

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Федоровой Ларисы Лукиничны

«Научно-методические основы георадиолокационных исследований горно-геологических условий россыпных месторождений криолитозоны», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.8.3 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертационная работа Федоровой Л.Л. посвящена разработке научно-методических и технологических основ изучения горно-геологических условий и геокриологических параметров массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны методом георадиолокации, направленных на повышение информативности и достоверности результатов эксплуатационной разведки.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 259 наименований. Общий объем – 258 страниц, содержит 117 рисунков и 15 таблиц. Введение убедительно обосновывает актуальность, формулирует цель, задачи, научную новизну и практическую значимость, а также основные защищаемые положения.

Глава 1 представляет собой обстоятельный обзор современного состояния проблемы. Автором детально проанализированы горно-геологические и геокриологические условия двух климатических зон Якутии, проведен анализ существующих методов получения горно-геологической информации (бурение, геофизика) и показаны преимущества и ограничения георадиолокации. Важно отметить, что автор не ограничивается констатацией фактов, а выявляет конкретные научно-практические проблемы, требующие решения, что служит основой для последующих глав.

Глава 2 является ключевой с теоретической точки зрения. Здесь автор вводит понятие георадиолокационной модели и представляет результаты электродинамического моделирования. Особого внимания заслуживает разработка и применение метода дифференциальных ABCD-матриц для решения прямой задачи георадиолокации в слоистых дисперсионных средах с потерями. Дополнительное использование пакета grgMax (FDTD-метод) для моделирования двумерных неоднородных сред (палеорусла, включения валунов) обеспечивает верификацию результатов. Разработанные на основе моделирования типичные георадиолокационные модели для Субарктической и Умеренной зон являются важным итогом главы и служат эталоном для интерпретации натуральных данных.

Глава 3 посвящена алгоритмическому и программному обеспечению обработки и интерпретации данных. Автором предложен алгоритм обработки для слоистых сред, включающий процедуры предварительной обработки, вейвлет-анализа и послойной трассировки. Важным результатом является разработка количественных признаков выявления пластового льда (смена фазы сигнала, отношение амплитуд, изрезанность спектра) и участков структурных неоднородностей (на основе анализа дисперсии амплитуд). Реализация алгоритмов в виде специализированных программ свидетельствует о высокой степени завершенности работы.

Глава 4 содержит результаты экспериментального исследования зависимости скорости распространения электромагнитной волны от влажности и температуры дисперсных пород. Лабораторные эксперименты выполнены корректно, с использованием современных средств измерения. Полученная эмпирическая формула и предложенная на ее основе методика оценки влажности по разносезонным измерениям имеют важное практическое значение для мониторинга состояния грунтов оснований сооружений и контроля процессов сезонного промерзания-оттаивания.

Глава 5 представляет технологию георадиолокационных зондирований при изучении разрабатываемого массива. Даны практические рекомендации по выбору

аппаратуры и параметров измерений, описаны методики картирования дражных полигонов. Результаты работ на конкретных месторождениях (р. Маят, р. Аллах-Юнь, р. Большой Куранах) демонстрируют высокую эффективность разработанных технологий для уточнения гипсометрии плотика, мощности продуктивных песков и выявления зон геологических нарушений.

Глава 6 посвящена инженерно-геологическим приложениям. Рассмотрены методики параметрических зондирований (угловое сканирование, скважинная георадиолокация), а также технология мониторинга криогенных процессов. Результаты физического моделирования процесса оттайки мерзлого массива подтверждают, что смещение центральной частоты спектра отраженных сигналов является информативным признаком увеличения содержания незамерзшей воды. Разработанный программно-методический комплекс, интегрирующий базу данных и ГИС, обеспечивает систематизацию и визуализацию результатов мониторинга, что повышает оперативность принятия решений при эксплуатации горнотехнических сооружений.

В заключении подведены итоги работы, сформулированы основные выводы, которые логически вытекают из содержания глав.

Актуальность темы. Диссертационная работа Федоровой Л.Л. посвящена разработке научно-методических основ применения георадиолокации для изучения горно-геологических условий россыпных месторождений в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Как справедливо отмечает автор, традиционные методы эксплуатационной разведки такие как бурение и шурфование не всегда обеспечивают необходимую детальность и оперативность, а также являются дорогостоящими. В тоже время есть неразрушающие геофизические методы, например, георадиолокация. Однако её применение в условиях криолитозоны сдерживается отсутствием научно обоснованных методик, учитывающих специфику электрофизических свойств мерзлых пород, их сезонную изменчивость и сложное строение россыпей. Разработка таких методик является актуальной научно-технической задачей, особенно для арктических и субарктических регионов. Работа выполнена в русле приоритетных направлений, определенных Стратегией развития минерально-сырьевого комплекса РФ и государственной программой социально-экономического развития Арктической зоны.

