

экономической безопасности. Практика показывает, что при длительной или неправильной эксплуатации объектов НГК ММП могут менять свои прочностные свойства в результате перехода из мерзлого состояния в состояние растепления, что, в свою очередь, может привести к аварийным ситуациям [1]. В настоящее время существуют методы и методики инженерной геофизики, которые позволяют выделять и оконтуривать зоны вечной мерзлоты и зоны растепления, проводить их мониторинг [5].

Одним из наиболее успешных методов выделения зон ММП (в частности, островной мерзлоты) в верхней части разреза (до глубин 120-150 метров) является электроразведка на постоянном токе [3;5], при помощи которой возможно оконтуривание боковых границ ММП, картирование охлажденных пород и криопэггов, определение положения кровли ММП и изучение динамики сезонного промерзания и оттаивания. Мерзлые породы характеризуются резким увеличением величины удельного электрического сопротивления (УЭС) по сравнению с вмещающими толщами.

#### **Цель и методы исследования**

Цель исследования – анализ общего строения и особенностей зон вечной мерзлоты и растепления, связанных с деятельностью предприятий НГК, для установления зависимостей проявления искомым явлений в поле постоянного тока с выработкой рекомендаций по методике проведения работ в реальных условиях.

К методам исследования относится математическое моделирование, обработка результатов измерений. Моделирование выполнялось в программном комплексе ie2Dp 2.0 (автор Бобачев А.А.). Для обработки и интерпретации результатов измерений использован программный пакет Res2DInv.

#### **Модели ММП**

Рассмотрим три группы трехслойных моделей ВЧР – от общего (масштаб месторождения) к частному (масштаб кустовой площадки).

Первая группа отображает общее строение ВЧР и характеризуется отсутствием или наличием реликтовых зон ММП различной мощности и латеральной выраженности во втором слое. При помощи данной группы исследуется разрешающая способность метода.

Вторая группа моделей отображает строение кустовой площадки на месторождении. Она характеризуется отсутствием или наличием островных зон ММП. Особенностью данных моделей является изменение УЭС верхнего слоя в зависимости от времени года. Группа используется для исследования локальной разрешающей способности электротомографии и оценки влияния сезонного промерзания/ оттаивания на результаты наблюдений.

Третья группа моделей отображает строение верхней части кустовой площадки, в которую внесены скважины и зона растепления, образовавшаяся из-за их работы. Данные

третьей группы изначально осложнены различными помехами (низкоомными проводящими зонами – обсадными колоннами скважины зоной растепления; высокоомной зоной ММП), при помощи данной группы исследуются возможности отображения сложных структур в поле постоянного тока.

Свойства моделей и методов моделирования сведены в таблицу 1. Изображения ряда характерных моделей из перечисленных групп представлены на рисунках 1–3а.

Таблица 1 - Модели и методы моделирования

Группа моделей	1	2	3
Латеральный размер, м	2000	600	200
Тип пород верхнего пласта	супесь / суглинки	насыпной песок	
Мощность верхнего пласта, м	30	8	
УЭС пород верхнего пласта, Ом·м	30	120 (лето) / 250 (зима)	
Тип пород среднего пласта	пески	супесь, суглинки	ММП
Мощность среднего пласта, м	300	∞	30
УЭС пород среднего пласта, Ом·м	200	30	1650
Тип аномалии в среднем пласте	ММП	ММП	растепление
Мощность аномалии, м	0 / 50 / 100	0 / до подошвы модели	
Латеральные размеры аномалии, км	0 / 0,2 / 0,4 / 0,8 / 2	0 / 0,12 / 0,24 / 0,6	0 / 100
УЭС аномалии, Ом·м	16000	1650	10
Тип пород нижнего пласта	глины	пески	–
Мощность нижнего пласта, м	70	20	–
УЭС пород нижнего пласта, Ом·м	20	150	–
Длина активной расстановки, м	1420	177,5	
Число электродов в расстановке, шт.	72	72	
Шаг по электродам, м	20	2,5	

### Система наблюдений

При моделировании использовались два типа установок: 4-электродная Шлюмберже (AMNB) и комбинированная 3-электродная (AMN+MNB). Параметры систем наблюдений приведены в таблице 1. Отметим, что таблица содержит параметры, дающие наиболее оптимальный с точки зрения картирования геологического строения результат. Установка Шлюмберже позволяет в условиях сильных неоднородностей получать устойчивые значения КС. 3-электродная установка обеспечивает максимальную глубинность и детальность электротомографических исследований. Выбор данного комплекса установок также обусловлен требованиями нормативных документов (СП 11-105-97, РСН 64-87,

Инструкция по электроразведке по схеме многоэлектродных зондирований (электрическая томография)). Совместный анализ результатов каждого метода при интерпретации разрезов УЭС позволяет снизить риски интерпретации и повысить детальность и точность изображения.

