РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

На правах рукописи

Сергеев Константин Сергеевич

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ В МАЛОГЛУБИННОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Белоусов А.В

Москва – 2018

Оглавление

Введен	ие			
1.	Обзор методов, используемых в малоглубинной геофизике 11			
	1.1.	Малоглубинная сейсморазведка 11		
	1.2.	Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) в инженерных		
сква	жинах	17		
	1.3.	Малоглубинная электроразведка 19		
	1.4.	Георадиолокация24		
	1.5.	Топогеодезические работы в малоглубинной геофизике 26		
2.	Φ	изико-геологическое обоснование методов малоглубинной		
геофиз	ики на	примере различных целевых объектов 28		
	2.1.	Карст и суффозионные процессы 28		
	2.2.	Оползни, оползневые процессы и обвалы 31		
	2.3.	Многолетнемерзлые породы и зоны растепления 35		
	2.4.	Оценка применимости методов малоглубинной геофизики для		
реше	ения ин	женерно-геологических задач 43		
3.	Μ	оделирование данных сейсморазведки и электротомографии на		
целевы	іх объе	ктах		
	3.1.	Карст и суффозионные процессы 45		
	3.	1.1. Модели сейсморазведки 45		
	3.	1.2. Модели электротомографии 48		
	3.2.	Оползневые и обвальные процессы		
	3.	2.1. Модели сейсморазведки 50		
	3.	2.2. Модели электротомографии 52		
	3.3.	Многолетнемерзлые породы 53		
	3.	3.1. Модели сейсморазведки 53		

3.3.2. Модели электротомографии...... 57 4. Проектирование комплекса методов малоглубинной геофизики в 5. Практическое применение методов малоглубинной геофизики в 5.1. Изучение карстовых процессов (обследование карстующихся толщ 5.2. Изучение оползневых и обвальных процессов (оползневой склон в 5.3. Изучение многолетнемерзлых пород комплексом методов на примере кустовых площадок Западной Сибири 96 5.4. Изучение археологических объектов на примере древнего Смоленска (Гнездово) и городища IX – XI вв. на примере комплекса Шниткино

111

Заключение	119
Список сокращений	120
Список литературы	121
Список иллюстраций	129
Список таблиц	135

Введение

Под малоглубинной геофизикой понимают совокупность геофизических методов изучения строения верхней части разреза (ВЧР) на глубины до первых сотен метров.

Основные задачи и цели методов малоглубинной геофизики сводятся к прогнозу геологической безопасности строительства, геологическому мониторингу ОГП, поиску и разведке малоглубинных месторождений полезных ископаемых.

В малоглубинной геофизике, по сравнению с нефтяной и рудной, активно применяется гораздо больше методов. Основной (базовый) комплекс, как правило, включает в себя сейсморазведку и электроразведку; к вспомогательным методам, относятся: геофизические исследования скважин (ГИС), георадиолокация, микромагнитная и микрогравиметрическая съемки, методы радиометрии и ядерной геофизики.

Малоглубинная геофизика начала свое постепенное отделение от разведочной геофизики в начале 20-х годов прошлого столетия [59]. В связи с увеличением объемов сложного, масштабного и ответственного строительства появилась необходимость в проведении предварительной разведки площадок и территорий для решения инженерно-геологических задач. Другим стимулом развития данного направления стали сжатые сроки для выполнения проектноизыскательских работ: объемы бурения постепенно начали заменять инженерногеофизическими изысканиями.

Впервые масштабе малоглубинная В промышленном геофизика (малоглубинная электроразведка на постоянных токах) была использована в 1929 определения отложений году для мощности аллювиальных В створе проектируемой плотины через реку Енисей [59].

С тех пор происходит лавинообразное развитие этой прикладной науки. Начиная с 1930-х годов, электроразведка и сейсморазведка на преломленных волнах применяются для изучения опасных геологических процессов (карстов, оползней и криолитозоны). В 1940-х годах на геологическом факультете МГУ открывается направление, связанное с применением инженерно-геофизических методов при решении инженерно-геологических задач, которое возглавляет Огильви Александр Александрович [33]. Постепенно (с 1950-х - 1960-х годов) происходит развитие всех методов малоглубинной геофизики и становится возможным проводить разведку не только для решения структурных задач, но и изучения физических свойств пород, мониторинга и прогнозирования ОГП, геоэкологических задач. Этот период можно отождествить с такими учеными, как Горяинов Николай Николаевич [53], Хмелевской Виктор Каземирович [29], Ляховицкий Феликс Моисеевич [29] и многие другие.