Научная новизна.

1. Разработан комплекс георадиолокационных моделей верхней части геологического разреза россыпных месторождений криолитозоны для двух климатических зон Якутии (Субарктической и Умеренной). Модели учитывают как горизонтально-слоистое строение массивов, так и наличие геокриологических объектов (пластовые и повторно-жильные льды, талики, палеоруслы) и структурных нарушений (зоны трещиноватости, карстовые пустоты). Важной составляющей этих моделей является их петрофизическое наполнение – систематизированные данные об электрофизических свойствах (диэлектрической проницаемости и удельном электрическом сопротивлении) основных типов горных пород россыпных месторождений Якутии в мерзлом и талом состояниях.

2. Впервые установлен и теоретически обоснован эффект пространственного гармонического резонанса на длинах волн, соизмеримых с геометрическими размерами подземных льдов. Эффект проявляется в виде режекции спектра частот георадиолокационных сигналов, что позволяет использовать спектральный анализ в качестве диагностического признака для идентификации и оценки мощности ледяных включений. Данный результат имеет фундаментальное значение для теории распространения электромагнитных волн в слоисто-неоднородных средах.

3. Экспериментально выявлен эффект накопления заряда на контрастных по электропроводности границах раздела сред при георадиолокационном зондировании, что

открывает возможности для качественной и количественной оценки электропроводящих свойств геологической среды по данным высокочастотного импульсного зондирования.

4. Установлены эмпирические зависимости между влажностью дисперсных горных пород и относительным изменением скорости распространения высокочастотной электромагнитной волны при переходе из мерзлого состояния в талое ($N_v = 1,55 \cdot W + c$, для диапазона влажности 7–25%). Эта зависимость, учитывающая вещественный состав пород, легла в основу оригинальной методики георадиолокационного мониторинга влажности.

5. Разработаны алгоритмы обработки и интерпретации георадиолокационных данных, основанные на анализе кинематических и динамических характеристик сигналов, включая статистические методы (дисперсионный анализ, корреляционный анализ, кластеризация), вейвлет-преобразование и спектральный анализ. Предложены количественные критерии для автоматизированного выделения геокриологических объектов и зон неоднородностей.

Обоснованность научных положений. Основные научные положения и выводы диссертации представляются хорошо обоснованными. Автором выполнен значительный объем экспериментальных исследований (2000–2025 гг.), включающий лабораторные эксперименты, физическое и численное моделирование, а также натурные георадиолокационные измерения на многочисленных объектах в различных климатических зонах Якутии (Субарктическая и Умеренная зоны).

Достоверность результатов подтверждена сопоставлением с данными контрольного бурения и комплексными геофизическими исследованиями (электроразведка, магниторазведка). Методология работы опирается на корректное использования физического моделирования.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научно-методических основ применения георадиолокации в криолитозоне. Созданные георадиолокационные модели и установленные закономерности связи волновых параметров с физическими свойствами и состоянием многолетнемерзлых пород вносят существенный вклад в теорию и практику геофизических методов исследования верхней части разреза.

Практическая значимость подтверждена внедрением результатов в деятельность горнодобывающих предприятий Якутии (АО «Алмазы Анабара», АО ГДК «Алдголд», ПАО «Мечел»). Разработанные методики позволяют:

- оперативно и с высокой детальностью прослеживать границы продуктивных горизонтов и картировать структурные неоднородности массивов горных пород;
- оценивать влажность дисперсных пород в естественном залегании по данным разносезонных георадиолокационных измерений;
- выявлять и картировать подземные льды;
- осуществлять мониторинг опасных криогенных процессов (пучение, суффозия) в основаниях инженерных сооружений (автодороги, дамбы).

Диссертацию Федоровой Л.Л. отличает большой объем прикладных результатов при корректном применении формальных методов и строгих математических выкладок. Положительной особенностью является то, что все полученные результаты снабжены примерами обработки как модельных, так и экспериментальных данных, подтверждающих справедливость полученных выводов и иллюстрирующих работоспособность приведенных алгоритмов. Разработанные автором георадиолокационные модели, алгоритмы обработки и интерпретации данных, методики оценки влажности и мониторинга криогенных процессов имеют фундаментальное и прикладное значение. Стоит отметить аккуратность автора в проверке выдвигаемых гипотез, практическую направленность представленных в диссертации исследований, логичность построения и четкость изложения материала.