### **Анализ результатов моделирования**

#### **Первая группа моделей**

При отсутствии аномального тела ММП во вмещающем разрезе поля кажущихся сопротивлений (КС) для обеих установок имеют спокойный и ровный характер: прослеживаются все три пласта, которые изначально заложены в модель ВЧР. При наличии ММП во втором пласте довольно точно отрисовываются их латеральные границы. На разрезах появляется высокоомная аномалия (рисунок 1б). По мере увеличения размеров ММП, увеличивается и контраст аномалии по сравнению с вмещающим разрезом; предельный случай соответствует переходу ММП в пласт-изолятор, ограничивающий глубинность и возможность исследования подстилающих пород. Верхняя кромка аномалии прослеживается на разnose 210 м.

Чтобы проверить правильность построения модельных разрезов и корректность задания моделей, при помощи алгоритма двумерной инверсии была решена обратная задача – восстановление геологической модели (разреза УЭС) по модельным разрезам КС. Так как подобная задача является некорректной, необходимо использовать регуляризацию решения за счет градиентного изменения УЭС, что позволяет проводить формальную интерпретацию без учета априорных данных. Из-за интегрального характера метода сопротивлений полученное решение, как правило, упрощает и сглаживает реальные детали геологического строения разреза, завышая мощности слоев. Кроме того, на разрезе могут появляться ложные аномалии, связанные с объектами, расположенными рядом с профилем наблюдений, или краевыми эффектами. Глубины определяются оценочно из-за наличия эквивалентных связей между КС и мощностями пород. В результате мощности могут завышаться, а контраст электрических свойств – занижаться.

Обработка и интерпретация произведены итерационно по следующему графу:

- 1) пересчет разреза КС в разрез УЭС при помощи сеточной/блоковой модели;
- 2) обратный пересчет (моделирование) разреза УЭС в разрез КС;
- 3) сравнение полевого разреза КС с рассчитанным разрезом КС и расчет невязки;
- 4) минимизация невязки.

Результаты решения обратной задачи приведены на рисунке 1 в, г. Рассчитанные разрезы УЭС довольно точно повторяют свои модели. Исключением являются вертикальные размеры аномалий.

При изменении мощности ММП начинают проявляться отличия в «яркости» самой аномалии и в глубине залегания верхней кромки высокоомной зоны. При решении обратной задачи получаются завышенные вертикальные размеры аномалий; ещё одной особенностью данных разрезов является наличие сопутствующих низкоомных аномалий над высокоомной.

