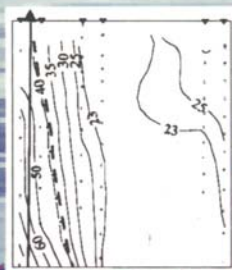
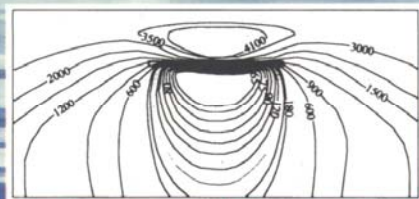


В.В. Стогний

**ИМПУЛЬСНАЯ ИНДУКТИВНАЯ
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА
ТАЛИКОВ КРИОЛИТОЗОНЫ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ**



Якутск 2003

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт биологических проблем криолитозоны
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова

В.В. Стогний

**ИМПУЛЬСНАЯ ИНДУКТИВНАЯ
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА
ТАЛИКОВ КРИОЛИТОЗОНЫ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ**

Ответственный редактор:
доктор технических наук *Г.М. Тригубович*

Якутск 2003

УДК 550.837:551.345:556.38

Рецензенты:

к.т.н. **С.П. Васильев**, д.т.н. **А.В. Омеляненко**

Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. Якутск, 2003. – 124 с.

ISBN 5-436-00025-5 (ООО “Академия”)

В монографии приведены материалы исследований импульсной индуктивной электроразведкой подрусовых таликов рек Лена и Алдан, подозерного талика Хомустах, естественных и техногенных таликов градосферы Якутска. Предложена технологическая схема оптимизации исследований криолитозоны Центральной Якутии импульсной индуктивной электроразведкой на базе трех типов моделей: аппроксимационной физико-геометрической, физико-геокриологической и геолого-геофизической. Показано, что наиболее простой и информативной при картировании таликов соосными установками ЗМПП является методика интерпретации геоэлектрических разрезов, построенных на базе одномерных моделей. Повышение эффективности электроразведочных работ связывается с технологией площадных зондирований становлением с закрепленным источником. Рассмотрены перспективы развития импульсной индуктивной электроразведки для изучения криолитозоны.

Книга рассчитана на геологов и геофизиков, занимающихся исследованием криолитозоны, а также может быть полезна студентам и аспирантам.

УДК 550.837:551.345:556.38

Монография издана за счет средств гранта № 02-05-64476 РФФИ

ISBN 5-436-00025-5 (ООО “Академия”)

© Стогний В.В., 2003

ПРЕДИСЛОВИЕ

Характерными элементами криолитозоны Центральной Якутии являются талики, образование и развитие которых происходит под воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Изучение распространения, морфологии и динамики изменения таликов различного генезиса имеет большое теоретическое значение для создания модели структуры криолитозоны Центральной Якутии. Подрусловые талики рек Лена и Алдан в Центральной Якутии являются главными водообменными зонами в системе «поверхностные воды – подмерзлотные водоносные горизонты», поэтому исследование таликов важно также для понимания динамики подземных вод Лено-Вилюйского артезианского бассейна. Практическая значимость выявления и картирования подрусловых и подозерных таликов определяется задачами водоснабжения населенных пунктов, а естественных и техногенных таликов урбанизированных территорий – геоэкологическими и инженерно-геологическими задачами.

Эффективность геокриологических исследований во многом зависит от уровня внедрения современных геофизических технологий, среди которых особое место занимают методы импульсной индуктивной электроразведки. Вопросам методики и результатам применения метода переходных процессов в модификации зондирований при изучении криолитозоны Якутии посвящена монография «Импульсная электроразведка криолитозоны» (Ю.А. Ним, А.В. Омеляненко, В.В. Стогний), изданная в 1994 г. Необходимость оценки информативности новых технологий импульсной индуктивной электроразведки для изучения криолитозоны и полученный автором материал по картированию таликов Центральной Якутии на основе электромагнитных зондирований методом переходных процессов послужили стимулом обобщения результатов исследований. Основное внимание при постанове работ по проблеме разработки методологии и методики исследования таликов криолитозоны Центральной Якутии на основе применения им-

пульсной индуктивной электроразведки уделено следующим вопросам:

- анализу типов моделей импульсной индуктивной электроразведки применительно к структуре криолитозоны Центральной Якутии;

- математическому моделированию неустановившихся электромагнитных полей типичных моделей таликов криолитозоны при выносных зондированиях с закрепленным источником;

- современному состоянию и перспективам развития методики исследования импульсной индуктивной электроразведкой криолитозоны Центральной Якутии;

- объемному картированию таликов различного происхождения: подрусловых таликов рек Лена и Алдан, подозерного талика Хомустах, естественных и техногенных таликов градосферы Якутска.

Результаты картирования таликов методами импульсной индуктивной электроразведки могут служить основой их мониторинга. Особенно актуальна проблема мониторинга для подозерных таликов, межмерзлотные воды которых используются для водоснабжения, а также для техногенных и естественных таликов городов и поселков Центральной Якутии, так как изменение криогенного состояния грунтов приводит к потере устойчивости инженерных сооружений.

В монографии приведены материалы электроразведочных работ, выполненных автором либо при его непосредственном участии в 1994-2002 гг. в рамках темы РС(Я) «Разработка на основе геофизических методов исследования мониторинга криолитозоны градосферы Якутска с целью предотвращения техногенных катастроф», а также в рамках Государственных программ «Ведение мониторинга подземных вод на территории Центральной Якутии в 1998-2000 гг.» и «Комплексная гидрогеологическая, инженерно-геологическая и геоэкологическая съемка м-ба 1:200000 в Центральной Якутии на площади листов Р-52-Х,ХI,ХII в 1996-2002 гг.». Математическое моделирование неустановившихся электромагнитных полей от типичных моделей таликов криолитозоны выполнено в отделе площадных телеметрических систем электроразведки СНИИГГиМСа (зав. отделом д.т.н. Г.М. Тригубович).

**ПРОБЛЕМА КАРТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА
КРИОЛИТОЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫМИ МЕТОДАМИ**

**1.1. ИЗУЧЕННОСТЬ КРИОЛИТОЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ
ЯКУТИИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫМИ МЕТОДАМИ**

Территория Центральной Якутии в геологическом отношении соответствует Алданской антеклизе Сибирской платформы, с юга ограниченной Алданским щитом, на севере – бортовыми структурами Вилюйской синеклизы, на востоке – передовыми надвигами Верхоянского складчатого пояса, а на западе – Березовской и Ботуобинской впадинами.

К наиболее важным с точки зрения выбора методики полевых геофизических работ и интерпретации материалов импульсной индуктивной электроразведки можно отнести следующие особенности геологического строения Центральной Якутии. Архейские образования кристаллического фундамента, залегающие в пределах Якутского свода на глубинах 600 м и более, доступны для исследования электроразведкой ЗМПП (ЗСБ) и должны учитываться при построении физико-геологической модели криолитозоны на всю ее мощность. Платформенный чехол включает три структурных яруса: 1) венд-кембрийский, сложенный преимущественно карбонатными породами; 2) мезозойский, сложенный терригенными и угленосными толщами; 3) кайнозойский, сложенный слабо уплотненными и рыхлыми осадочными породами.

Верхнепротерозойские и нижнепалеозойские преимущественно карбонатные отложения развиты в южной части Центральной Якутии, так отложения инеканской свиты среднего кембрия обнажаются по долине р. Лена в районе г. Покровска. В центральной части изучаемого региона широко развиты комплексы терригенных угленосных мезозойских отложений, имеющие мощность в несколько сотен метров, а в северной

его части, в пределах южного борта Вилюйской синеклизы, их общая мощность превышает 1 км. Кайнозойские толщи представлены широкой гаммой палеогеновых, неогеновых и четвертичных отложений, состав и мощность которых могут варьировать в очень широких пределах. Данные отложения слагают верхнюю часть разрезов при их суммарной мощности от первых метров до десятков метров, а в пределах Нижнеалданской впадины – до 900 метров (Тектоника ..., 2001).

Центральная Якутия относится к Северной геокриологической зоне сплошного распространения мерзлоты, мощность многолетнемерзлых пород которой изменяется от 200 до 700 м (Основы..., 1998). Глубина сезонного оттаивания в зависимости от особенностей рельефа местности, экспозиции склона, растительного покрова, состава и водонасыщенности пород варьирует от 1 до 5 м. Для верхней части криолитозоны характерны талики, среди которых обычно выделяют как естественные (подрусловые, подозерные, субаэральные), так и техногенные. Мощность подрусловых и подозерных таликов зависит главным образом от площади водоема и его глубины. Обычно контуры подозерных таликов не выходят за пределы "зеркала воды". Сквозные талики имеют локальный характер и приурочены к крупным рекам и озерам (Белецкий, 1975).

На территории городов и поселков Центральной Якутии формируются техногенные талики в результате отепляющего действия канализационных и тепловых сетей, а также технических сооружений. Глубина оттаивания грунтов может достигать 15 метров и более. На криогенное состояние грунтов значительное влияние оказывает засоленность. Согласно Н.П. Анисимовой и Н.А. Павловой (2002), в аллювиальных песках низких террас р. Лена в условиях затрудненного поверхностного и надмерзлотного стока наблюдается обстановка, способствующая формированию многослойных техногенных криопэгов – высокоминерализованных вод с отрицательной температурой.

Центральная Якутия в гидрогеологическом отношении принадлежит к Лено-Вилюйскому артезианскому бассейну. В

пределах долины р. Лена, в районе г. Якутска, подмерзлотные воды вскрыты скважинами на глубине 260-450 м, а на водораздельной части – на глубине 480-500 м (Шепелев и др., 1984). Водоносные горизонты Лено-Вилуйского артезианского бассейна изолированы от поверхности мощными толщами многолетнемерзлых пород, регулирующими их питание и разгрузку.

Задачи картирования и мониторинга криолитозоны Центральной Якутии вызывают необходимость применения высокоэффективных геофизических методов исследования. В 60–70-ых годах XX века при исследовании криолитозоны довольно широко использовались методы сопротивлений – ВЭЗ и электропрофилирование в различных модификациях (Якупов, 2000). В 80-90-ых годах были апробированы методы импульсной электроразведки – радиолокационное зондирование и ЗМПП (Импульсная ..., 1994).

Закономерности изменения мощности многолетнемерзлой толщи на территории Центральной и Северной Якутии изучались методом ВЭЗ (Якупов, 1968, 2000; Калинин, Якупов, 1989), при этом для интерпретации выбирались лишь кривые типа АК с узким максимумом (предельный разнос АВ до 2000 м), а кривые типа КН, А и АА исключались из анализа. Согласно В.М. Калинину и В.С. Якупову (1989), Лено-Амгинское междуречье разделяется на две части с резко отличной мощностью мерзлых толщ: одна из них относится к Лено-Алданскому плато (среднее значение мощности мерзлой толщи 750 м), а другая – к Нижнеалданской равнине (среднее значение мощности мерзлой толщи 360 м).

Опытные работы по определению положения нижней границы мерзлой толщи методом частотного зондирования выполнены О.В. Демченко аппаратурой НЧЗ-64 (Калинин, Якупов, 1989) в районе поселков Покровка, Амга, Беке, Ломтука, Туустаах и Табага. Погрешность определения данной границы методом частотного зондирования по сравнению с данными бурения не превышала 14%.

Для исследования криолитозоны Центральной Якутии практически не применялись методы сейсморазведки, эффективность которых показана для других областей Восточной Сибири и Полярного Урала (Зыков, 1999; Седов, 1988). По нашему мнению, при определении глубины нижней границы мерзлой толщи в Центральной Якутии эффективным может быть метод ЗСБ. Предпосылкой к этому является довольно высокая контрастность по удельному сопротивлению осадочных пород в их мерзлом и талом состояниях, слагающих разрезы Центральной Якутии, а также высокая эффективность применения данного метода в районах Западной Якутии (Методические указания..., 1984).

С целью оценки запасов над- и межмерзлотных вод и изучения контуров таликов под озерами Хомустах и Леонтьевское было проведено электропрофилирование на постоянном токе и ВЭЗ (Жирков и др., 1970; Дмитриев, Толстихин, 1971). Электропрофилирование апробировано также при поиске погребенных повторно-жильных льдов (Мельников, Мельникова, 1971).

Г.Н. Зуевым (1963) и В.П. Мельниковым (1977) по результатам круглогодичных измерений на стационарных установках ВЭЗ исследована изменчивость ρ_k и типов кривых ВЭЗ от мощности сезонно-талого слоя и показано, что градиент ρ_k в функции времени года наибольший в весенние месяцы и наименьший – в летне-осенние. Параметры вызванной поляризации η_k в импульсном варианте и ϕ_k в частотном варианте ВП при наблюдениях на одних и тех же точках также испытывают большие вариации из-за изменения температур и фазового состояния воды в пределах деятельного слоя (Мельников, 1977).

Теоретические оценки возможностей ЗМПП для изучения криолитозоны на основе модели горизонтально-слоистой среды и опытные работы по их реализации в пределах грунтовой плотины у Института мерзлотоведения, животноводческой фермы пос. Владимировка, участков Хомустах и Улахан-Тарын выполнены Ю.А. Нимом (1991).

Из высокочастотных методов исследования криолитозоны Центральной Якутии наибольшее распространение получил метод радиолокационных зондирований. Разработка аппаратуры и методики РЛЗ для условий Якутии выполнены в Институте горного дела Севера (Омельяненко и др., 1985; Омельяненко, Стогний, 1990). В условиях распространения многолетнемерзлых слабо электропроводящих горных пород РЛЗ обеспечивает исследование разрезов в интервале глубин 1-30 м, что обычно удовлетворяет требованиям инженерно-геологических изысканий под строительство. Однако, в пределах таликов глубинность РЛЗ резко падает вследствие высокого поглощения электромагнитных волн (Импульсная, 1994), что вызывает трудности в их изучении.

В опытном варианте опробованы и другие высокочастотные методы, например электромагнитное профилирование аппаратурой СЭМЗ на частотах 562.5 кГц и 1.125 МГц при изучении криогенного состояния грунтов под фундаментом главного здания Якутского государственного университета (Нерадовский, Вас.В. Стогний, 2001).

Таким образом, талики, как элементы криолитозоны Центральной Якутии, различающиеся по своему генезису, морфологии, геологическому строению, обводненности и другим параметрам, представляют большой интерес как в теоретическом, так и в практическом плане, поэтому разработка методики их изучения геофизическими методами является актуальной проблемой.

1.2. ПРОБЛЕМА И ОБЪЕКТЫ МОНИТОРИНГА КРИОЛИТОЗОНЫ

Одним из методов геологических исследований является мониторинг геологической среды (Королев, 1995), который может проводиться на трех иерархических уровнях: глобальном, региональном и локальном. Исходя из определения П.И. Мельникова с соавторами (1993), мониторинг криолитозоны или геокриологический мониторинг – это система изучения,

прогноза и контроля геокриологической среды, оценки изменений геокриологических, инженерно-геологических и гидро-геологических условий под влиянием природных факторов и хозяйственной деятельности человека. Нами под мониторингом криолитозоны понимается информационная технология слежения за ее состоянием при такой периодичности наблюдения и с такими показателями точности и надежности получения информации, которые бы обеспечили возможность установления закономерностей изменения элементов криолитозоны и/или принятия решения к управлению состоянием этих элементов.

