

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора геолого-минералогических наук Титова Константина Владиславовича на диссертацию Оленченко Владимира Владимировича на тему: «Геоэлектрические модели криолитозоны Сибири и Центральной Азии и их интерпретация», представленную на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук по научной специальности 1.6.9. «Геофизика»

Представленная на защиту диссертационная работа посвящена исследованию многолетнемерзлых горных пород (ММП) Сибири и Центральной Азии. Наличие ММП того или иного типа характерно для Арктической зоны Российской Федерации и для горных районов. Исследование типа, геометрических параметров и температуры ММП имеет важное научно-прикладное значение особенно в связи с освоением и использованием территорий Арктики и Антарктики, являющимся одним из приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Научная составляющая данного направления связана с вопросами изменения климата, сохранения экосистем, сформировавшимся над ММП, и связанного с этим биологического разнообразия. Кроме того, ММП являются регулятором стока и хранилищем ресурсов воды. Прикладной аспект связан с воздействием мерзлоты (и, особенно, её деградации) на инженерные сооружения и с обеспечением их устойчивости и безопасности эксплуатации.

Исследование ММП основано на сочетании данных непосредственных наблюдений и измерений (в скважинах) и геофизических методов. Среди последних лидирующие позиции занимают методы геоэлектрики на использовании которых основана диссертация. До последнего времени представления о геоэлектрическом строении ММП были основаны на вертикальных электрических зондированиях, ограничения которых очевидно. Поэтому использование автором электротомографии в качестве основного метода позволяет расширить круг задач, решаемый геоэлектрикой. Кроме того, слабо изученной остаётся криолитозона Алтая, в то время как её изучение важно для решения фундаментальных задач климатологии и прикладных изыскательских задач.

Таким образом тема работы – актуальна.

Необходимо отметить сложность обсуждаемой проблемы. В первую очередь она определяется тем, что удельное электрическое сопротивление зависит от многих параметров: электропроводности поровой влаги, пористости породы и извилистости пор, температуры заполнителя пор (вода или лёд), глинистости породы и наличия (отсутствия) сквозной проводимости по электропроводящим или полупроводящим минералам. Кроме того, инверсия данных электротомографии, будучи некорректно поставленной задачей, допускает эквивалентные решения. Поэтому разрешающая способность электротомографии при определении положения геоэлектрических границ и оценке удельного сопротивления слоёв отличается для разных типов разреза.

Для преодоления столь существенной «двойной» неоднозначности автор обосновано применяет четыре оправданных и, как показано в диссертации, эффективных подходов:

1. Классификацию объектов исследования, выбор эталонных участков, по которым имелась геологическая и геокриологическая информация и построение их геоэлектрических моделей;
2. Комплексирование методов геоэлектрики (электротомография, зондирование становлением поля и георадиолокация) и в ряде случаев термометрии;
3. Численное моделирование типичных геоэлектрических разрезов и анализ «теоретических» результатов инверсии над ними;

4. Использование ландшафтных и биологических индикаторов геокриологических условий.

Таким образом в методологическом отношении **настоящее исследование построено логично и непротиворечиво.**

Необходимо отметить, что для всех эталонных участков автор тщательно собрал и систематизировал геологическую и геокриологическую информацию и эффективно использовал её при интерпретации геоэлектрических разрезов.

Общая характеристика диссертации

Первая глава диссертации является вводной, в ней дана классификация объектов исследования и обоснован выбор соответствующих эталонных участков. Отмечу, что чтение этой главы затруднено недостаточным количеством иллюстраций: представлено лишь два рисунка с зависимостями удельного сопротивления от состава породы и температуры. *На мой взгляд для наглядности разумно было бы представить обзорную карту расположения эталонных участков. Это было бы особенно важно, если автор планирует издание настоящей работы в виде монографии.*

Вторая глава диссертации посвящена построению моделей горной криолитозоны Южной Сибири и Тянь-Шаня. К сегодняшнему дню основные результаты по горной криолитозоне получены в Альпах. Тем более важно изучение особенностей распространения ММП и их морфологии в Сибири и Центральной Азии.

Первая из рассмотренных моделей относится к случаю смены типа многолетнемерзлой толщи при высотной поясности. Выбранный участок южного склона Курайского хребта имеет выдержанную экспозицию и характеризуется отсутствием леса, что позволяет исключить влияние азональных факторов. Данные электротомографии, полученные при перепаде абсолютных отметок от 1650 до 2600 м, позволили получить геоэлектрическую модель трёх типов распространения ММП: сплошного, прерывистого и островного.

Вторая модель относится к случаю каменного глетчера. В качестве дополнительной информации для истолкования геоэлектрических разрезов привлечены данные о температуре стока каменного глетчера, изотопии ископаемых льдов, картографирования и изучения обнажений и оценки относительного и абсолютного возраста. При этом выполнена оценка удельного сопротивления метаморфического льда (50 – 300 кОмм) и получена зависимость его удельного сопротивления от альтитуды. Получен геоэлектрический разрез, на котором видны четыре генерации каменного глетчера: ранняя динамическая, с блоками метаморфического льда, поздняя пассивная и неактивная. Получены данные о блоковом строении каменных глетчеров важные для моделирования их движения. Эти геофизические данные свидетельствуют о необходимости пересмотра реологических характеристик каменных глетчеров. На основе перечисленных выше результатов и обобщения литературных данных автор построил обобщённую петрофизическую модель каменного глетчера абляционного типа.