Наряду с развитием вычислительной техники все чаще и чаще ЭВМ начинают использоваться в обработке и интерпретации данных малоглубинной геофизики. С 1960-х – 1970-х годов происходит разработка специализированной аппаратуры для проведения малоглубинных исследований. Под эгидой министерства геологии СССР в столицах союзных республик проводятся ежегодные научно-практические конференции [59].

80-е годы прошлого столетия отождествляются с внедрением в наземные и скважинные исследования томографических методов и первой цифровой аппаратуры.

В начале 1990-х годов начинает активно развиваться метод припоповерхностной георадиолокации. Под руководством Генри Николаевича Боганика [5] и Василия Петровича Номоконова выполняется апробация высокоразрешающей сейсморазведки для исследования карстово-суффозионных и неотектонических процессов на территории города Москвы.

Актуальность проблемы

Современная малоглубинная геофизика представляет собой сочетание новейшей цифровой аппаратуры и мощного математического аппарата. С точки зрения аппаратуры, в малоглубинной сейсморазведке стали применяться многоканальные линейно-телеметрические или полностью телеметрические многокомпонентные системы, которые ранее были введены в практику нефтяной сейсморазведки. Стоит отметить и изменения в малоглубинной электроразведке на постоянных токах. Около 10 – 15 лет назад появился новый метод – электротомография, который включается в себя уникальную методику проведения работ, обработки и интерпретации данных. С точки зрения программно-вычислительных комплексов, благодаря ПК и серверам, способным обрабатывать и хранить большие объемы данных, обработка и интерпретация перешли в двумерную и трехмерную область.

Таким образом, данная прикладная наука постепенно стала неотъемлемой частью жизни и развития техногенного общества. В настоящее время круг задач, стоящих перед ней, существенно расширился. Без ее помощи уже невозможно представить изучение геологии ВЧР и обоснование заключения о строении исследуемого объекта, изыскания для строительства, проверку строения дорожной одежды, картирование карьеров, поиск малоглубинных залежей руд, обследование торфяных болот, поиск и изучение ОГП, зон вечной мерзлоты и растепления, сопровождение археологических работ, установление геологического строения и т.д. В мире насчитывается несколько крупных геофизических и геологических сообществ – SEG, EAGE, EAFO, SPE и др., – в рамках которых существуют отдельные секции и конференции, посвященные вопросам малоглубинной геофизики во всех ее направлениях. В России и за рубежом производится высококачественная современная аппаратура под различные направления.

Наиболее активно малоглубинная геофизика может (и, наверное, должна) применяться в городах-мегаполисах в условиях плотной застройки и наличия подземных коммуникаций; на объектах нефтегазового комплекса (НГК) при проектировании и эксплуатации; при строительстве новых зданий и сооружений; автомобильных и железных дорог; взлетно-посадочных полос; изучении ОГП.

Исходя из этого, повышение достоверности геолого-геофизического прогноза по данным малоглубинной геофизики является актуальной задачей.

6

Цель исследования

Основной целью исследований является повышение эффективности малоглубинных геофизических исследований на основе разработки методики проведения работ и комплексирования результатов сейсморазведки (МОВ, МПВ) и электротомографии с привлечением данных других геофизических методов.

Для выполнения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Дано физико-геологическое обоснование геофизических методов применительно к задачам изучения верхней части разреза;

2. Проведено математическое моделирование данных сейсморазведки и электроразведки по аномалиеобразующим разрезам;

3. На основе эталонных объектов выработаны методические приемы и комплексы при решении инженерно-геологических задач;

4. Осуществлена апробация разработанной методики в реальных условиях.