Мониторинг на глобальном уровне должен осуществляться с учетом закономерностей изменения климата Земли и отдельных ее регионов, оказывающих влияние на криолитозону. Исходя из данных советско-американского отчета о климате и его возможных изменениях (Предстоящие, 1991), потепление к концу XX века по сравнению со второй половиной XIX века составило 0.5°C . На середину XXI века прогнозируется глобальное среднегодовое потепление климата в различных сценариях: от 2 до 4°C (Гаврилова, 1998), что вызовет резкие изменения температур воздуха в Северной Евразии.

Глобальные изменения климата должны повлечь и перестройку структуры криолитозоны на региональном уровне. Однако, процессы промерзания, как и процессы протаивания многолетнемерзлых пород, являются очень энергоемкими. Образование криолитозоны происходило миллионы лет, поэтому процессы деградации мерзлоты при глобальном потеплении климата, очевидно, также будут протекать очень медленно. На характер распределения температуры по глубине оказывает влияние как нестационарность температурного режима горных пород, так и изменчивость их теплофизических свойств, в силу чего возможна нелинейность температурного поля в горных массивах (Балобаев, 1971).

При ведении мониторинга на региональном и локальном уровнях ведущая роль принадлежит геофизическим методам (Методическое пособие., 2000). При этом под мониторингом экзогенных геологических процессов, в том числе и процессов

промерзания-протаивания, понимается система регулярных наблюдений за режимом этих процессов и прогноза их развития под воздействием природных и антропогенных факторов. Следует отметить, что выбор временного режима наблюдений должен опираться на результаты повторных (два-три цикла) геофизических измерений, которые обычно становятся составной частью последующих режимных наблюдений.

Локальный мониторинг криолитозоны может осуществляться на базе электроразведки и в частности ЗМПП (Вас.В. Стогний, 1998а). Этому способствует, во-первых, контрастность горных пород по удельному электрическому сопротивлению в их мерзлом и талом состояниях, во-вторых, высокие скорости процессов промерзания - протаивания, инициируемые хозяйственной деятельностью, и в-третьих, информативность ЗМПП при картировании элементов криолитозоны.

Важными объектами для локального мониторинга в Центральной Якутии являются подозерные и подрусловые талики, используемые для водоснабжения небольших населенных пунктов. Подземные воды, связанные с таликами, представляют ограниченный и часто невозполнимый ресурс (Анисимова, 2000). В процессе эксплуатации над- и межмерзлотных таликовых вод происходит снижение уровня подземных вод, увеличение их общей минерализации, изменение граничных условий таликовой зоны. Поэтому разведка и подсчет запасов таликовых вод, а также последующий мониторинг границ талика на основе электроразведочных методов является необходимым этапом для выработки оптимального режима работы водозаборов.

Мониторинг техногенных и естественных таликов г. Якутска напрямую связан с проблемой оценки устойчивости инженерных сооружений. Так, в Якутске более половины каменных зданий находится в деформированном и аварийном состоянии вследствие резкого изменения естественного режима вечномерзлых грунтов территории города.

Объектами локального мониторинга криолитозоны могут быть и полигоны подземных ядерных взрывов, которых на территории Якутии проведено 12 (Радиационное, 1993).

Полученные материалы по изменчивости геофизических полей на полигонах ядерных взрывов “Нева-2”, “Нева-3” и “Скв.101” (Стогний и др., 1998а) позволяют сделать вывод об интенсивных физико-химических процессах, проходящих в очаговой и надочаговой зонах, которые могут приводить к деградации мерзлоты (Мониторинг..., 2002).

Мониторинг криолитозоны должен сопровождаться соответствующим информационно-аналитическим обеспечением. Информационно-аналитическое сопровождение включает обработку и интерпретацию материалов исследований с использованием современного программного обеспечения, накопление информации в банках данных, а также оперативное привлечение информации с использованием автоматизированной информационно-поисковой системы для анализа и принятия необходимых решений по оценке состояния исследуемых объектов или управления этим состоянием (Стогний и др., 1999). Общая схема информационно-аналитического обеспечения геокриологических исследований приведена на рис.1.2. Её особенность заключается в следующем: возможность широкого использования при решении геокриологических задач банка цифровой мерзлотно-гидрогеологической и геофизической информации; блока постоянно действующих геокриологических моделей наиболее важных в экологическом отношении объектов Якутии; использование ГИС-технологий, позволяющих проводить пространственный, временной и статистический анализ разнородной и разномасштабной геолого-геофизической информации в прогнозных и геоэкологических целях; возможность картографического представления геокриологической информации. При адаптации данной системы к задачам мониторинга криолитозоны может быть использован опыт эксплуатации геоинформационной системы ГИС-ИНТЕГРО (Черемисина, Митракова, 1998), обеспечивающей полный цикл обработки геологической, геофизической, геохимической и экологической информации и её представление в картографической, цифровой и текстовой формах.

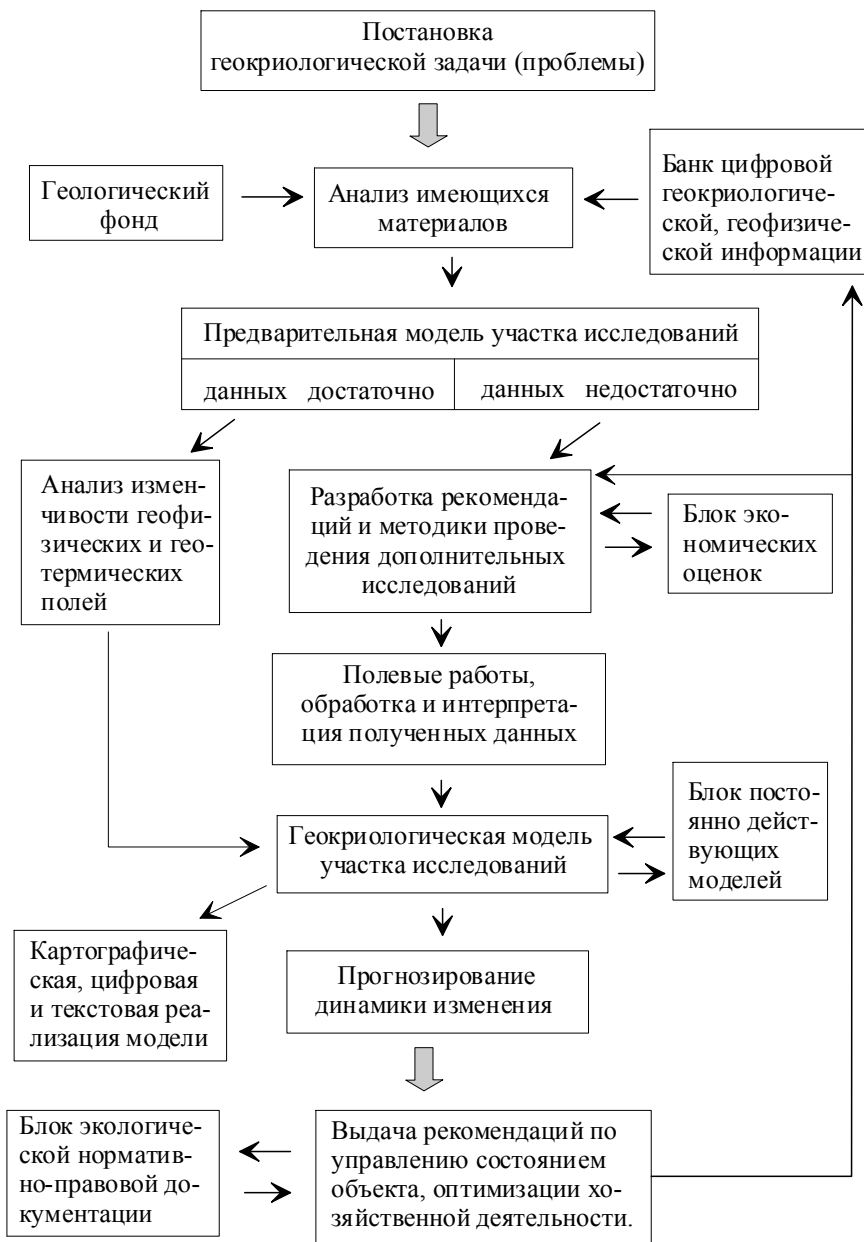


Рис. 1.2. Схема информационно-аналитического обеспечения мониторинга криолитозоны Центральной Якутии методами импульсной индуктивной электроразведки

МОДЕЛЬ КАК ОСНОВА ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

Моделирование является базой решения геофизических задач, в том числе методами электроразведки, однако имеется достаточно большая неопределенность в существующих понятиях модели, применяемых в прикладной геофизике. Поэтому анализ и типизация моделей, а также обзор теоретических моделей импульсной индуктивной электроразведки необходимы для выбора методологической основы картирования таликов криолитозоны Центральной Якутии. Правильность выбора модели в конечном счете определяет успех решения поставленной задачи геофизическими методами (Шейнманн, 1969; Вахромеев, 1978; Якубовский, 1983; Бродовой, 1984; Огильви, 1990; Зыков, 1999 и др.).

2.1. АНАЛИЗ ТИПОВ МОДЕЛЕЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Согласно утверждению В.Н. Страхова (2000), «математика является языком всей науки в целом, но каждая конкретная наука должна иметь свой собственный «диалект» этого языка. В геофизике формирование собственного диалекта единого языка математики обозначает становление математической геофизики как отдельной научной дисциплины в рамках науки геофизики». В связи с этим рассмотрим возможные трансформации понятий «модель» и «моделирование».

Понятия «Модель» и «Моделирование» являются основополагающими не только в разведочной геофизике, но и в науке вообще. Так, в «Физическом энциклопедическом словаре» (1983, с.426) дано такое определение: «В науке любой эксперимент, производимый для исследования тех или иных закономерностей изучаемого явления или для проверки правиль-

ности и границ применимости найденных теоретическим путем результатов, по существу, представляет собой моделирование, так как объектом эксперимента является конкретная модель, обладающая необходимыми физическими свойствами, а в ходе эксперимента должны выполняться основные требования, предъявляемые к моделированию». В основе физического моделирования лежат теория подобия и анализ размерностей. Модель в широком смысле – это схема какого-либо явления или физического объекта, воспроизводящая (приближенно) какие-либо его свойства.

Довольно оригинальные представления о моделях содержатся в монографии С.М. Шейнманна (1969, с. 9): «модель среды, или, иначе, ее упрощенное подобие, строится в соответствии с изучаемой проблемой. В ней сохраняются те и только те свойства оригинала, которые имеют непосредственное отношение к исследуемому явлению. Критерии для отбора свойств модели черпаются из опыта. В прикладных науках это, в первую очередь, опыт производственный. Основным мерилом значимости отдельных процессов в среде-оригинале является точность наблюдения изучаемого или используемого на практике явления». В этой же работе содержатся также сведения о механизме выработки моделей (Шейнманн, 1969, с.9-10): «Выбор модели почти всегда требует большого участия интуиции. Он очевиден только в самых простых случаях. В теории электроразведки, не считая отдельных попыток, ..., модель среды была просто заимствована из классической электродинамики. Эту среду будем называть средой, исходя из принятых обозначений для определяющих ее свойства параметров – электропроводности, магнитной проницаемости и диэлектрической проницаемости».

В приведенных выдержках из работы С.Н. Шейнманна (1969), на наш взгляд, имеются важные характеристики модели как таковой, а также некоторых путей ее реализации. В разведочной геофизике накоплен большой опыт работы с моделями. В практике обычно используют понятие физико-геологической модели (ФГМ). В «Справочнике геофизика»

приведено следующее определение ФГМ (Комплексирование, 1984, с. 10): «под физико-геологической моделью понимается максимально приближенное к реальным условиям обобщенное и формализованное представление об основных геологических и физических характеристиках исследуемого геологического объекта и его вмещающей среды». Для рудных задач В.В. Бродовой (1984, с.52-53) предложил следующее определение ФГМ: «физико-геологическая модель рудного объекта есть максимально приближенное к реальным условиям обобщенное и формализованное представление об основных геологических и физических характеристиках изучаемого геологического тела и его вмещающей среды». Близкое по смыслу определение ФГМ содержится в работе Г.С. Вахромеева (1978, с. 30): «Под физико-геологической моделью объекта геофизических поисков следует понимать абстрактное возмущающее тело, обобщенные размеры, форма и физические свойства которого с той или иной степенью приближения аппроксимируют реальные геологические и рудные образования, подлежащие определению». В «Словаре терминов разведочной геофизики» (1989, с.82) дано два определения ФГМ: «1. Максимально приближенное к реальным условиям обобщенное и формализованное представление об основных геологических и геофизических характеристиках изучаемого объекта и вмещающей среды. 2. Возмущающее тело, обобщенные размеры, форма и физические свойства которого с той или иной степенью приближения аппроксимируют реальные геологические образования, подлежащие обнаружению и изучению». А.А. Огильви (1990, с. 191) сформулировал следующее определение: «Под ФГМ инженерно-геологических объектов понимается обобщенное и формализованное описание пространственно-временной структуры геологических и геофизических полей и параметров, с определенной степенью вероятности отражающей реальные инженерно-геологические объекты». В монографии «Физико-геологическое моделирование верхней части разреза в условиях многолетней мерзлоты» (1989, с. 5) отмечается, что понятие ФГМ широко используется при изучении

верхней части разреза в условиях развития мерзлоты, при этом «под ФГМ понимают систему физических полей от абстрактных возмущающих тел, обобщенные размеры, форма и физические свойства которых с той или иной степенью приближения аппроксимируют реальные геологические образования, подлежащие определению». Для геоэкологических исследований (Вахромеев, 1995, с. 52) принимается, что ФГМ «источника экогеофизических аномалий – это система теоретически ожидаемых физических и геохимических полей и создающих их возмущающих тел, совокупность которых аппроксимирует размеры, структуру, вещественный состав и петрофизические свойства изучаемого природного объекта или экологической ситуации». И, наконец, по мнению Ю.Д. Зыкова (1999, с. 14), ФГМ - «это модель реальной геологической среды, отражающая физические ее свойства и их распределение в объеме».

Таким образом, можно выделить два основных подхода к понятию «ФГМ»: 1) понятие «ФГМ» «привязывается» непосредственно к объекту геофизических исследований, что выражает стремление полнее отразить его свойства: ФГМ рудного объекта (Бродовой, 1984), инженерно-геологических объектов (Огильви, 1990), источника экогеофизических аномалий (Вахромеев, 1995); 2) в понятие «ФГМ» включается не только геологическая среда с присущими ей физическими свойствами, но и физические поля, теоретически рассчитанные либо наблюдаемые (Словарь терминов..., 1989; Физико-геологическое ..., 1989). Схема унификации типов моделей, применяемых в разведочной геофизике, с учетом их иерархической соподчиненности: аппроксимационная физико-геометрическая, физико-геологическая и геолого-геофизическая, предложена В.В. Стогнием и Вас.В. Стогнием (2002).

Аппроксимационная физико-геометрическая модель (АФГМ) – это абстрактная модель пространства, отдельным частям которого поставлены в соответствие определенные физические свойства (кусочно-однородные модели) либо задан закон их изменения (градиентные и неоднородные (анизотропные)).