Отдельно автором рассмотрено **влияние азональных факторов**: экспозиции склона, тектонических нарушений, техногенных объектов и их влияние на деградацию или аградацию ММП.

Представленный выше экспериментальный материал обосновывает **первое защищаемое положение.**

Третья глава диссертации посвящена разработке геоэлектрических моделей разрезов с пластовыми льдами криолитозоны севера Западной Сибири. Пластовые льды в пойме р. Юрибей отражаются в геоэлектрических разрезах достаточно контрастными субгоризонтальными аномалиями, достигающими 30 – 40 кОмм. По данным численного моделирования глубина их кровли выделяется достаточно надёжно, а подошвы – с большей ошибкой. Показана возможность определения положения морозобойной трещины при детальной электротомографии.

Интересные результаты получены для участка Ямальского кратера на основе электротомографии и зондирования становлением поля. Отмечу высокие значения поляризуемости, полученные по результатам инверсии данных зондирования становлением поля. *Известно, что лёд характеризуется значительной амплитудой поляризации с характерной частотой 5 кГц. Связаны ли с этим высокие значения поляризуемости для первого слоя?* По данным зондирования становлением поля оценена мощность ММП и выявлены признаки пород, содержащих газогидраты, а по данным электротомографии оконтурены области пластовых льдов и локальная аномалия повышенного сопротивления, которая интерпретируется как подводящий канал поступления газа.

На участках развития инфраструктуры нефтегазоконденсатного месторождения сформулированы критерии потери надёжности инженерных сооружений в поле удельных сопротивлений.

Третьим эталонным объектом является стационар «Парисенто». На этом достаточно изученном объекте автором установлены два фактора влияющих на распределения удельного сопротивления, полученных в результате инверсии: проявление отепляющего влияния озера и боковые влияния водоёмов. Очевидно, что первый фактор отражает целевые объекты, а второй – артефакты двумерной инверсии. Последнее является аргументом в пользу реализации в подобных условиях трехмерной электротомографии.

Перечисленные результаты позволили автору сформулировать **второе защищаемое положение.**

Четвертая глава диссертации посвящена построению геоэлектрических моделей каналов фильтрации и разгрузки подземных вод субэкринной криолитозоны. Автором построены геоэлектрические модели развития термосуффозионных процессов и каналов фильтрации и разгрузки наледных вод. Основные результаты этой главы, полученные на двух эталонных участках (Улахан-Тарын и Анмангындская гигантская наледь) сводятся к констатации факта маркирования преимущественных путей фильтрации областями пониженных значений удельного сопротивления по данным электротомографии и интенсивными гиперболами на радарограммах. Эти признаки важны для планирования инженерных решений по защите от суффозионных и наледных процессов. На основании этих результатов сформулировано **третье защищаемое положение.**

Необходимо отметить, что дополнительную информацию по определению областей питания каналов фильтрации можно было бы получить, используя метод естественного электрического поля. Наличие «фильтрационных» аномалий естественного поля позволило бы отличить области пониженного удельного сопротивления связанными с преимущественными путями фильтрации и с изменением литологического состава пород. Это замечание является, скорее, рекомендацией для дальнейших исследований.

Кроме того, не вполне понятны результаты инверсии данных по Анмангындской наледи. Зондирование здесь выполнено бесконтактной дипольной установкой на частоте 16 кГц. При этом в диссертации не указано, какая программа использована для инверсии

данных. Учитывая высокую частоту и высокоомный характер разреза, использование программ инверсии данных на постоянном токе может привести к существенным ошибкам, связанным со влиянием электромагнитной индукции и токов смещения.

В пятой главе диссертации разработана геоэлектрическая модель субаквальной криолитозоны в области развития озёрного термокарста. Полевые эксперименты проведены на эталонном участке акватории лагуны Уомуллах-Кюэль, образовавшейся в результате термокарстовых процессов. Геоэлектрические исследования позволили построить геокриологическую модель трансформации субаквальной криолитозоны включающую последовательно: образование подоцерного талика, его промерзание после дренажа озера и трансформацию мёрзлой толщи в результате перехода в субмаринное состояние. Наглядно показана роль геоэлектрических данных в понимании строения талика, так как мёрзлые породы, вскрытые на забое скважины могли бы быть очередным прослоем мерзлоты.

На основании этих полевых экспериментальных данных сформулировано четвёртое защищаемое положение.