<u>Методы исследований</u>, примененные в данной работе: анализ геологических аспектов и физико-геологических особенностей изучаемых явлений; численное математическое моделирование и оценка применимости геофизических методов; полевые эксперименты и наблюдения. В данной работе впервые предлагается схема комплексирования методов сейсмо- и электроразведки, основанная на кроссверификации результатов исследований при визуальном и количественном их анализе.

Научная новизна работы:

1. Предложена методика выбора оптимального комплекса методов в зависимости от объекта исследований (объектно-ориентированный подход в малоглубинной геофизике);

2. Разработаны рекомендации по повышению детальности геофизических изысканий на различных этапах проведения работ;

3. Предложена технология комплексного анализа результатов разнородных геофизических исследований с возможностью контроля качества на основе сходимости полученных результатов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Объектно-ориентированный подход при выполнении малоглубинных геофизических исследований позволяет рационально выбрать комплекс методов и дает возможность корректировать методику проведения работ для получения наилучшего результата;

2. Предложенная схема проведения комплекса инженерно-геофизических изысканий повышает достоверность прогноза в различных физико-геологических условиях;

3. Технология комплексного анализа результатов разнородных геофизических исследований позволяет повысить достоверность геологического прогноза, что подтверждается экспериментальными данными.

Практическая значимость работы:

1. Разработанная методика позволяет выбрать наиболее эффективный комплекс инженерно-геофизических методов, ориентированный на изучаемый объект работ, а также проводить комплексную интерпретацию полученных результатов с целью повышения надежности геологического прогноза;

2. Полученные в ходе опробования методики результаты позволили успешно решить геологическую задачу на разнородных объектах (оползневой склон в Сабурово и скально-обвальные борта гранодиоритового карьера; ММП в Западной Сибири; обследование карстующихся толщ и воронок на территории Нижегородской и Калужской областей; изучение археологических объектов древнего Смоленска (Гнездово) и городища IX – XI вв. на примере комплекса Шниткино);

3. Результаты работы могут быть использованы в производственной и научноисследовательской деятельности предприятий, ведущих геофизические изыскания, а также в учебном процессе специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки».

В диссертации приведены эксперименты по комплексированию данных и их сравнительному анализу, сделаны выводы о их практической целесообразности в определенных ситуациях, а также выдвинуты предложения по оптимизации сети профилей и системы наблюдений при проведении комплексных исследований.

Достоверность выводов и рекомендаций проверялась путем сопоставления результатов математического моделирования с данными, полученными в ходе полевых экспериментов, обработки и интерпретации их результатов; сравнения данных геофизических методов и бурения.

Полученные результаты были опубликованы в научных журналах, апробированы автором и его коллегами на международных конференциях и практических семинарах по геофизике и археологии.

По диссертации было опубликовано 14 работ, в том числе 4 – в изданиях из перечня ВАК; 9 – в сборниках материалов российских и международных конференций (5 работ из сборников материалов конференций включены в международную базу данных Scopus).

Все данные, использованные в работе, собраны автором во время учебы в аспирантуре и работы в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина.

Все основные положения данной диссертационной работы предложены автором лично, апробация методики осуществлена автором и коллективом лаборатории инженерной геофизики на различных научных и производственных проектах.

<u>Благодарности</u>

Автор благодарит своего научного руководителя за помощь в проведении научных исследований и реализации проектов, а также идеологическое вдохновение, методические рекомендации, критику и проверку данной диссертации.

9

Автор искренне признателен всем геологам, геофизикам и археологам, которые на разных этапах исследований и подготовки диссертационной работы оказывали содействие и помощь, в частности: Бобачеву Алексею Анатольевичу, Гантову Борису Алексеевичу, Новикову Василию Васильевичу.

Также хочется выразить благодарность Смоленской археологической экспедиции Государственного исторического музея за возможность проведения геофизических исследований на археологических памятниках культуры.

И наконец, данная работа была бы просто невозможна без помощи и поддержки сотрудников и коллег кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, а также коллектива лаборатории инженерной геофизики.