тропные) среды), для которой разработаны способы (алгоритмы) решения прямых и обратных задач. Физико-геометрические модели электроразведки можно разделить на два класса: 1) базовые, используемые для трансформации результатов измерений в функции кажущихся сопротивлений, кажущихся проводимостей и другие функции, которые не зависят от параметров применяемых установок и отражают свойства моделей; 2) рабочие, которые служат для аппроксимации реальных геологических ситуаций с целью решения прямой и обратной задач. Поскольку основное назначение физико-геометрических моделей – аппроксимация геологических ситуаций, предложена следующая ее аббревиатура - АФГМ.

Физико-геологическая модель (ФГМ) – это модель изучаемой геологической среды (зондирования, разреза, участка и т.д.), отдельным частям которой поставлены в соответствие определенные геологические объекты (рудные, тектонические, магматические и другие) и их физические свойства, оптимизированная как с точки зрения геологических задач, так и возможности их решения тем или иным геофизическим методом (модификацией метода) либо их комплексом. В принятом нами определении ФГМ возвращен ее первоначальный смысл, отражающий формализованное представление об основных геологических и физических характеристиках исследуемого геологического объекта (Комплексирование, 1984; Словарь терминов, 1989). С учетом особенностей решаемых геологических задач и, соответственно, отражения тех или иных геологических и физических особенностей в рамках физико-геологической модели можно выделить различные ее подтипы, например: физико-геокриологическую модель, отражающую криогенное состояние пород (талые-мерзлые) и их физические свойства; физико-инженерно-геологическую модель, отражающую физико-механические свойства отдельных частей геологического разреза; физико-экогеологическую модель, позволяющую проводить оценку экологического состояния геологического объекта и прогноз его изменения. Построение ФГМ проводится с учетом возможностей использования ап-

проксимационных физико-геометрических моделей или их сочетания.

Геолого-геофизическая модель (ГГМ) – это физико-геологическая модель, для которой рассчитаны геофизические поля (решена прямая задача геофизики), либо модель, построенная на основе решения обратной задачи геофизики. В соответствии с этим ГГМ, как и содержащиеся в ней ФГМ, разделяются на априорные, построенные на базе решения прямой задачи, и апостериорные, построенные на базе решения обратной задачи. Первые из них, априорные, обычно создаются на стадии проектирования геофизических работ либо как «стартовые» при проведении интерпретации, а вторые, апостериорные – как результат интерпретации полевого материала. По размерности исследования геологической среды среди них можно выделить одномерные – D1 (зондирование), двумерные – D2 (разрез) и трехмерные – D3 (участок, район исследования). Введение понятия «Геолого-геофизическая модель» фактически узаконивает всегда существовавшее в геофизике положение, что результатом геофизических исследований является геолого-геофизический разрез, петрофизическая карта, блок-схема. Предложенная схема классификации моделей импульсной индуктивной электроразведки приведена на рис.2.1. Таким образом, введение трех типов моделей – АФГМ, ФГМ и ГГМ определяет их иерархическую соподчиненность: ГГМ в качестве элементов содержит ФГМ и соответствующие ей геофизические поля (теоретически рассчитанные или измеренные), а ФГМ, в свою очередь, построена на основе аппроксимации частей геологического пространства, обладающего различными физическими свойствами, АФГМ. Связующим звеном между АФГМ и ФГМ является методика (алгоритм) решения прямой и обратной задачи для выбранной АФГМ. При этом для одной и той же АФГМ может существовать несколько методик (алгоритмов) решения прямой и обратной задачи, а выбор той или иной из них определяется как субъективными «пристрастиями» интерпретатора и его квалификацией, так и обеспеченностью соответствующими программными комплексами.

Связующим звеном между ФГМ и ГГМ является метод (или комплекс методов, если поставленную геологическую задачу решить одним методом невозможно), модификация метода, методика проведения полевых работ, обработки и интерпретации материалов.

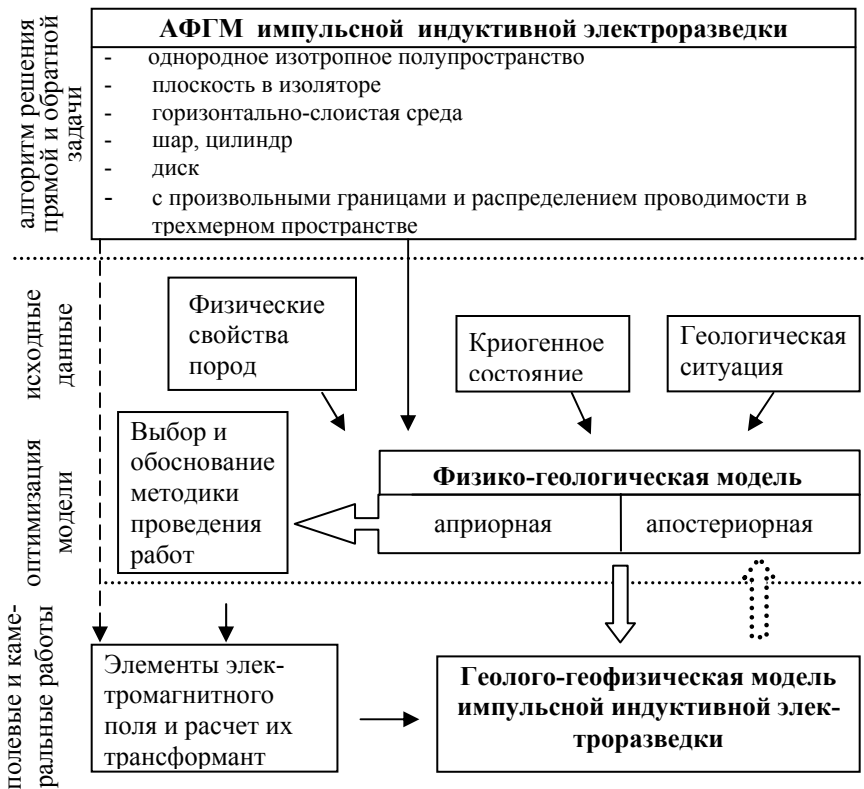


Рис.2.1. Схема классификации моделей импульсной индуктивной электроразведки

Переход в следующую размерность (1D → 2D или 2D → 3D) осуществляется применением соответствующей методики, обеспечивающей решение поставленной геологической задачи: выбор шага зондирований при проведении электроразведочных работ, системы профилей и т.д. Однако, такой переход

может осуществляться и неформальными приемами, например, выбором более совершенной модификации полевых работ либо способа обработки материалов, обеспечивающих более полный учет «размерности» объекта исследований. Для ЗСБ и ЗМПП в качестве такой модификации могут быть площадные зондирования становлением с закрепленным источником - ПЗС-ЗИ (Тригубович, Стогний, 2001). В дальнейшем, вероятно, получат распространение системы группирования датчиков поля импульсной индуктивной электроразведки, аналогичное сейсмической модификации ОГТ, использующие многократные перекрытия (измерение сигнала становления поля в одних и тех же пунктах при различном расположении источника электромагнитного поля) и группирование приемников поля на базе конечной длины, на возможность которых одним из первых обратил внимание Н.А. Ульяновцев (1988).

2.2. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КРИОЛИТОЗОНЫ

Для обоснования физико-геологических моделей элементов криолитозоны выполнен анализ электрических свойств наиболее часто встречающихся комплексов осадочных пород верхней части разрезов платформенного чехла Центральной Якутии в их мерзлом и талом состоянии (табл.2.1). Источником информации об удельном электрическом сопротивлении (УЭС) пород Центральной Якутии послужили данные В.С. Якупова (2000), материалы В.Л. Земляного и ЯкутГИСИЗа.

Удельное электрическое сопротивление горных пород и их комплексов в значительной степени определяется возрастом геологических образований, степенью их консолидации и литологическим составом. Так, например, среднее УЭС неоген-четвертичных отложений, представленных тальми песками, глинами и суглинками, равно 70 Ом·м, а среднее УЭС плотных разностей карбонатных пород кембрия в талом состоянии равно 1000 Ом·м. Одним из важнейших факторов, оказывающим влияние на величину УЭС пород, является их криогенное со-

стояние. Отношение УЭС осадочных отложений Центральной Якутии в их мерзлом и талом состоянии следующее: неоген-четвертичные - более 40, меловые - 75, юрские – 30, кембрийские - более 8. Наибольшая контрастность по УЭС пород в мерзлом и талом состояниях отмечается для неоген-четвертичных и меловых отложений.

Таблица 2.1

Удельное электрическое сопротивление осадочных пород Центральной Якутии в мерзлом и талом состоянии

Возраст	Состав комплекса	Криогенное состояние	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м		
			мин.	макс.	среднее
Кембрийский	доломиты, известняки: 1) плотные	мерзлые	1400	20000	8000
		талые	220	3000	1000
	2) трещиноватые	мерзлые	1000	40000	10000
		талые	100	3000	700
Юрский	пески, песчаники, алевриты	мерзлые	50	5000	3000
		талые	10	1000	100
Меловой	пески, алевриты	мерзлые	80	20000	3000
		талые	5	75	40
Неоген-четвертичный	пески, глины, суглинки	мерзлые	150	12000	3000
		талые	40	700	70

Высокие значения УЭС и высокая их контрастность в мерзлом и талом состояниях характерны для высокольдистых (в значительной степени водонасыщенных) пород, наименьшие значения УЭС и низкая контрастность в мерзлом и талом состояниях отмечается у тонкодисперсных отложений (Физические, 1984).

В области отрицательных температур наблюдается повышение УЭС дисперсных пород при понижении температуры, что связано с переходом рыхлосвязанной воды в кристаллическое состояние (лед). Однако, данная зависимость существенна только для самой верхней части разреза криолитозо-

ны, а именно в зоне суточных и годовых теплооборотов. Температура пород ниже слоя годовых теплооборотов до подошвы многолетнемерзлых пород изменяется в узком интервале: $-(1-2)^{\circ}\text{C}$ (Дучков и др., 1994).

Возможности импульсной индуктивной электроразведки при картировании криолитозоны Центральной Якутии и ее разнообразных элементов оценены на основе анализа физико-геокриологических моделей (ФГКМ), их обобщенных и частных разновидностей. Обобщенные ФГКМ характеризуют криолитозону на всю ее мощность, а частные ФГКМ отражают элементы криолитозоны, оптимизированные с позиций решаемых инженерно-геологических задач.

Обобщенные ФГКМ Центральной Якутии (рис.2.2.1) разработаны на основе данных по разрезам опорных скважин (Табагинская, Якутская, Намская и Фрунзенская) с вычислением средневзвешенных значений и пределов изменения УЭС литолого-стратиграфических комплексов.

Обобщенная ФГКМ I (Табага) характеризует разрез криолитозоны южной части Центральной Якутии, в пределах которой нижнеюрские отложения, залегающие с несогласием на известняках и доломитах кембрия, имеют небольшую мощность и выклиниваются южнее Табагинского мыса. Наиболее контрастной по УЭС является граница между нижнеюрским терригенным и кембрийским карбонатным комплексами, а также подошва многолетнемерзлых пород в пределах кембрийского карбонатного комплекса.

Обобщенная ФГКМ II (Якутск) представляет собой разрез криолитозоны наиболее заселенного района Якутии - долины Туймаада, в пределах которой расположен г. Якутск. В верхней части разреза присутствуют довольно мощные (несколько десятков м) толщи четвертичных отложений (гравийно-галечные образования, пески, глины). Основная часть разреза сложена толщами средней и нижней юры (песчаники, алевролиты, аргиллиты с пластами и прослоями угля), вариации УЭС которых определяются соотношением песчаных и глинистых разностей, а также их криогенным состоянием (талые – мерзлые). Мезозойские отложения непосредственно за-

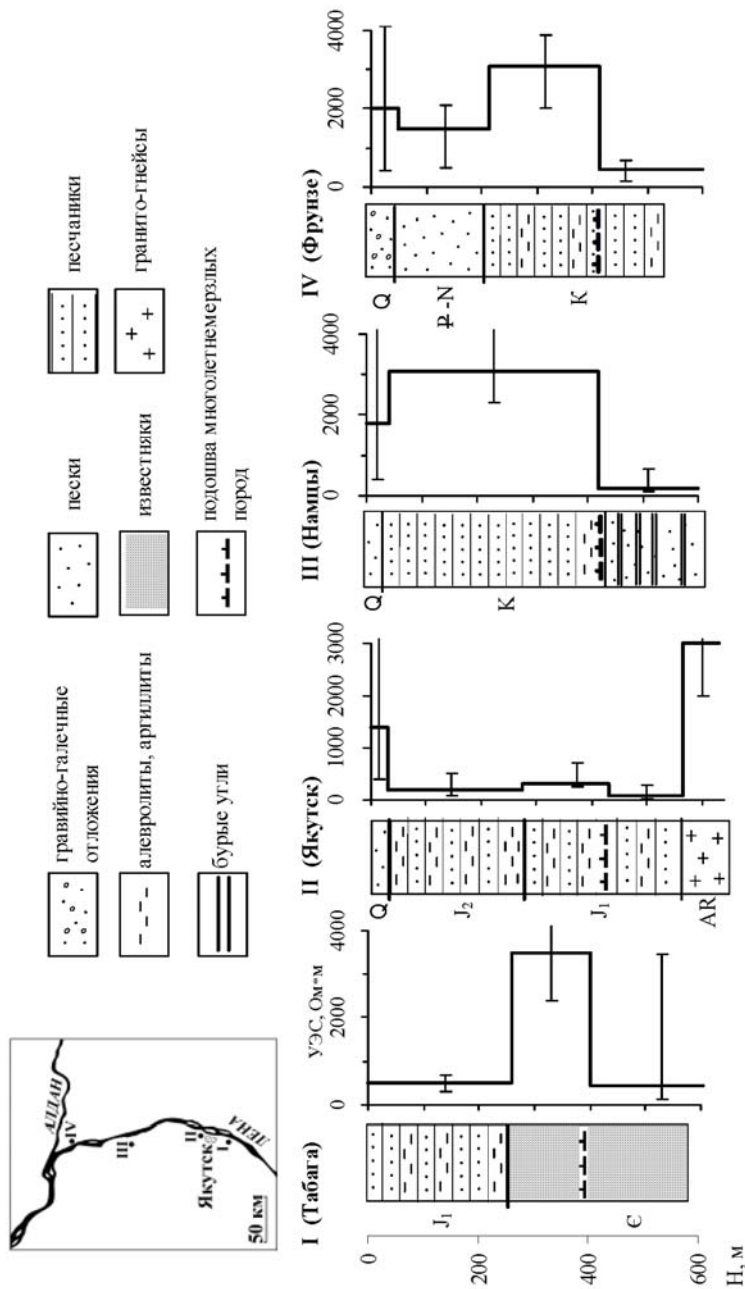


Рис.2.2.1. Обобщенные физико-геокриологические модели криолитозоны Центральной Якутии

легают на раннедокембрийском кристаллическом фундаменте, породы которого имеют высокие УЭС.

Обобщенная ФГКМ III (Намцы). Зона многолетнемерзлых пород развита в существенно песчаниковых толщах меловых отложений, имеющих высокие УЭС, вариации которых определяются соотношением песчаников и аргиллитов, наличием пластов и прослоев углей.