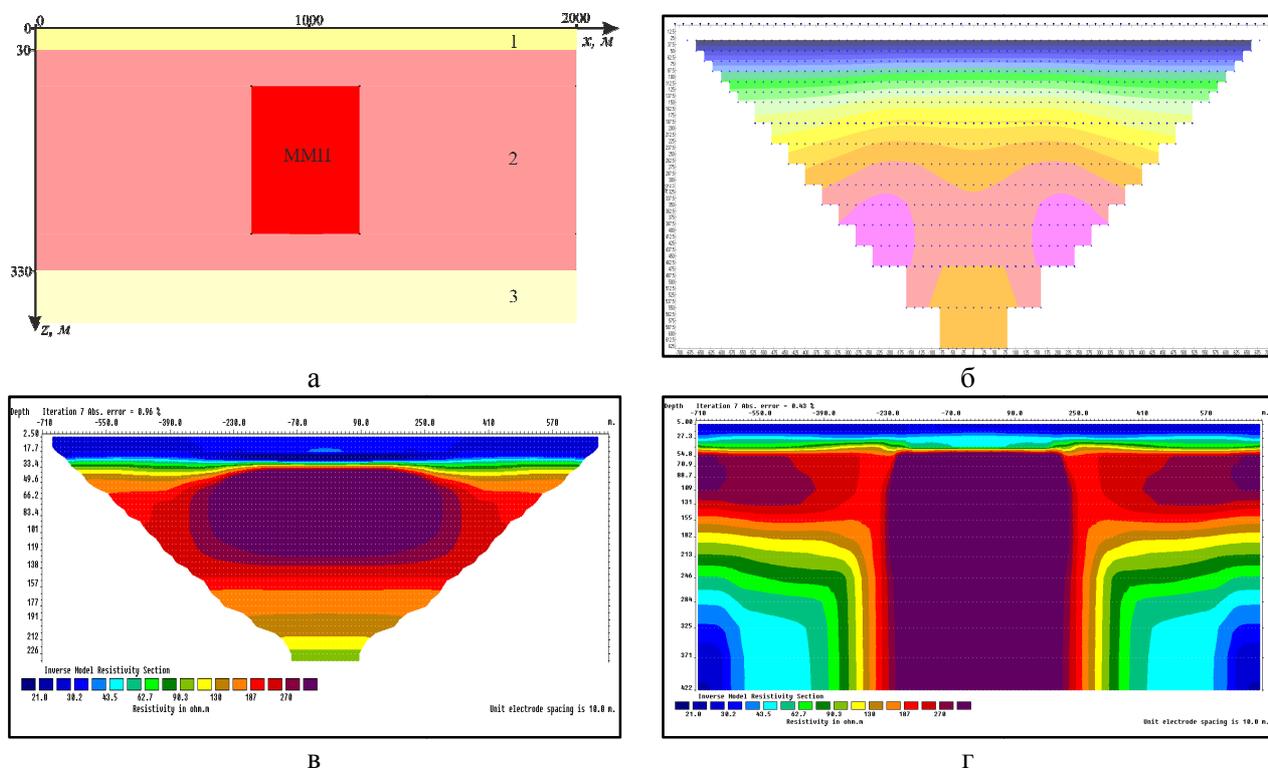


Рисунок 1. Пример модели первой группы: а) модель с реликтовыми ММП; б) разрез КС для установки Шлюмберже (вертикальная ось – половина разноса); в) разрез УЭС для установки Шлюмберже (вертикальная ось – половина разноса); г) разрез УЭС для комбинированной установки (вертикальная ось – глубина).

По данной группе моделей можно сделать следующие выводы:

- при увеличении латеральных размеров аномалии она начинает вносить экранирующий эффект, мешающий прослеживанию третьего пласта;
- на разрезах установки Шлюмберже латеральные размеры аномалий завышены в 1.4–1.5 раза; мощность аномалий занижена в 1,8-2 раза;
- на разрезах комбинированной установки латеральные размеры завышены в 1.2–1.3 раза; мощность аномалий восстанавливается с погрешность 10% при малых размерах аномалии (200×200 и 50×400 м); при возрастании размеров аномалии ее подошва не восстанавливается, в этом случае на разрезах УЭС ММП выглядят как изоляторы бесконечной мощности.

### Вторая группа моделей

Для случая отсутствия аномалий ММП во вмещающем разрезе разрез КС для обеих установок имеет спокойный и ровный характер. При наличии ММП во втором и третьем пластах на модельных разрезах появляется высокоомная зона (рис. 2б), размеры которой больше, чем в исходной модели. Разносы, на которых наблюдаются аномалии, соответствуют истинным глубинам. Разрезы УЭС (рис. 2 в, г) получены по результатам решения обратной задачи. Обращает на себя внимание факт изменения вида аномалии на разрезах УЭС различных методов, что объясняется как исходно различной глубиной методов, так и возникновением краевых эффектов на границе аномалий.