1. Обзор методов, используемых в малоглубинной геофизике

1.1. Малоглубинная сейсморазведка

Сейсморазведка, чье широкое применение связано с решением структурных задач картирования геологического разреза в нефтяной отрасли, постепенно стала использоваться и в малоглубинной геофизике для решения различных задач. В настоящее время методики проектирования и проведения полевых работ, аппаратура, алгоритмы обработки и интерпретации сейсмических данных успешно применяются при изучении строения ВЧР.

В малоглубинной сейсморазведке применяются современные линейные и телеметрические сейсмостанции. На рынке существуют довольно много моделей станций отечественного и зарубежного производства, которые могут быть укомплектованы различными косами и приемниками. Среди станций российского производства можно выделить телеметрическую систему «ТЕЛСС-3» и линейную систему «ЭЛЛИСС» (производство «Геосигнал»), линейную станцию «Лакколит XM-3» (производство «Логис»). К зарубежным аналогам можно отнести станции компании «Geometrics» («Геометрикс», производство США), «АВЕМ» («АБЕМ», производство Швеция) и много других.

Особенностями малоглубинной сейсморазведки по сравнению с нефтяной являются:

- специфика строения ВЧР, связанная с геологией современных отложений;
- малый шаг по пунктам возбуждения (ПВ) и пунктам приема (ПП) (от 0.5 до 10 метров);
- тип источника (маломощное вертикальное или горизонтальное возбуждение колебаний, как правило, невзрывное) и как следствие – частотный состав записи;
- тип регистрируемых волн (продольные и поперечные);
- техногенные и геологические помехи, их характер и учет при проектировании методики работ;

- тип сейсмостанции по конструктивным особенностям (линейные, линейно-телеметрические, телеметрические);
- ограниченность числа каналов (в зависимости от типа сейсмостанции);
- наличие нескольких методов (МПВ, МОГТ, «MASW») для построения изображения среды, а соответственно технологий обработки и интерпретации исследований.

Следует уделить несколько слов типам инженерных сейсморазведочных станций. Зачастую в малоглубинной геофизике преобладают линейные станции. Такая тенденция обусловлена их низкой ценой. К достоинствам данных станций относятся мобильность и малый вес. К недостаткам - ограниченность числа каналов как в сейсмической косе, так и в самой активной расстановке, что приводит к практически полному отсутствию коммутации во время измерений.

Линейно-телеметрические и телеметрические станции, применяемые в малоглубинной геофизике, позволяют подключать большое число каналов и проводить коммутацию внутри расстановки во время проведения работ, аналогично нефтяной сейсморазведке, что позволяет более гибко проектировать полевые системы наблюдения для выполнения различных задач.

Современные станции (с использованием 3С-приемников) позволяют регистрировать одновременно три компоненты: Z, X и Y. По сравнению с нефтяной сейсморазведкой регистрация трех компонент позволяет сразу получить представление об обменных волнах и формировании волнового поля в целом. Однако регистрируемые поперечные волны зачастую являются более информативными в малоглубинной сейсморазведке, так как имеют более низкие скорости и позволяют получить большую разрешенность записи.

Обычно в малоглубинной сейсморазведке используется шаг по ПП и ПВ 0.5, 1 и 2 метра при проведении работ методом общей глубинной точки (МОГТ); 2, 5 или 10 метров при проведении работ методом преломленных волн (МПВ). Данные шаги выбираются в зависимости от детальности проведения работ, латеральной изменчивости разреза и выбранного объекта изучения.

Метод МПВ

Основным методом малоглубинной сейсморазведки является метод преломленных волн в модификации первых вступлений, это обусловлено относительной простотой проведения полевых работ, обработки и интерпретации данных [5]. В методе используются преломленные или рефрагированные волны для построения глубинно-скоростных моделей среды. МПВ является довольно быстрым и эффективным, соответственно, он может применяться для экспрессразведки.