Обобщенная ФГКМ IV (Фрунзе) характеризует разрез криолитозоны северной части Центральной Якутии. В отличие от предыдущей ФГКМ верхняя часть разреза представлена толщами четвертичных и палеоген-неогеновых отложений мощностью в несколько сотен метров, выполняющих Нижнеалданскую впадину. По УЭС наиболее контрастно проявляется граница между мерзлыми толщами палеоген-неогеновых и меловых отложений, а также подошва многолетнемерзлых пород.

Различия в геологическом строении разрезов криолитозоны Центральной Якутии, выражающиеся в наращивании (с юга на север) мощности мезозойских, а в пределах Нижнеалданской впадины четвертичных и палеоген-неогеновых отложений, значительные вариации литологического состава толщ и комплексов, изменения их криогенного состояния (мерзлые-талые) вызывают соответствующие вариации УЭС и, как следствие, многовариантность частных ФГКМ. Типизация последних, а также их оптимизация может быть выполнена относительно решаемых геологических задач. Исходя из особенностей разрезов криолитозоны инженерно-геологические и гидрогеологические задачи Центральной Якутии можно разделить на три группы:

1. Картирование глубины залегания кристаллического фундамента и литологическое расчленение осадочной толщи платформенного чехла, а также определение глубины подошвы зоны многолетнемерзлых пород.

2. Картирование подозерных и подрусловых таликов (до глубины 100-300 м) с целью решения гидрогеологических задач (поиск межмерзлотных и надмерзлотных подземных вод, оценка их засоленности).

3. Картирование таликов верхней (до глубины 15-20 м) части разреза криолитозоны населенных пунктов для инженерно-геологического обеспечения проектируемых и эксплуатируемых зданий и сооружений.

Представленные ниже частные ФГКМ отражают практически все главные элементы криолитозоны Центральной Якутии. Расчеты ЭДС переходных процессов ЗМПП, соответствующие этим моделям, а также пересчет ЭДС переходных процессов в кривые ρ_{τ} , S_{τ} , H_{τ} проведены в системе «МРР». Частные ФГКМ 1-2 (рис.2.2.2) ориентированы на картирование кристаллического фундамента Сибирской платформы, подошвы многолетнемерзлых пород, а также на литологическое расчленение разрезов платформенного чехла. Частные ФГКМ 3-4 (рис.2.2.3) разработаны с целью оценки эффективности ЗМПП при изучении таликов верхней части криолитозоны.

Частная ФГКМ 1 характеризует разрез платформенного чехла на всю его мощность. Удельные электрические сопротивления карбонатных отложений кембрия и венда взяты по данным зондирований становлением в ближней зоне (ЗСБ) аналогичных геоэлектрических разрезов Непско-Ботуобинской антеклизы, мезозойских отложений - по материалам исследований ЗМПП в условиях Большого Якутска. Определение глубины залегания кристаллического фундамента и картирование в разрезе комплексов осадочных пород, различающихся составом и УЭС, является традиционной задачей ЗСБ. В отличие от Непско-Ботуобинской антеклизы общая мощность комплексов пород платформенного чехла в Центральной Якутии и его суммарная проводимость значительно ниже. Расчет ЭДС переходных процессов выполнен для совмещенной установки 300х300 м. На кривой $S_{\tau} = f(H_{\tau})$ комплексам пород, отличающимся по УЭС, соответствуют участки, которые можно аппроксимировать прямыми с различными углами наклона. Условия для исследования таких геоэлектрических разрезов с помощью ЗМПП благоприятные. Анализ данных моделирования показывает (рис.2.2.2А), что по кривой $S_{\tau} = f(H_{\tau})$ возможно определение глубины до кристаллического фундамента, имею-

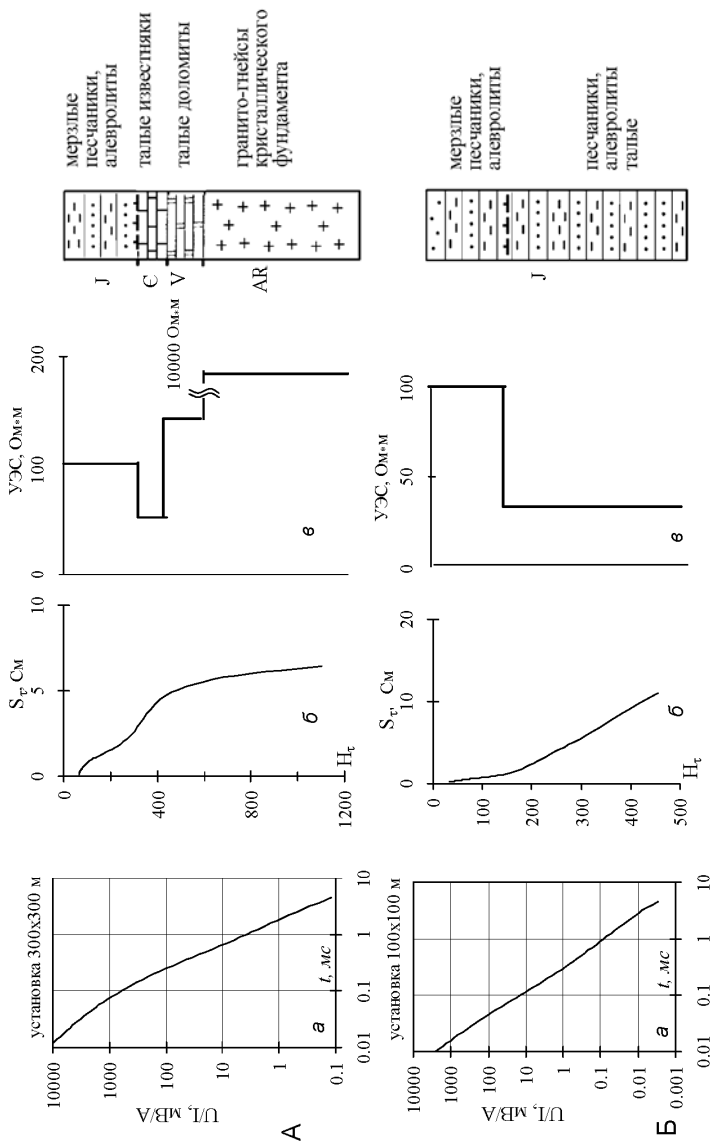


Рис.2.2.2. Частные ФГКМ (А и Б) платформенного чехла Центральной Якутии
а-в - кривые: а - ЭДС переходного процесса; б - $S_{\tau}(H_{\tau})$; в - УЭС

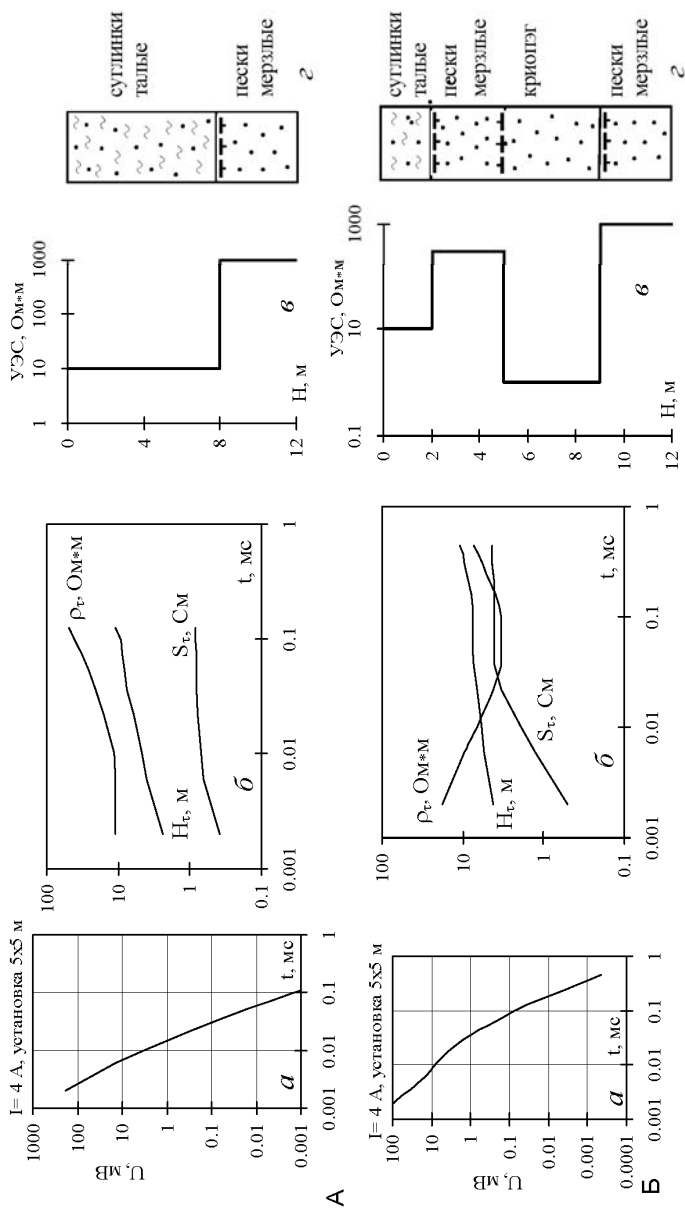


Рис.2.2.3. Частные физико-геологические модели верхней части криолитозоны Центральной Якутии: А - разрез представлен талой (до 8 м) толщей; Б - в разрезе присутствует криогел а-в - кривые: а - ЭДС переходного процесса; б - ρ_t , S_t и H_t ; в - $U_{ЭС}$

щего высокое сопротивление, и подошвы многолетнемерзлых пород.

Частная ФГКМ 2. Разрез полностью сложен мезозойскими породами песчано-алевролитового состава, которые в интервале 0-150 м находятся в мерзлом состоянии. При таких условиях толщи пород в мерзлом и талом состояниях отражаются участками кривой $S_{\tau}=f(H_{\tau})$, имеющих различный наклон (рис.2.2.2Б).

Частная ФГКМ 3. Разрез представлен талыми суглинками с УЭС равным 10 Ом·м и мощностью 8 м, а ниже залегающие среднезернистые пески находятся в мерзлом состоянии (рис.2.2.3А). В этой модели подошва талой зоны выделяется по особенностям кривых ρ_{τ} , S_{τ} , H_{τ} . Данная геологическая ситуация возникает при засыпке старичных озер, а также при образовании таликов в результате аварийных ситуаций (утечки горячей воды из теплосетей, коллекторов).

Частная ФГКМ 4. В данной модели (рис.2.2.3Б) кроме слоя сезонной оттайки в интервале 0-2 м на глубине 5-9 м находится талик с высокоминерализованными водами (криопэг) и имеющий аномально низкое УЭС. Отдельные элементы исследуемого разреза отражаются характерными особенностями кривых ρ_{τ} , S_{τ} , H_{τ} (для последних - выполаживающимися участками и "асимптотическими приближениями").

Анализ типичных частных физико-геологических моделей криолитозоны Центральной Якутии позволяет отметить, что определение мощности платформенного чехла, картирование подошвы многолетнемерзлых пород и таликов может эффективно выполняться с применением ЗМПП.

МЕТОДИКА КАРТИРОВАНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ ИМПУЛЬСНОЙ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКОЙ

3.1. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА РАБОТ

Аппаратура импульсной индуктивной электроразведки для структурных исследований разрабатывается в отечественных НИИ с начала 70-ых годов XX века, прежде всего в Нижне-Волжском НИИГГиМСе и в СНИИГГиМСе. В 80-ых годах XX века для решения рудных и инженерно-геологических задач широко применялась аппаратура типа «Каскад» (Нижне-Волжский НИИГГиМС). В СНИИГГиМСе в разные годы была разработана и выпускалась серийно аппаратура типа «Зонд-1», «Цикл-2»-«Цикл-6», «Импульс-Ц», «Импульс-Ц2», «Кенгуру-Орион», «Импульс-Авто», «Импульс-СЛ».

Анализ тенденций развития аппаратуры и оценка ее возможностей при исследовании криолитозоны Центральной Якутии проведены для аппаратуры типа «Импульс-Ц», «Кенгуру-Орион» и «Импульс-СЛ», исходя из следующего: 1) выбранные типы аппаратуры разработаны с интервалом примерно в 10 лет («Импульс-Ц» – 1981 г., «Кенгуру-Орион» – 1992 г., «Импульс-СЛ» – 2000 г.), что позволяет проследить тенденции ее развития; 2) данные типы аппаратуры были использованы при исследовании криолитозоны Центральной Якутии (Вас.В. Стогний, 1998; 2002). Изменение параметров аппаратуры иллюстрирует таблица 3.1. Начальное время регистрации в каждом последующем поколении аппаратуры уменьшается примерно на порядок: для «Импульс-Ц» оно составляет 10 мкс, для «Кенгуру-Орион» – 2 мкс, а для «Импульс-СЛ» – 0.1 мкс. Существенно улучшается дискретность измерения переходного процесса: для «Импульс-Ц» и «Кенгуру-Орион» время регистрации увеличивается в геометрической прогрессии с коэффициентом 1.25 и 1.20 соответственно,

а в аппаратуре «Импульс-СЛ» осуществляется непрерывное сканирование переходных процессов с интервалом в 25-100 нс. Значительно повышается скорость полевых измерений и оперативность обработки (в одном цикле измерений): аппаратурой «Импульс-Ц» регистрируется только одно значение ЭДС в одном цикле, аппаратурой «Кенгуру-Орион» - 76 значений ЭДС в пунктах временной шкалы, а аппаратурой «Импульс-СЛ» - 2^{10} значений с автоматической записью и предварительной обработкой полученных материалов непосредственно на месте проведения зондирований.

Таблица 3.1.

Основные технические характеристики аппаратуры импульсной индуктивной электроразведки для малоглубинных структурных исследований

Параметр \ Тип аппаратуры	Импульс-Ц	Кенгуру-Орион	Импульс-СЛ
Время регистрации, мс	0.01-100	0.002-0.515	10^{-4} - 10^4
Диапазон измерения напряжения, мкВ	$0.4 \cdot 4 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	$0.5 \cdot 10^8$
Амплитуда тока, А	5-40	0.5-5	0.5-5
Длительность импульса тока, мс	$5 \cdot 5 \cdot 10^2$	5-640	4-1000
Число регистрируемых значений напряжения $U(t)$ в одном цикле измерения	1	76	2^{10}
Число накоплений	до 10000	до 256	задается программно
Масса полевого комплекта без проводов и внешних источников питания, кг	27	6.8	15

В условиях высокоомных разрезов криолитозоны улучшение показателей аппаратуры импульсной индуктивной электроразведки, как показал наш опыт, реализуется не в полной мере. Рассмотрим это на примере начального времени регистрации ЭДС переходного процесса, в значительной степени определяющего начальную глубину исследований, характеристика которой в зависимости от типа применяемой аппаратуры и геоэлектрических условий изучаемого разреза приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

**Начальные глубины исследования верхней части разреза
криолитозоны для «Импульс-Ц», «Кенгуру-Орион» и
«Импульс-СЛ»**

Тип аппаратуры	Минимально возможные глубины исследования, м	
	Мерзлые пески ($\rho=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)	Тальные пески ($\rho=70 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)
Импульс-Ц	54	13
Кенгуру-Орион	23	4
Импульс-СЛ	6	1

Расчет показывает вполне удовлетворительные параметры начальной глубины исследования верхней части разреза для аппаратуры «Импульс-СЛ». Однако, как было выявлено уже с первых опытных работ ЗСБ (Методические , 1981), начальные части кривых ЭДС спада часто осложнены. Особенно остро эта проблема стоит при измерениях на малых временах регистрации в высокоомных разрезах. Снижение уровня «собственных помех» на начальных временах регистрации обычно достигается применением шунтирующих сопротивлений, подключаемых параллельно к концам петли и выходу измерительного блока аппаратуры, величина которых выбирается в соответствии с расчетной формулой (Импульсная , 1994, с.94):

$$R_{\text{ш}} \leq \frac{\bar{R}}{r/R + 2}, \quad (3.1.1)$$

где r – активное сопротивление контура, $\bar{R} = L/C$ – волновое сопротивление контура.