Необходимо отметить возможный недочёт в задании значений удельного сопротивления для численного моделирования. Для илистых опреснённых отложений задано удельное сопротивление 20 Ом, при этом сопротивление поровой влаги составляет 33 Ом. Для засоленных охлаждённых пород задано удельное сопротивление 1.5 Ом, при этом сопротивление поровой влаги составляет 10 – 12.5 Ом. Такое соотношение сопротивлений породы и влаги (когда сопротивление породы меньше, чем влаги) возможно лишь при исключительно высокой поверхностной проводимости, связанной с глинами, что редко встречается в природных условиях. Кроме того, удельное сопротивление поровой влаги 10 Ом соответствует её минерализации 640 мг/л. Можно ли считать такие породы засоленными?

Как отмечалось выше, использование априорной информации для интерпретации данных геоэлектрики является исключительно важным. Обоснованию применения ландшафтных индикаторов ММП посвящена **шестая глава диссертации.**

В ней автор рассматривает связь геоэлектрических разрезов и размеров эпилитных лишайников, а также – особенностей растительности и закономерностей размещения муравейников. Основные результаты исследований сводятся к следующим положениям. На примере каменного глетчера Городецкого на основе возрастного индекса RH5 установлена эмпирическая связь удельного сопротивления и возраста глетчера, обусловленная различными его генерациями. Кустарниковая береза и даурская лиственница маркируют ММП, что является их признаком при геокриологической интерпретации данных геофизики. Аналогично, в условиях Северо-Востока России чозения и тополь являются фитоиндикаторами таликовых зон, что позволяет интерпретировать аномалии низкого удельного сопротивления как связанные с тальными породами, а не с распространёнными здесь пиритизированными сланцами. К биологическим индикаторам относятся и закономерности размещения муравейников в поле кажущегося сопротивления. Автором показано, что муравьи видов *F. aquilonia* и *F. exsecta* располагаются на участках глубокозалегающих ММП или сквозных таликов. Перечисленные выше результаты существенно повышают достоверность геокриологической интерпретации данных геоэлектрики и позволили автору сформулировать **пятое защищаемое положение.**

В заключении подводятся основные итоги диссертационного исследования.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений обеспечена большим массивом экспериментального материала, полученным в различных географических и ландшафтных обстановках, на разных типах криогенных объектов с привлечением априорной информации и при комплексировании разных методов геоэлектрики. Кроме того, обоснованность научных положений подтверждается внутренней непротиворечивостью результатов и логической целостностью работы. Проанализирован значительный материал научных публикаций исследований отечественных и зарубежных авторов (259 источников), который согласуется с авторскими результатами.

Достоверность результатов и выводов обеспечена применением общепризнанного методического и программного аппарата электротомографии, зондирования становлением поля и георадиолокации. Применение аппарата численного моделирования и инверсии синтетических данных также подтверждает достоверность экспериментальных результатов.

Работа в достаточной мере апробирована на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах, семинарах и школах.

Таким образом, научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации в достаточной мере обоснованными и достоверными.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость

В работе обобщены данные геоэлектрики по субаэральной и субаквальной криолитозоне с учётом априорной информации, в частности, с учётом ландшафтных признаков и биологических индикаторов в виде моделей типичных объектов. Эти модели послужат основой для исследований трансформации ММП в условиях глобального изменения климата. Разработанные новые методические подходы к интерпретации данных будут использованы для оценки надёжности объектов инфраструктуры в условиях криолитозоны.

Разработанные в диссертации геоэлектрические модели являются оригинальными. Особенно отмечу модель современного и реликтового подоцерных таликов в зонах развития озёрного термокарста на побережье Северного Ледовитого океана. Безусловно новым результатом также является установленная автором связь положения скоплений муравейников, таликов и аномалий низкого удельного сопротивления.

Научная новизна диссертации сформулирована автором в пяти положениях с которыми я согласен.

Отмечу два общих замечания к работе. Во-первых, для повышения достоверности геокриологической интерпретации данных было бы разумно привлечение геофизической информации, характеризующей изменение литологического состава горных пород. Такую информацию можно получить из данных метода вызванной поляризации, что позволило бы выделить области повышенной глинистости и зоны пиритизации.

Во-вторых, с учётом важности оценки значений удельного электрического сопротивления элементов моделей стоило бы при инверсии данных электротомографии закреплять положение геоэлектрических границ на основе данных георадиолокации. Такой подход помог бы сузить пределы эквивалентности и повысить достоверность определения значений удельного сопротивления.

Эти замечания не умаляют ценности работы и могут рассматриваться в качестве рекомендации для дальнейших исследований.

Представленная диссертация является завершённой научной работой. Отмечается высокое качество её оформление, аккуратность и наглядность рисунков. Содержание автореферата отражает основные идеи и выводы диссертации. Из текста диссертации непосредственно виден вклад автора и его роль: участника или руководителя той или иной работы, соавтора или автора (первого автора) той или иной публикации. Основные результаты опубликованы в 17 статьях в рецензируемых журналах.

Диссертация содержит разработанные соискателем теоретические и экспериментальные положения, представленные в виде геоэлектрических моделей объектов криолитозоны, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Диссертация соответствует критериям п. 9 Положения о присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор достоин присуждения учёной степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Официальный оппонент –
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, заведующий кафедрой геофизики
Санкт-Петербургского государственного
университета



К.В. Титов