По теме диссертации соискателем опубликовано 132 публикации, из них 42 - в журналах, рекомендованных ВАК РФ, две монографии, один патент, четыре прикладные

программы и две базы данных. Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на всероссийских и международных конференциях.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертации.

Расчет георадарных сигналов осуществляется на основе электротехнического подхода с использованием сосредоточенных параметров – сопротивлений, емкостей, индуктивностей. Такой подход использовался ранее в геоэлектрике, например, для описания анизотропии дисперсии электропроводности. Попытку рассмотреть взаимодействие импульса электромагнитного поля и сплошной среды следует признать неудачной. Уравнения Максвелла описывают взаимодействие электромагнитного поля и сплошной среды, т.е. среды с распределенными параметрами. В этом случае применяется другая математическая техника в отличие от математической техники при описании электротехнических схем. Отсюда следуют неточности в описании электромагнитных явлений на основе теории электродинамики.

Система уравнений (2.1) совершенно верно соответствует уравнениям Максвелла.

Отсюда следует формула (2.2) для случая плоской волны $E_z = H_z = 0$ и поляризации

$$E_y = H_x = 0:$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\sigma E_x, \quad \frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega\mu H_y.$$

Имеет место ошибка в знаке в формуле (2.2), что приводит к дальнейшим неточностям.

Для формулы (2.6) имеем

$$\frac{E_x(z + \Delta z)}{H_y(z + \Delta z)} = \frac{E_x(z) - Z\Delta z H_y(z)}{-Y\Delta z E_x(z) + H_y(z)} = \frac{\frac{E_x(z)}{H_y(z)} - Z\Delta z}{-Y\Delta z \frac{E_x(z)}{H_y(z)} + 1} \neq \frac{E_x(z)}{H_y(z)}. \quad \text{Не ясно как введена}$$

величина $\sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{i\omega\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}.$

В формулах (2.11) и (2.12) необходимо уточнить, они справедливы еще при дополнительном условии $\Delta z \rightarrow 0$.

Не указываются у вводимых величин индексы (2.13, 2.14, 2.20), что затрудняет определение конкретной компоненты электромагнитного поля.

Формулы (2.26) не следуют из уравнений Максвелла.

Не ясно как получена система уравнений (2.31). Нет произведения $\Delta x \Delta y$, которое должно появляться при осреднении по данной площадке. Мне не удалось повторить данный результат.

Рис. 2.14 и 2.15 интересны, однако не уточнено, что задается – источник, приемник, как вычисляется сигнал во временной области (нужно хотя бы указать частотный диапазон и форму импульса в источнике).

Эти досадные неточности снижают общее положительное впечатление от диссертационной работы. Однако, важнейший результат связан с широким использованием физического моделирования. Это значительно достоверней, чем использование численного моделирования.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и носят, скорее, рекомендательный характер, направленный на дальнейшее совершенствование исследований.

Заключение.

Считаю, что диссертация Федоровой Л.Л. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой разработаны теоретические положения, совокупность которых можно рассматривать как научно обоснованный комплекс технических и технологических решений для выполнения георадиолокационных исследований, проводимых при эксплуатационной разведке россыпных месторождений криолитозоны, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

Актуальность темы исследования, научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость полученных результатов свидетельствуют о соответствии диссертации требованиям ВАК, установленным пп. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Федорова Лариса Лукинична, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.8.3 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр».

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук по специальности «04.00.12 - Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых», главный научный сотрудник лаборатории взаимодействия электромагнитных полей и геологической среды Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ЦГЭМИ ИФЗ РАН)


_____ П.Н. Александров

« 12 » мая 2026 г.

Я, Александров Павел Николаевич, согласен на обработку, размещение моих персональных данных и отзыва на диссертацию на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук и в Федеральной информационной системе государственной научной аттестации (ФИС ГНА).

108840, г. Москва, г.Троицк, а/я 30, (ЦГЭМИ ИФЗ РАН)
e-mail: alexandr@gemrc.ru; тел. +7(916-111-49-62)

Подпись 
УДОСТОВЕРЯЮ
Зав. канцелярией ИФЗ РАН