Использование шунтирующих сопротивлений позволяет уменьшить амплитуду колебательных процессов начальной фазы становления, но не исключает их. Кроме того, этим вносятся искажения в более поздние фазы процесса становления. В качестве методического приема, позволяющего выполнять зондирования верхней части высокоомных разрезов, может

быть использован частотно-временной способ измерения ранней стадии становления электромагнитного поля осциллирующего источника тока с регулируемым затуханием и частотой (Площадные, 2000).

Для начальных участков кривых ЭДС переходных процессов ЗМПП, зарегистрированных на высокоомных разрезах криолитозоны Центральной Якутии, характерен осциллирующий затухающий процесс, который затем переходит в процесс спада (рис.3.1.1). В очень высокоомных разрезах вторая часть кривой может и не наблюдаться, при этом в каждом индивидуальном дубле характер начальной части кривой сохраняется,

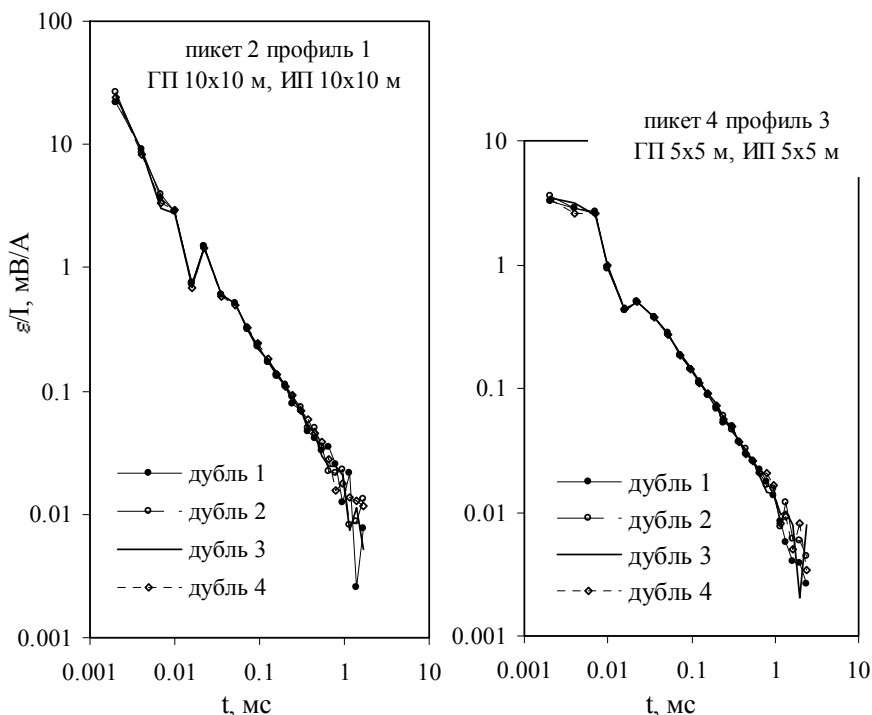


Рис. 3.1.1. Примеры осложненных кривых ЭДС переходных процессов

Участок Ледовый дворец, июнь 1995 г, аппаратура "Кенгуру-Орион", дубль рассчитан при 254 накоплениях, ГП – генераторная петля, ИП – измерительная петля

то есть зондирования обладают стационарностью, их вид меняется только при переходе в другую точку. Поскольку технические условия аппаратуры при этом не меняются, можно сделать вывод, что и начальные части процессов становления содержат информацию о геоэлектрических разрезах (их верхней части). Однако, извлечь эту информацию достаточно сложно, так как параметры среды в каждой точке зондирования эффективно влияют на параметры генератора и приемника сигналов, осложняя кривые становления.

Согласно результатам математического моделирования (Манаева, Постников, 2002), вблизи фронта зондирующего импульса в неоднородных по проводимости средах возникает осцилляция, при этом повышение скорости убывания проводимости с глубиной ведет к увеличению как амплитуды, так и частоты колебаний. В летнее время граница перехода сезонно талой зоны к многолетнемерзлым породам характеризуется большой скоростью убывания проводимости и, по-видимому, способствует формированию осциллирующего затухающего процесса становления электромагнитного поля.

Один из наиболее реальных (и легко реализуемых) путей минимизации помех заключается в выборе оптимального размера установки. Математически задача сводится к минимизации функционала электромагнитных помех (Кожевников, 1992). При изучении криолитозоны Центральной Якутии в зависимости от глубины исследований, характера изучаемых разрезов и поля электромагнитных помех (в том числе связанных с параметрами системы «петля - ВЧР») размеры сторон генераторной и приемной петель выбирали от 1 м до 100 м. В высокоомных разрезах предельная глубина исследований составляла для аппаратуры «Импульс-Ц» и «Кенгуру-Орион» до 5 размеров стороны генераторной петли, а для «Импульс-СЛ» – до 12 размеров стороны генераторной петли (Вас.В. Стогний, 2003; Вас.В. Стогний и др., 2003). Высокая чувствительность и точность аппаратуры типа «Импульс-Ц», «Кенгуру-Орион» и

«Импульс-СЛ», достигающаяся прежде всего за счет многократных суммирований в циклах, дает возможность выполнять исследование криолитозоны Центральной Якутии при небольшой мощности генераторной установки и ограниченной (до 5 А) величине тока в генераторном контуре. При необходимости исследований в расширенном диапазоне глубин в одной точке проводили зондирования соосными установками с последовательным увеличением стороны генераторной петли.

Кроме осложнений, связанных с осцилляциями в начальной части процесса становления, наблюдались и другие осложнения, в частности, процессы с двойной сменой знака, что возможно связано с влиянием эффекта Максвелла-Вагнера (Артеменко, Кожевников, 1999), однако такие осложнения не носили систематический характер и регистрировались лишь на отдельных точках зондирования, расположенных за пределами таликов. Главный вклад, особенно на поздних временах становления, вносят нестационарные электромагнитные помехи.

Для снижения погрешностей, связанных с помехами электромагнитной природы, применялась фильтрация переходного процесса с использованием линейных и нелинейных фильтров. Сглаживание исходных данных осуществлялось путем медианного осреднения, ганнирования, сплайн-аппроксимации. Качество сглаживания имеет особенно большое значение при расчете дифференциальных трансформаций, в частности, параметров S_{τ} и H_{τ} . Обработка и интерпретация полученных полевых материалов ЗМПП выполнялась с использованием программных средств: «MPP», «IN», разработанных в СНИ-ИГГиМСе (автор Г.М. Тригубович), многофункциональной системы «Эра_Плюс», разработанной в ИГиГ СО РАН (авторы: М.И. Эпов, И.Н. Ельцов, К.Г. Костенко) и разработанной нами программы «SOUNDING».

Стандартной процедурой обработки является трансформация кривых ЭДС переходных процессов в кривые кажущихся электрических сопротивлений по формуле (Методические..., 1979):

$$\rho_{\tau} = \frac{\mu_0}{t_i} \left(\frac{\mu_0 \cdot M_{\Gamma} \cdot M_u}{20\pi\sqrt{\pi} \cdot t_i \cdot \varepsilon_i} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3.1.2)$$

где M_{Γ} – момент генераторного контура, M_u – момент измерительного контура; $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, ε_i – ЭДС переходных процессов в приемном контуре в момент времени t_i , нормированная на ток.

Глубина погружения нижней границы скин-слоя в зависимости от электропроводности среды и увеличения времени становления поля вычислялась по трансформации (Крюкова, 1983):

$$z = k\sqrt{t \cdot \rho_{\tau} / \mu_0}$$

где k – коэффициент, близкий к единице.

Ввиду ограниченности временного диапазона регистрации кривых ЭДС становления электромагнитного поля ЗМПП, рассчитанные фрагменты кривых ρ_{τ} практически не информативны при «классической палеточной» методике интерпретации. Визуализация материалов ЗМПП в форме геоэлектрических разрезов $\rho_{\tau}(z)$, несмотря на кажущуюся «примитивность» теоретической модели (однородное изотропное полупространство), как показал опыт наших работ (Вас.В. Стогний, 1998, 2003), позволяет с достаточной для практики точностью локализовать участки талых пород среди мерзлых, то есть фактически выполнить объемное картирование исследуемого талика. Этому в значительной степени способствует высокая контрастность по удельному электрическому сопротивлению литологических разностей, слагающих верхнюю часть разреза, в их мерзлом и талом состояниях. Методической основой получения геоэлектрических разрезов в ЗМПП является расчет «кажущейся глубины» z , H_{τ} для каждого зондирования. Полученные расчетные данные экспортировались в программу “Surfer”, далее строились геоэлектрические разрезы и планы кажущихся сопротивлений. Выделение аномалий, соответствующих искомым объектам типа «талики», осуществлялось с учетом значений кажущихся удельных электрических сопро-

тивлений ρ_τ по наибольшим градиентам их изменения, согласно методическим рекомендациям для горизонтально-неоднородных сред (Методические..., 1983; 1985).

Одним из эффективных методов получения информации о числовых значениях элементов исследуемых разрезов криолитозоны является параметрическая интерпретация по асимптотическим значениям S_τ и H_τ (Ним, 1985, 1991а; Импульсная....., 1994; Вас.В Стогний, 1998). Впервые методика интерпретации кривых зондирований становлением в ближней зоне, основанная на замене реального разреза эквивалентной плоскостью S с изменяющимися во времени параметрами, была предложена В.А. Сидоровым и В.В. Тикшаевым (1969). Для расчетов параметров проводящей плоскости - текущей проводимости S_τ и глубины её залегания H_τ , без предварительного вычисления производной ЭДС переходного процесса по времени $d\varepsilon/dt$ производится вычисление данных параметров по формулам (Методические...., 1979; 1985):

$$S_\tau = \frac{2}{\mu_0} \left(\frac{2\pi}{3M_\Gamma \cdot M_u \cdot \mu_0} \right)^{1/3} \left[\frac{t_{i+1} - t_i}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{i+1}} \right)^{1/4} - \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{1/4}} \right]^{4/3}, \quad (3.1.3)$$

$$H_\tau = \left(\frac{3M_\Gamma \cdot M_u}{16\pi S_\tau \cdot \varepsilon_i^*} \right)^{1/4} - \frac{t_i^*}{\mu_0 \cdot S_\tau}, \quad (3.1.4)$$

где $\varepsilon_i^* = \sqrt{\varepsilon_i \varepsilon_{i+1}}$; $t_i^* = \sqrt{t_i t_{i+1}}$; M_Γ – момент генераторного контура, M_u – момент измерительного контура; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, ε_i – ЭДС в приемном контуре в момент времени t_i , нормированная на ток.

На заключительной стадии интерпретации эффективным приемом является подбор разрезов по ЭДС переходных процессов (решение прямой задачи), при этом ЭДС в приемном контуре (ε) для поздней стадии переходного процесса (при $\tau/r > 16$) определяется согласно формулы (Сидоров, 1985):

$$\varepsilon(t) = \frac{6M_r \cdot M_u \cdot m}{\pi \cdot S \cdot (R^2 + 4m^2)^{5/2}}, \quad m = H + \frac{t}{\mu_0 \cdot S}, \quad (3.1.5)$$

где M_r , M_u – соответственно моменты генераторного и приемного контуров, S – проводимость пленки (См), H – глубина залегания проводящей пленки, R – эффективный радиус генераторного контура ($R^2=L^2/\pi$), $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Расчет и визуализация разрезов кажущихся сопротивлений $\rho_\tau=f(z)$, параметрическая интерпретация по асимптотическим значениям S_τ и H_τ , а также моделирование разрезов по ЭДС переходных процессов обеспечивают выделение и картирование таликов различных генетических типов.

3.2. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КРИОЛИТОЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Одной из наиболее значимых проблем при исследовании высокоомных разрезов криолитозоны Центральной Якутии импульсной индуктивной электроразведкой является учет параметров системы «технические средства возбуждения и регистрации переходных процессов – ВЧР» (Кожевников, 1989, 1992), что вызывает необходимость разработки частотно-временной модификации электромагнитных зондирований изучения высокоомных разрезов (их верхних частей, выпадающих в настоящее время из исследования при использовании «традиционной» методики ЗМПП). Вторая проблема связана с максимально полным учетом электромагнитных параметров среды, влияющих на процесс становления электромагнитного поля. Одним из таких параметров является поляризуемость, определяющая низкочастотную дисперсию электропроводности, для описания которой обычно используется модель Максвелла-Вагнера (Артеменко, Кожевников, 1999; Губатенко, 1991; Каменецкий, Тимофеев, 1992; Каменецкий, Новиков, 1996). Математическое описание низкочастотной дис-

персии электропроводности ($\hat{\sigma}$) обычно выполняется с использованием известной формулы Cole-Cole (Каменецкий, 2000):

$$\hat{\sigma} = \sigma_{\infty} \left(1 - \frac{m}{1 + p\tau_{\text{E}}} \right) + p\varepsilon_{\infty}, \quad (3.2.1)$$

где ε_{∞} и σ_{∞} - высокочастотные диэлектрическая проницаемость и электропроводность (истинная электропроводность в отсутствии поляризации); m и τ_{E} – поляризуемость ($0 < m < 1$) и постоянная спада времени ВП при приложении к образцу среды ступени напряжения; $p = -i\omega$ (ω - круговая частота).

Первоначально возможное влияние эффектов ВП привлекалось для объяснения феноменологических явлений, таких как смена знака кривой ЭДС переходных процессов, не находящих объяснения с позиций «классической» модели становления электромагнитного поля в проводящей неполяризующейся среде (Сидоров и др., 1985; Митюхин, 1985; Новиков, 1995 и др.). Теоретические оценки показывают (Каменецкий, 2000), что дисперсия максимально проявляется в случае слоистых разрезов при чередовании низкоомных толстых слоев с высокоомными тонкими слоями, вызывая так называемый «квазиконденсаторный эффект». В последние годы интерес к низкочастотной дисперсии электропроводности возрастает в связи с проблемами высокоразрешающей электроразведки (Каменецкий, 1999; Светов и др., 1996 и др.).

Эффективным, на наш взгляд, является новое направление исследования явлений ВП, основанное на фрактальном подходе (Филатов и др., 2000; Филатов, 2002). Для рудных объектов получено следующее выражение зависимости суммарной поляризуемости от фрактальных параметров (Филатов, 2002):

$$\eta_{\text{M}} = \frac{K}{(4 - D) \ln \frac{\lambda}{\Lambda}} \left[\left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^{4-D} - 1 \right], \quad (3.2.2)$$

где D – фрактальная размерность; λ , Λ - минимальный и максимальный масштабы подобия фрактальной модели.