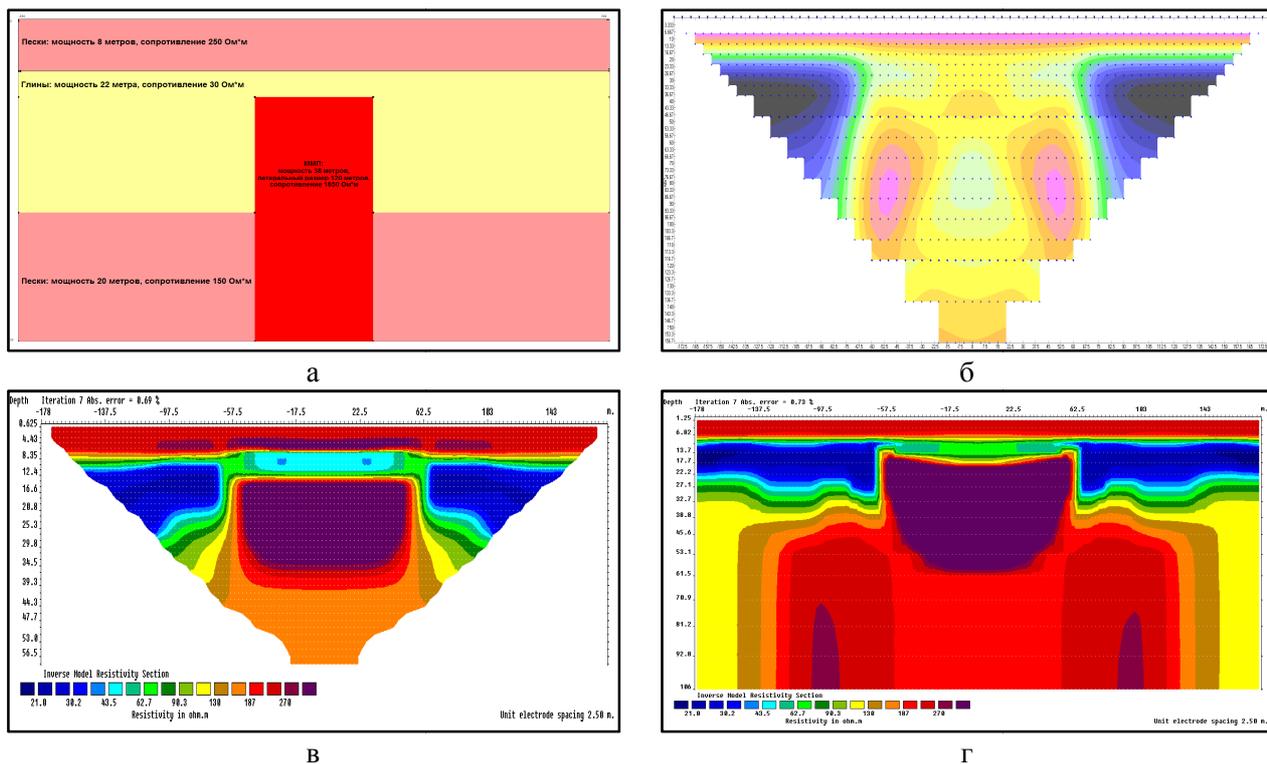


Рисунок 2. Пример модели второй группы: а) модель с реликтовыми ММП (вертикальная ось – глубина); б) разрез КС для установки Шлюмберже (вертикальная ось – половина разноса); в) разрез УЭС для установки Шлюмберже (вертикальная ось – половина разноса); г) разрез УЭС для комбинированной установки (вертикальная ось – глубина)

В данной группе моделей верхний пласт имеет низкое или высокое сопротивление, что соответствует летнему и зимнему периоду (в зимнее время верхний пласт промерзает, и его УЭС возрастает). Так как именно в этот пласт происходит заземление электродов, высокое сопротивление может стать причиной уменьшения общей глубины исследования и ухудшения качества данных.

В целом для данной группы моделей можно отметить следующее:

- латеральные размеры аномалий восстанавливаются с погрешностью 5-10%;
- кровля ММП восстанавливается с погрешностью 7-10%;

- подошву ММП проследить довольно сложно из-за того, что третий пласт имеет высокое сопротивление;
- изменение сопротивления верхнего пласта в 2 раза (со 120 Ом·м до 250 Ом·м) не влияет на качество данных, точность восстановления моделей и глубинность исследований.

### Третья группа моделей

При отсутствии аномальных тел во вмещающем разрезе поля КС для обеих установок традиционно имеют спокойный и ровный характер. При наличии аномалий на модельных разрезах появляются зоны высоких и низких сопротивлений (рисунок 3б). Аномалии от скважин (проводников, так как обсадная колонна металлическая) для 4-электродной установки выражены вертикальными проводящими зонами, а для 3-электродной установки имеют резко выраженные «косые» границы.