Использование формального подхода, связанного с аппроксимацией переходного процесса импедансом электрической цепи, дает возможность смоделировать влияние фрактальности среды на спад вызванной поляризации (Филатов и др., 2000), что позволяет учитывать структуру мембран, на которых происходят утечки. Фрактальность такой RC цепи Форстера представляется в виде одного элемента K_v , импеданс которого и, соответственно, \tilde{C} - релаксация приращения концентрации, описывается формулой:

$$\tilde{C}(p) = C_v p^{-v}, \quad (3.2.3)$$

при этом $v = \ln b / \ln a$, a и b – некоторые константы.

Комбинация двух таких элементов K_v , K_μ обладает импедансом (Филатов, 2002):

$$\tilde{C}(p) = \frac{C_v p^{-v}}{p^{\mu-v} + C_\mu / C_v}. \quad (3.2.4)$$

Данное выражение при определенных условиях превращается в формулу Cole-Cole с постоянной спада, задаваемой соотношением $[C_v / C_\mu]^{1/\xi}$, где $\xi = \mu - v$. Показатель степени ξ в выражении Cole-Cole определяется, исходя из структуры RC цепи, соотношением емкостных параметров и сопротивления среды.

Использование фрактального подхода, по нашему мнению, позволит полнее исследовать динамику электромагнитных процессов гетерогенных сред криолитозоны и подойти к объяснению и использованию в качестве информативных параметров таких феноменологических явлений кривых спада ЭДС переходных процессов, как их аномально крутой наклон, имеющие место переходы через ноль, которые не находят объяснения в традиционной теории ЗМПП, учитывающей только явления индукции.

Кроме поляризуемости, являющейся важным параметром гетерогенных сред, в определенных условиях на характер кривой становления поля могут влиять также диэлектрическая проницаемость, а при наличии в верхней части разреза супер-

парамагнетиков и магнитная проницаемость (Артеменко, 1999; Кожевников, 1992). При этом следует учитывать возможную дисперсию электромагнитных параметров ϵ и ρ от температуры (Ефимов, 1992; Фролов, 1998).

Значительный резерв повышения эффективности импульсной индуктивной электроразведки содержится также в совершенствовании методики обработки, например, применении высокоэффективных способов фильтрации в частотной и временной областях (Московская, 2001; Эпов, 1992; Эпов и др., 1990). В геофизике к настоящему времени накоплен достаточно большой опыт выделения аномалий в суммарных геофизических полях различной природы (Никитин, 2001). В этом контексте основной резерв повышения эффективности импульсной индуктивной электроразведки при исследовании криолитозоны Центральной Якутии связан, по нашему мнению, с внедрением методов и модификаций, обеспечивающих регистрацию аномалий ЭДС переходных процессов, наиболее контрастных по отношению к нестационарным и неоднородным помехам, обеспечивающим оптимальное объемное картирование элементов криолитозоны.

При исследовании криолитозоны в настоящее время обычно используется соосная установка вертикальный магнитный диполь - вертикальный магнитный диполь (установка ZZ). Высокую информативностью в таких условиях могут иметь также различные пространственные и интегральные модификации ЗМПП, к примеру, ЗМПП-ZX, основанная на возбуждении поля горизонтальным магнитным диполем, либо регистрация горизонтальной составляющей неустановившегося магнитного поля при его возбуждении вертикальным магнитным диполем (Ним, Вас.В. Стогний, 2001). При исследованиях ЗМПП взаимно ортогональными установками (установка ZX либо XZ) связь электромагнитного поля со средой пропорциональна квадрату проводимости среды (γ^2) или четвертой степени проводимости электропроводного пласта (S^4). В обычном варианте (установка ZZ) эта связь пропорциональна соответственно $\gamma^{3/2}$ и S^3 . Из этого следует, что ЗМПП обладает

высокой чувствительностью к проводимости среды, которая усиливается при использовании ортогональных установок. Однако, использование в практике таких установок затруднено, так как реализация этих модификаций связана с применением многовитковых контуров небольшого диаметра, имеющих большие собственные переходные процессы, соизмеримые (а иногда и превышающие) по длительности процессы становления среды.

При картировании таликов и криопэгов криолитозоны высокую эффективность могут иметь «векторные» модификации импульсной индуктивной электроразведки, в которых возбуждение выполняется вертикальным (обычно – неподвижным) диполем, а регистрируются по площади или профилю компоненты вектора магнитной индукции процесса становления, а не ее производной по времени, как это делается в «традиционных» модификациях ЗМПП (Стогний, 1991; Импульсная, 1994). Практическая реализация этой модификации затруднена ввиду необходимости использования высокочувствительного датчика магнитного поля (с чувствительностью, соизмеримой со сверхпроводниковыми квантовыми магнитометрами), которые могут обеспечить регистрацию компонент магнитного поля (а не его полный вектор). Поэтому обратимся к другой модификации импульсной индуктивной электроразведки – площадным зондированиям становлением с закрепленным источником (ПЗС-ЗИ).

Модификация ПЗС-ЗИ (Тригубович и др., 1999; Площадные, 2000) совмещает в себе достоинства ЗСБ и ЗМПП. В качестве источника поля служит петля больших размеров (сторона петли – несколько сот метров), имеющая большой момент, а приемником – петля небольших размеров. Применение современных средств возбуждения и регистрации электромагнитного поля (аппаратура «Импульс-СЛ») в модификации ПЗС-ЗИ позволяет производить наблюдения с высокой плотностью и обеспечить большую глубинность и высокую разрешающую способность обнаружения локальных объектов. Важным преимуществом данной модификации является ори-

ентация методики интерпретации на выявление локальных неоднородностей проводимости геологической среды и определение их геометрических и физических параметров. Математически задача сводится к расчету ЭДС переходных процессов горизонтально-слоистой среды с закрепленным источником поля (референтная модель), вычислении разностных аномалий и определении областей, в которых есть значимые расхождения между практическими и теоретическими данными, и последующего подбора параметров токовых колец, обеспечивающих оптимальную аппроксимацию аномалиеобразующих объектов. Для выбранных значений внутреннего и внешнего радиусов и толщины (по оси Z) токового кольца, координат его центра и значения аномальной проводимости (σ^k) задача сводится к отысканию аномального потенциала $A_\phi^k(\bar{r}, z)$, удовлетворяющего уравнению (Соловейчик и др., 1998):

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta A_\phi^k + \frac{1}{\mu_0 r^2} A_\phi^k + \bar{\sigma}^k \frac{dA_\phi^k}{dt} = (\sigma^k - \sigma^0) E_\phi^k, \quad (3.2.5)$$

где σ^0 – проводимость референтной (горизонтально-слоистой) среды; $\bar{\sigma}^k$ – взвешенная комбинация проводимостей σ^k и σ^0 ; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; $E_\phi^k = E_\phi^k(\bar{r}, z, t)$ – напряженность электрического поля, полученная по значениям нормального поля $E_\phi^0 = -dA_\phi / dt$ для референтной среды.

Таким образом, имеются реальные перспективы повышения эффективности импульсной индуктивной электроразведки при исследовании криолитозоны Центральной Якутии, которые связываются нами прежде всего с разработкой методики частотно-временных модификаций зондирований на ранних временах, что позволит проводить изучение самых верхних частей разрезов, а также с внедрением в практику работ модификации площадных зондирований становлением с закрепленным источником и методики моделирования нестационарных электромагнитных полей при произвольной форме трехмерных аномалиеобразующих объектов. В плане обработки пер-

спективы повышения эффективности импульсной индуктивной электроразведки связываются с учетом в единых программных комплексах наряду с проводимостью геологической среды таких ее электромагнитных параметров, как поляризуемость и диэлектрическая проницаемость.

3.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ОТ ТАЛИКОВ И КРИОПЭГОВ

Связующим звеном между физико-геокриологическими и геолого-геофизическими моделями (априорными и апостериорными) импульсной индуктивной электроразведки являются технологии полевых исследований, методика (алгоритм) решения прямой и обратной задач. В связи с этим выполнено математическое моделирование неустановившихся электромагнитных полей, обусловленных неоднородностями криолитозоны – таликами и криопэгами, и анализ полученных материалов с точки зрения эффективности той или иной технологии импульсных электромагнитных зондирований. Расчеты проведены в отделе площадных телеметрических систем электроразведки СНИИГГиМСа (зав. отделом д.т.н. Г.М. Тригубович).

В качестве ФГКМ «Талик» взято аномалиеобразующее тело со следующими параметрами: УЭС равно 50 Ом·м, ширина -10 м, длина - 20 м, глубина подошвы 12 м, правая кромка вертикальная, а левая наклонена под 75° . Талики с такими параметрами наиболее характерны для разреза верхней части криолитозоны г. Якутска и представляют наибольшую угрозу для технических сооружений. Моделируемый талик расположен в среде с удельным электрическим сопротивлением 3000 Ом·м, соответствующей УЭС многолетнемерзлых дисперсных осадочных толщ. Верхний перекрывающий слой мощностью 2 м имитирует сезонноталую зону в летнее (УЭС равно 70 Ом·м) и зимнее время (УЭС равно 5000 Ом·м). ЭДС переходных процессов рассчитаны для следующих вариантов (рис. 3.3.1): мерзлая толща (кривая 1), талик + вмещающая среда (кривая

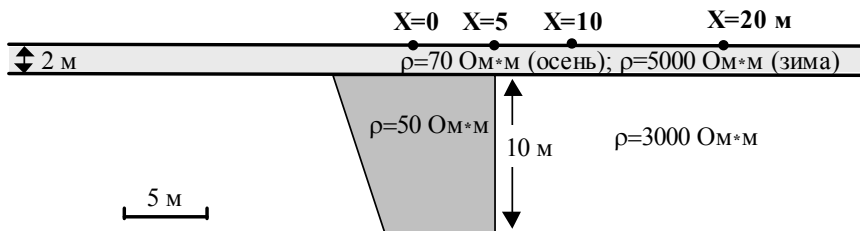
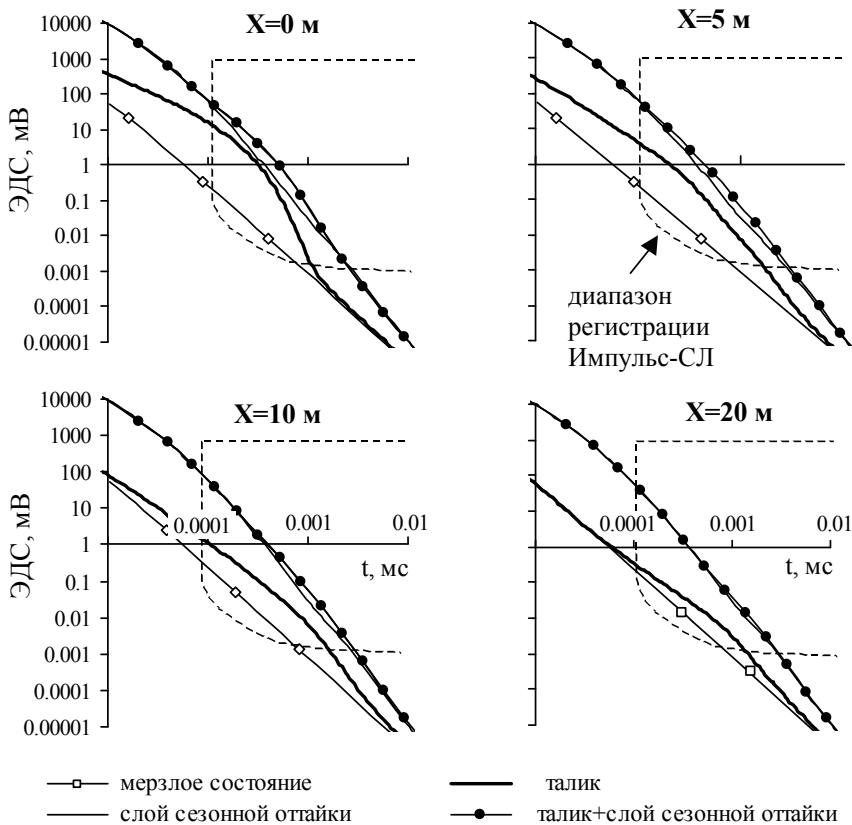


Рис. 3.3.1. Кривые ЭДС переходных процессов при расположении соосной установки (генераторная петля 3x3 м, измерительная петля 1x1 м, ток 1 А) над центром талика и на удалении 5, 10 и 20 м от эпицентра талика

2), слой сезонной оттайки + ниже залегающая мерзлая толща (кривая 3), талик + мерзлая толща + слой сезонной оттайки (кривая 4). Кривые рассчитаны при условии работы с соосной установкой ЗМПП: генераторный контур 3x3 м, измерительный контур 1x1 м, ток 1А, ось которой расположена как в эпицентре талика ($X=0$), так и на расстоянии от эпицентра равном 5, 10 и 20 м.

Переходные процессы от элементов рассматриваемой модели имеют следующие особенности. Переходные процессы от вмещающей мерзлой среды характеризуются малой длительностью и слабой интенсивностью во временном диапазоне регистрации современной аппаратуры. В случае наличия талика длительность переходных процессов резко возрастает, так при $t=0.2$ мкс ЭДС переходного процесса в эпицентре талика превышает более чем в 70 раз ЭДС переходного процесса от вмещающей мерзлой толщи. С удалением от эпицентра талика увеличивается максимальное время регистрации аномалии ЭДС от поискового объекта. Например, в эпицентре талика аномалия ЭДС выходит на уровень фона на времени 1 мс, в то время как при удалении на 10 м от эпицентра – 8 мс. Прибавление к модели слоя сезонной оттайки с $\rho=70$ Ом·м увеличивает длительность переходного процесса (в диапазоне регистрации) и приводит к снижению контрастности аномалии от талика примерно на порядок. Как следует из рис. 3.3.1, все элементы ФГКМ «Талик» проявляются переходными процессами, которые могут быть зарегистрированы аппаратурой «Импульс-СЛ», при этом суммарный сигнал (кривая 4) имеет наибольшую амплитуду и длительность по сравнению с переходными процессами от отдельных элементов модели.

Для оценки эффективности ЗМПП при картировании нижней кромки талых пород рассчитаны ЭДС переходных процессов ФГКМ «Талик» с глубиной подошвы равной 12 м (кривая 1) и 17 м (кривая 2) в точках, расположенных на удалении $X=0, 3, 7, 10, 15, 20, 30$ м относительно эпицентра талика (рис.3.3.2). Увеличение мощности талика на 5 м относительно слабо проявляется в величинах ЭДС при зондировании

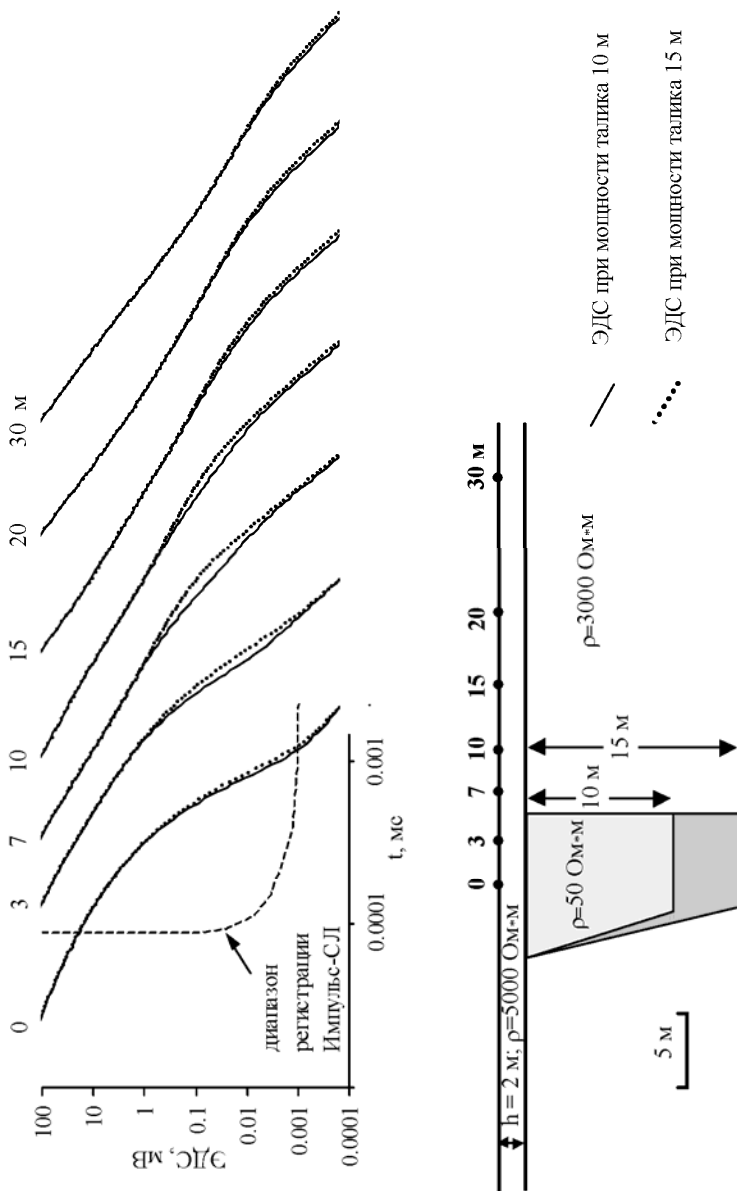


Рис.3.3.2. Изменение ЭДС переходных процессов при увеличении мощности талика от 10 до 15 м. Расчет выполнен для соосной установки (генераторная петля $3 \times 3 \text{ м}$, измерительная $1 \times 1 \text{ м}$, ток 1 А), расположенной над центром талика и при удалении от эпицентра талика на 3, 7, 10, 15, 20 и 30 м

над таликом ($X=0$) и практически не проявляется на значительном удалении от него ($X=20, 30$ м). Наибольшие различия кривых ЭДС отмечаются при смещении центра соосной установки относительно эпицентра талика от 3 до 10 м. Поэтому для уверенного определения положения нижней границы талика необходимы профильные измерения с расположением точек ЗМПП на разных расстояниях от эпицентра талика. При построении по материалам ЗМПП апостериорной 3D модели талика наиболее оптимальна, по нашему мнению, методика конечно-элементного моделирования (Соловейчик и др., 1998).

Одним из приемов локализации аномалиеобразующих объектов в пространстве является расчет геоэлектрических разрезов по параметру кажущегося сопротивления и кажущейся проводимости с последующим выделением геоэлектрических границ по формальным признакам (наибольшие градиенты изучаемых параметров или их определенные значения, выбираемые исходя из удельного электрического сопротивления литологических разностей района работ). Для оценки погрешности такой методики интерпретации проведено математическое моделирование, в качестве ФГКМ выбраны модели «Талик» и «Криопэг». Удельное электрическое сопротивление талика при моделировании принято равным 50 Ом·м, криопэга - 1 Ом·м, а вмещающей среды - 3000 Ом·м. Расчеты неустановившегося электромагнитного поля на поверхности таких моделей для соосной установки (генераторный контур – 3×3 м², измерительный контур - 1×1 м²) проведены по методике конечно-элементного моделирования. Переходные процессы затем трансформировались по стандартным процедурам с вычислением ρ_{τ} , S_{τ} , H_{τ} и последующим построением вертикальных разрезов $\rho_{\tau}(z)$ и $S_{\tau}(H_{\tau})$ (рис.3.3.3, 3.3.4).

Модель талика, имеющего вертикальную мощность 10 м, хорошо локализуется в разрезе кажущихся сопротивлений, область аномально низких значений которых (менее 400 Ом·м), выделенная по наибольшим градиентам ρ_{τ} , практически совпадает с контурами талика (рис.3.3.3Б). Локализирующие свой-

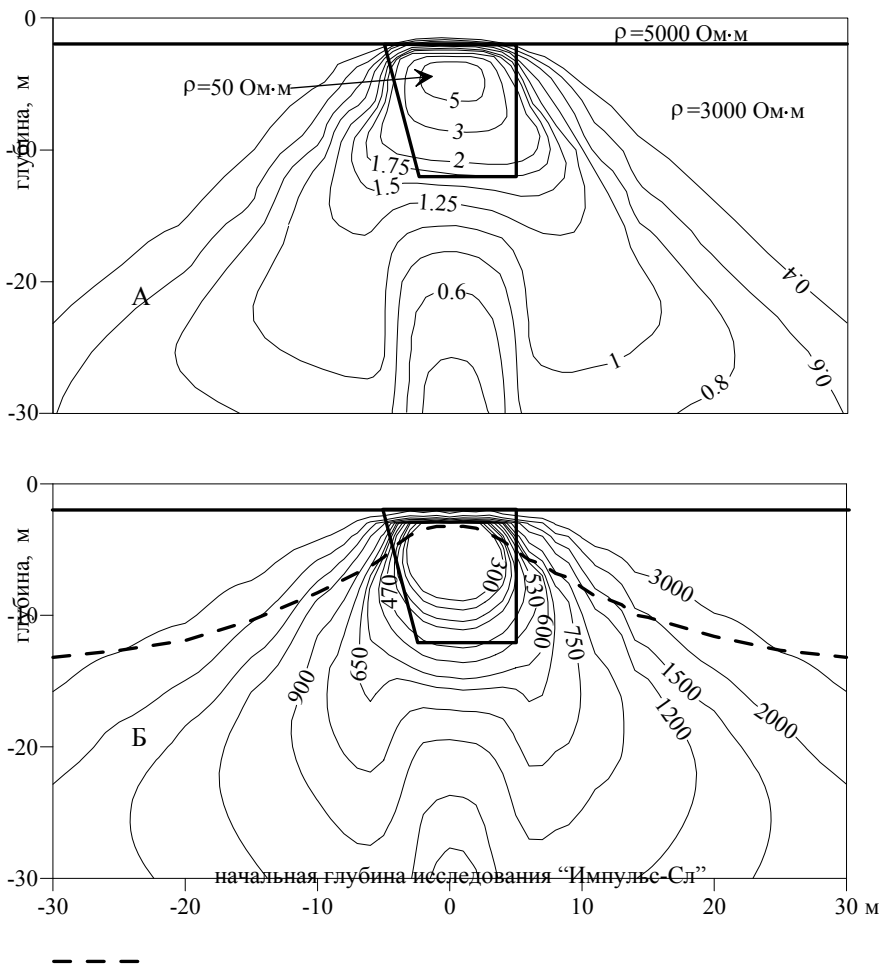


Рис.3.3.3. Вертикальные разрезы: А - кажущейся проводимости $S_{\tau}(H_{\tau})$ (мСм); Б - кажущегося сопротивления $\rho_c(z)$ (Ом·м) модели «Талик»

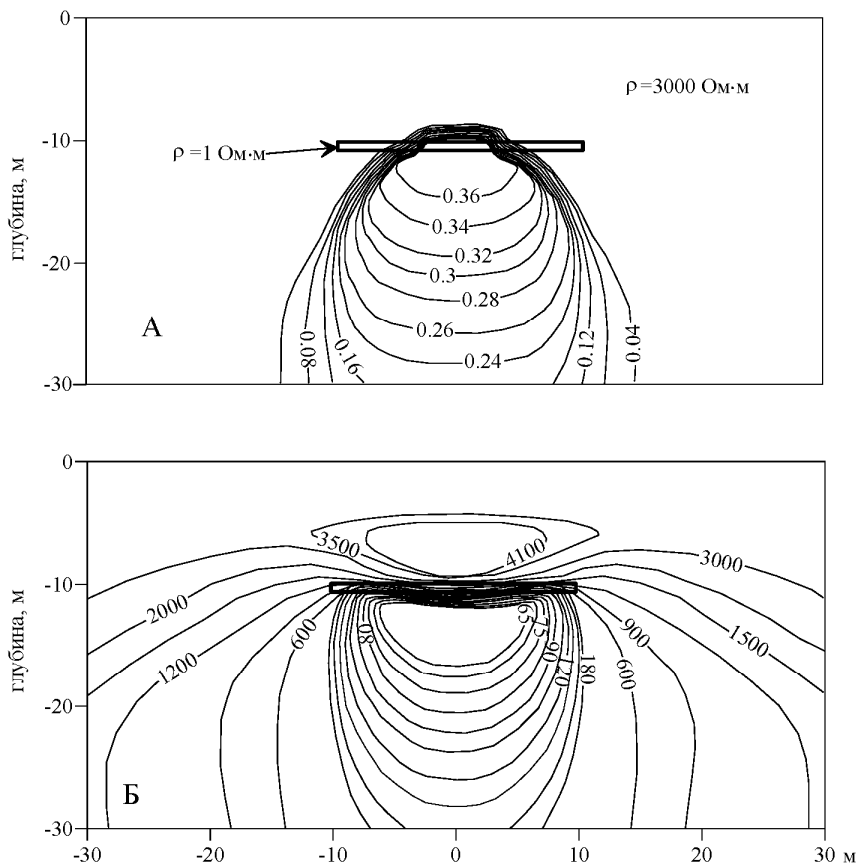


Рис.3.3.4. Вертикальные разрезы: А - кажущейся проводимости $S_{\tau}(H_{\tau})$ (См); Б - кажущегося сопротивления $\rho_{\tau}(z)$ (Ом·м) модели “Криопэг”

ства функции S_{τ} по сравнению с ρ_{τ} ниже, в нижней части контуры аномальной области значительно шире, чем контуры талика (рис.3.3.3А). Для модели криопэга, имеющего мощность 1 м, области аномальных значений кажущегося сопротивления и кажущейся проводимости, выделенные по наибольшим градиентам этих параметров (соответственно 70 Ом·м и 0.03 См/м), значительно превышают контуры криопэга (рис.3.3.4). Однако, как и в случае модели «Талик», лучшими локализирующими свойствами обладает ρ_{τ} , в данном случае криопэг отражается верхней частью области аномально низких значений (рис.3.3.4Б). В рассматриваемых моделях области пониженного сопротивления (600 - 2000 Ом·м) и повышенной проводимости (0.0006-0.003 См/м) значительно превышают контуры талика и криопэга. Область пониженных значений ρ_{τ} и S_{τ} вблизи талика имеет вид подковы, обращенной к низу. Данные особенности геоэлектрических разрезов, связаны с эффектом смещения аномалии ЭДС переходных процессов на более поздние времена регистрации при удалении от аномалиеобразующего объекта (рис.3.3.1). Данный эффект может быть использован для разделения аномалий, вызванных таликом либо криопэгом.

Высокую разрешающую способность при изучении локальных аномалиеобразующих объектов имеет модификация ЗМПП с измерением горизонтальной составляющей ЭДС переходных процессов – ЗМПП-ZX (Табаровский, Ицкович, 1981; Ним, Вас.В. Стогний, 2001). По сравнению с традиционной модификацией ЗМПП-ZZ (вертикальный генераторный диполь – вертикальный приемный диполь) можно отметить ее следующие преимущества: более тесную связь с параметрами аномалиеобразующего объекта, имеющего наклонные границы; исключено влияние элементов горизонтально-слоистого разреза; более выразительный характер кривых ЭДС ПП с переменной знака. Для оценки возможностей картирования таликов на основе применения ЗМПП-ZX проведено математическое моделирование ФГКМ «Талик» (рис.3.3.1) при следующих условиях: установка ортогональная (вертикальный генераторный диполь – горизонтальный приемный диполь) с со-

вмещенными центрами диполей. Результаты расчетов переходных процессов исследованной модели представлены на рис.3.3.5. Кривые ЭДС переходных процессов на фиксированных временах по профилю, пересекающему эпицентр талика (рис.3.3.5А), имеют характерный синусоидальный вид, а различные углы наклона боковых границ талика проявляются в асимметрии графиков. Кривые ЭДС переходных процессов как функция времени наблюдений для точек ЗМПП-ZX, расположенных на разных расстояниях слева (рис. 3.3.5Б) и справа (рис.3.3.5В) от эпицентра талика, имеют переходы через ноль. При любом расположении точек ЗМПП-ZX относительно эпицентра талика значения ЭДС переходных процессов не превышают 0.003 мВ при времени измерения более 0.3 мкс. В связи с этим реализация методических преимуществ измерения горизонтальной составляющей ЭДС в настоящее время даже с применением современной аппаратуры затруднена из-за малой величины сигналов, быстрого затухания переходного процесса и ряда помех (главным образом – это собственные переходные процессы в приемном и генераторном контурах).

К одной из наиболее перспективных модификаций ЗМПП для изучения таликов криолитозоны следует отнести площадные зондирования становлением поля с закрепленным источником (ПЗС-ЗИ). Расчет ФГКМ «Талик» и «Криопэг» проведен с разделением нестационарного электромагнитного поля на референтную (обусловленную горизонтально-слоистой частью модели среды) и аномальную составляющие. Характер распределения аномальной составляющей ЭДС переходных процессов над таликом при различных временах регистрации показан на рис. 3.3.6, а на над криопэгом – на рис. 3.3.7. Области устойчивых пространственно-временных инверсий аномальных электромагнитных полей пересекают горизонтальную проекцию таликов и криопэгов и могут использоваться для их локализации. По площадной картине распределения аномальной составляющей ЭДС поисковые объекты хорошо локализируются, при этом характер кривых ЭДС и их эволюция во времени подобны аномалиям ЗМПП-ZX (см. рис. 3.3.5).