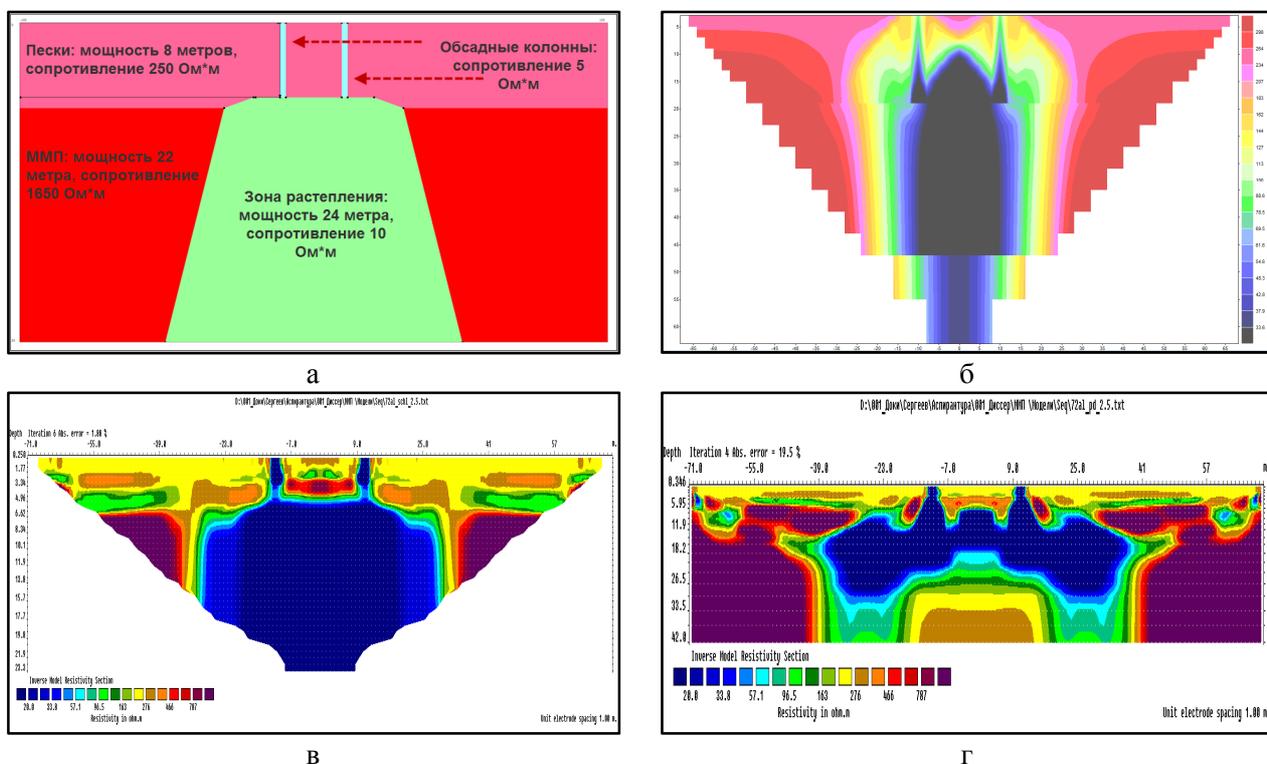


Рисунок 3. Пример модели третьей группы: а) модель, содержащая скважины и зону растепления; б) разрез КС для установки Шлюмберже (вертикальная ось – половина разноса); в) разрез УЭС для установки Шлюмберже (вертикальная ось – половина разноса); г) разрез УЭС для комбинированной установки (вертикальная ось – глубина).

Разрез УЭС для установки Шлюмберже гладкий и выдержанный (рисунок 3в). Разрез УЭС комбинированной установки имеет более сложное строение, но в целом повторяет исходную модель. В зоне растепления присутствует высокоомное тело, которое является артефактом алгоритма инверсии.

Можно отметить, что латеральные размеры зоны растепления восстанавливаются с погрешностью 5-7%; кровля зоны растепления и ММП восстанавливается с

погрешностью 10-12%; пространственное положение низкоомных проводящих зон (обсадные колонны скважин) восстанавливается с точностью до 1-1.5 метра.

### **Заключение**

Приведены результаты моделирования зон ММП и растепления, качественные и количественные оценки моделей, проанализированы ограничения и возможности метода электротомографии. На основе результатов исследований можно сделать вывод, что предложенный метод и приведенные в таблице 1 параметры системы наблюдений позволяют довольно точно установить особенности геологического строения в зонах распространения ММП и растепления. Ошибки, возникающие при восстановлении исходных моделей в сложных разрезах, требуют привлечения дополнительной априорной информации о строении района, получаемой по результатам других геофизических методов (сейсморазведка МОГТ/МПВ, термометрия, магниторазведка).

В целом, несмотря на сложность и многообразие строения и свойств ММП и зон растепления, с помощью методов электроразведки возможно их выделение и изучение.

***Работа выполнена при финансовой поддержке Русского географического общества и концерна Shell.***

### **Список литературы**

1. Гречищев С.Е., Чистотин Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. - М. : Недра, 1980.
2. Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. - М. : ГЕОС, 2002.
3. Ерохин С.А., Модин И.Н., Паленов А.Ю., Шевнин В.А. Картирование реликтовых криогенных полигональных структур с помощью геофизических методов // Инженерные изыскания. - 2011. - №11. - С. 30-35.
4. Ершов Э.Д. Общая геокриология. - М. : МГУ, 2002.
5. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. - М. : МГУ, 2007.
6. Фельдман Г.М. Термокарст и вечная мерзлота. - Н. : Наука, 1984.

### **Рецензенты:**

Шнеерсон М.Б., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», г. Москва;

Рыжков В.И., д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ООО НПП «ГЕТЭК», г. Москва.