Таким образом, ПЗС-ЗИ при картировании таликов и криопэгов не только совмещает в себе преимущества ЗМПП-ZZ

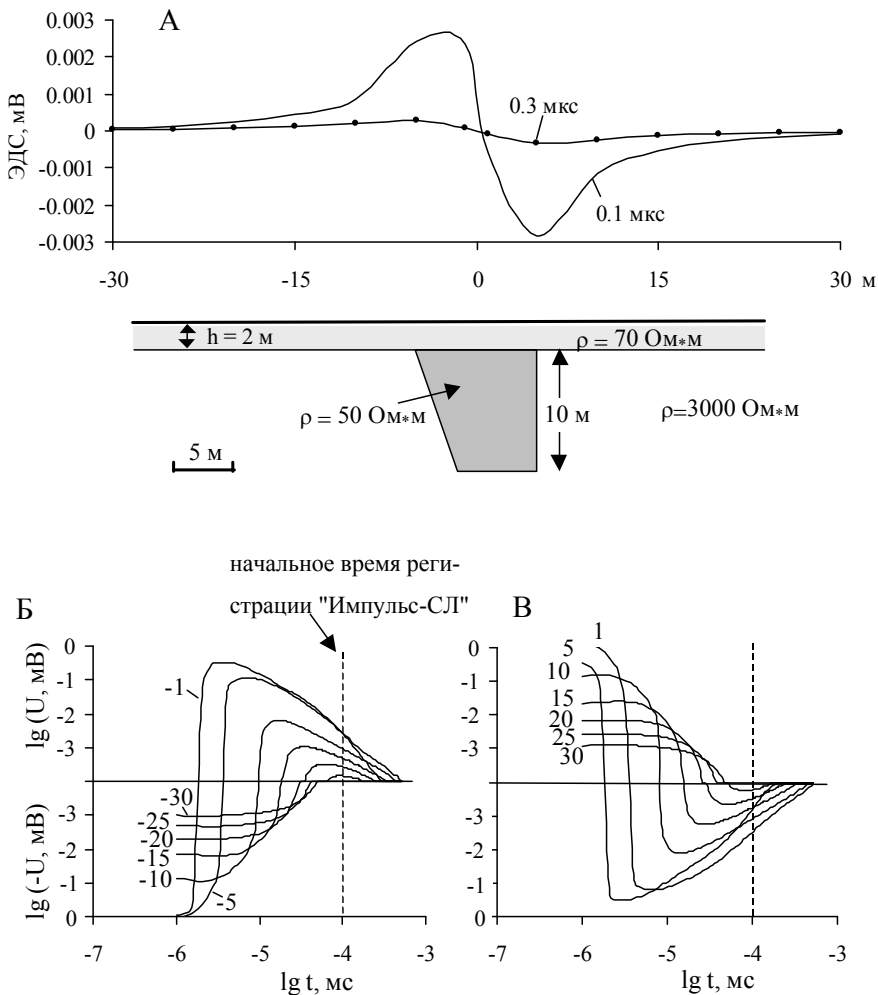


Рис.3.3.5. Графики ЭДС ЗМПП- ZХ от модели «Талик»: А - при фиксированных временах (0.1; 0.3 мкс) по профилю, пересекающему талик; Б, В - переходных процессов при различном удалении установки (цифры у графиков – удаление оси установки от эпицентра талика в метрах) слева (Б) и справа (В) от эпицентра талика

Расчет проведен для ортогональной установки с горизонтальным генераторным контуром 3x3 м, вертикальным приемным контуром 1x1 м при токе 1А

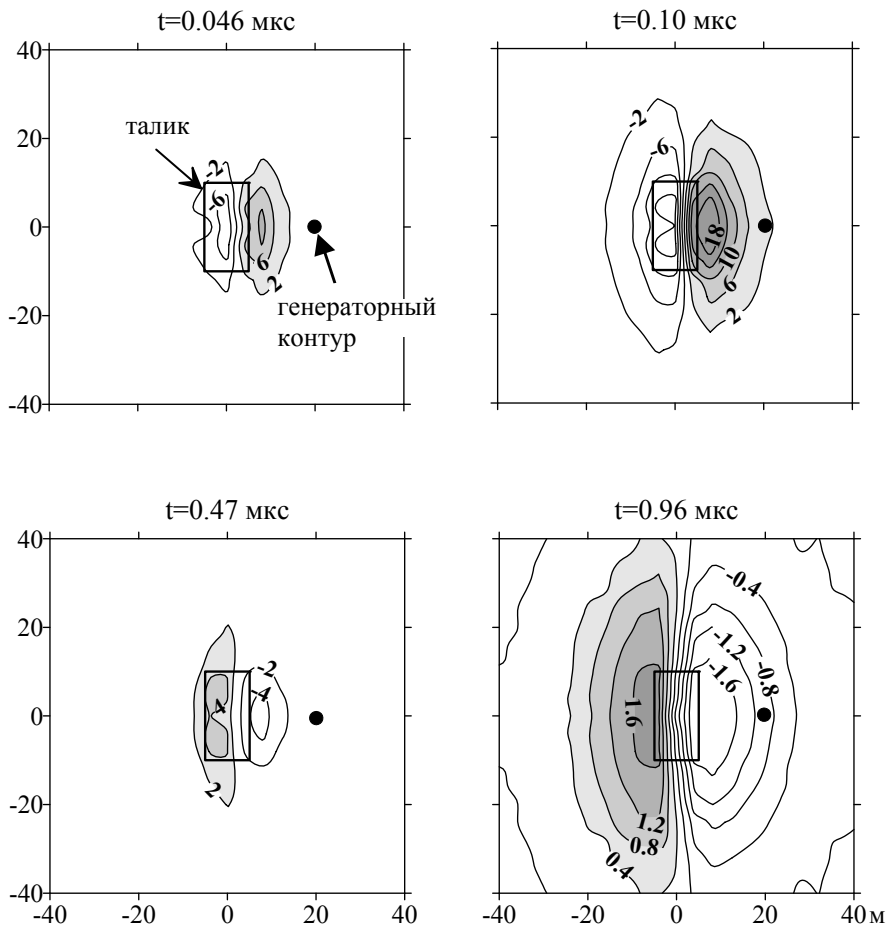


Рис.3.3.6. Распределение аномальной составляющей ЭДС ПЗС-ЗИ от талика мощностью 10 м при временах измерения 0.046 - 0.96 мкс
 Размер генераторного контура 3x3 м, измерительного 1x1м, ток 1 А Удельное электрическое сопротивление талика равно 50 Ом·м, вмещающей среды - 3000 Ом·м, сезонноталого слоя - 70 Ом·м

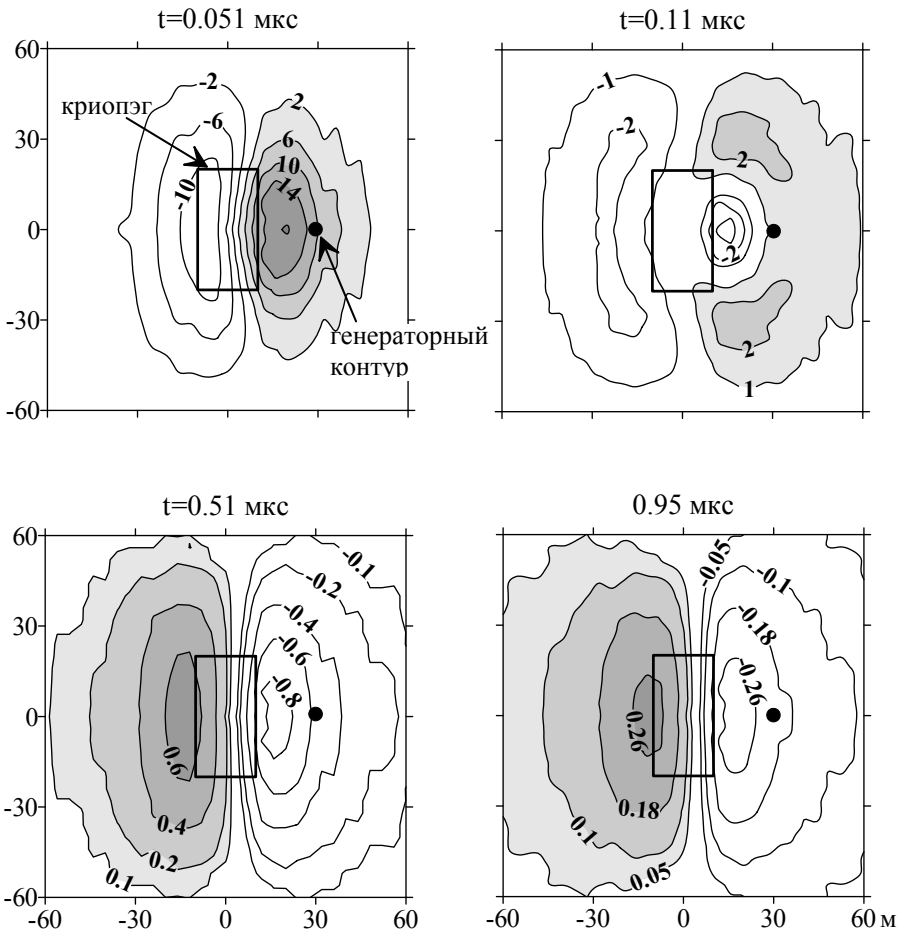


Рис.3.3.7. Распределение аномальной составляющей ЭДС ПЗС-ЗИ от криопэга при временах измерения 0.051 - 0.95 мкс
 Размер генераторного контура 3х3 м, измерительного 1х1м, ток 1 А.
 Удельное электрическое сопротивление криопэга равно 1 Ом·м, вмещающей среды - 3000 Ом·м.

и ЗМПП-ZX, но и имеет ряд следующих достоинств: используются только горизонтальные петли, при этом размер генераторного контура и, соответственно, мощность источника можно увеличивать практически неограниченно; резко увеличивается производительность и, соответственно, уменьшается себестоимость работ. Совместное использование горизонтальной и вертикальной компонент магнитной индукции неустановившегося поля расширяет классификационные возможности импульсной индуктивной электроразведки при изучении элементов криолитозоны.

Рассмотрим возможности зондирования МПП с соосной установкой при решении одной из практических задач исследования криолитозоны градосферы Якутска. Выбранная модель соответствует геокриологической ситуации в районе домостроительного комбината г. Якутска (рис. 3.3.8А). На данном участке наземными радиолокационными зондированиями с учетом результатов бурения были оконтурены Y-образный криопэг и два талика (Импульсная..., 1994, с. 174-175). Мощность перекрывающих криопэг пород равна 5 м, а мощность криопэга изменяется от 1 до 2 м. Верхние кромки таликов, вскрытые бурением, расположены на глубине 2 м, а их мощности равны 12 и 15 м. При моделировании удельное электрическое сопротивление криопэга было принято равным 1 Ом·м, талика - 50 Ом·м, вмещающей среды – 3000 Ом·м. Неустановившегося электромагнитное поле рассматриваемой модели рассчитано по методике конечно-элементного математического моделирования (Соловейчик и др., 1998) и было трансформировано в параметры ρ_{τ} и z . План кажущегося сопротивления ρ_{τ} на глубине 10 м приведен на рис.3.3.8Б. Анализ полученных геоэлектрических разрезов исследованных моделей показывает, что аномалиеобразующие неоднородности криолитозоны – талики и криопэги уверенно картируются, причем по характеру распределения ρ_{τ} могут быть выявлены такие их геометрические характеристики, как глубина залегания и мощность.

Таким образом, проведенное математическое моделирование переходных процессов от таликов и криопэгов криолито-

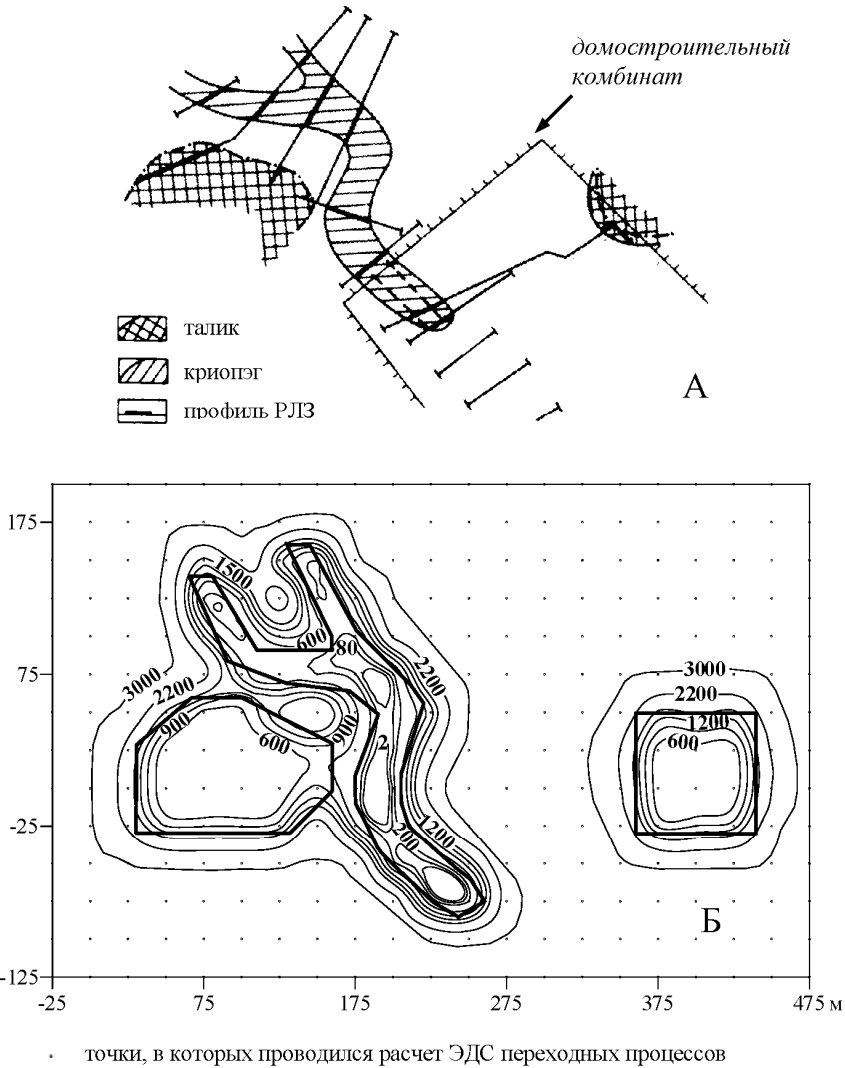


Рис.3.3.8. Априорная геолого-геофизическая модель участка «Домостроительный комбинат» (г. Якутск): А – план таликов и криопэга по данным РЛЗ (Импульсная..., 1994, с.175); Б – план ρ_t на глубине 10 м

зоны позволяет отметить следующие особенности, важные с точки зрения выбора методики исследования.

1. Все элементы ФГКМ «Талик»: вмещающая мерзлая среда, слой сезонной оттайки и сам талик проявляются переходными процессами, которые могут быть зарегистрированы современной электроразведочной аппаратурой. Слой сезонной оттайки с низким сопротивлением снижает контрастность аномалии ЭДС переходных процессов от талика при увеличении интенсивности и длительности переходных процессов.

2. Различия в ЭДС переходных процессов, обусловленные изменением глубины нижней границы талика, наиболее контрастно проявляются в материалах ЗМПП в стороне от эпицентра талика, в связи с чем для уверенного картирования нижней границы талика необходимо применение специальных методик интерпретации.

3. В качестве приемов интерпретации, позволяющих локализовать аномалиеобразующий объект, могут быть использованы расчеты вертикальных и горизонтальных геоэлектрических разрезов по параметрам кажущегося удельного сопротивления ρ_{τ} и кажущейся проводимости S_{τ} , при этом лучшими локализуемыми возможностями обладает параметр ρ_{τ} , по наибольшим градиентам которого может быть оконтурен аномалиеобразующий объект (талик) и оценена его вертикальная мощность либо по положению верхней границы аномальной области найдено местоположение тонкого аномалиеобразующего объекта (криопэг).

4. Реализация выявленных методических преимуществ модификации ЗМПП с измерением горизонтальной компоненты переходного процесса (ЗМПП-ZX) осложнена быстрым затуханием переходного процесса и его низким уровнем, значительно превышающим уровень точности современной аппаратуры.

5. Наиболее перспективной модификацией, совмещающей достоинства традиционной методики ЗМПП-ZZ (соосная установка) и методики ЗМПП-ZX (ортогональная установка) при высокой технологичности работ является модификация ПЗС-ЗИ.