При проведении полевых работ используются классические типы расстановок. Шаг по ПП и ПВ, как правило, составляет 2, 5 или 10 метров. Глубинность метода определяется мощностью источника и длиной расстановки и в подавляющем большинстве случаев не превышает 30 – 50 метров. В случае сложного строения разреза необходимо большое количество наблюдений для увеличения детальности и качества. Пример типичной системы наблюдения МПВ на обобщенной плоскости приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 - Система наблюдений МПВ на обобщенной плоскости

При наличии сложных границ и анизотропии скоростей разреза необходимо наличие дополнительных ПВ, как выносных, так и в пределах профиля, что

позволяет учесть конфигурацию границ и корректно восстановить скоростную модель среды (рисунок 2). Все более активно при проведении обработки данных МПВ применяется томографический подход, который основывается на построении сеточной модели с заданным градиентом скоростей и подборе геометрии луча. Данный подход позволяет довольно точно восстановить скоростную модель среды и учесть различные неоднородности ВЧР. К недостаткам томографического подхода в МПВ можно отнести градиентную скоростную модель как результат обработки, следовательно, неоднозначный переходе от градиентной модели среды к пластовой.



Рисунок 2 - Скоростная модель МПВ, полученная по поперечным волнам

<u>Метод ОГТ</u>

В основе данного метода лежит регистрация, обработка и интерпретация отраженных волн.

По сравнению с МПВ, ОГТ позволяет при сопоставимых условиях возбуждения и приема обеспечить несколько большую глубинность (до 100 – 200 метров) в малоглубинной геофизике. Результатом метода ОГТ являются

суммарные разрезы (во временной и глубинной областях), выделенные геологические границы, карты. Преимуществом метода являются разрезы с высокой детальностью. Это обеспечивается использованием шага по ПП и ПВ 0.5, 1 или 2 метра. По данным разрезам довольно точно прослеживается конфигурация границ и выделяются их различные изменения, которые могут быть связаны с различными литологическими неоднородностями, объектами и ОГП.

Для увеличения достоверности, а также оптимизации проведения полевых работ оптимальным является комплексирование данных МПВ и МОГТ. Для этого следует спланировать такой тип расстановки, при котором будет достаточно физических наблюдений как для МОГТ, так и МПВ. При отработке такого типа установки можно получить детальную скоростную модель ВЧР (рисунок 2) по данным МПВ и разрез МОГТ с высокой кратностью (рисунок 3).



Рисунок 3 - Временной сейсмический разрез МОГТ, полученный по поперечным волнам

Недостатком метода являются более трудоемкие и дорогие с экономической точки зрения полевые работ; проведение полевых работ, обработка и интерпретация данных ОГТ требуют специализированного программного обеспечения и необходимых профессиональных навыков.

Итогом проведения полевых работ в малоглубинной сейсморазведке являются сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ) и сформированные файлы геометрии (для ПП, ПВ и коммутации расстановки).

Обработка данных МОГТ в малоглубинной сейсморазведке основывается на тех же теоретических моделях и зависимостях, что и обработка данных нефтяной сейсморазведки. Некоторые процедуры, такие как деконволюция и миграция, не применяются из-за особенностей строения ВЧР и ограниченного частотного состава данных.

Типовой граф обработки выглядит следующим образом [68]:

• Формирование единого файла, содержащего подборки ОПВ для каждого профиля;

• Присвоение геометрии (координаты, альтитуды) сейсмическим записям;

- Редакция трасс;
- Регулировка амплитуд;

• Фильтрация материалов (включая корректирующую и обратную) для повышения соотношения сигнал/помеха и улучшения прослеживания первых вступлений;

- Дополнительные процедуры шумоподавления;
- Скоростной анализ;
- Ввод кинематических поправок и мьютинг за растяжение импульса;
- Суммирование по общей средней точке;

• Постобработка суммарных разрезов, включая коррекцию статических сдвигов.

Особенностью волнового поля в малоглубинной сейсморазведке является разный по уровню и амплитуде сигнал от трассы к трассе и от ПВ к ПВ. Это связано с самим строением ВЧР. Так как ВЧР сложены довольно молодыми и разуплотненными породами, это может приводить к разному амплитудному и частотному составу данных. Также` зачастую малоглубинные сейсморазведочные

работу проводятся в условии высокого количества техногенных помех, которые также «зашумляют» запись. Поэтому во время проведения обработки особое внимание необходимо уделять поверхностно-согласованным регулировкам фильтрациям. амплитуд И различным частотным При ознакомлении с сейсмограммами стоит провести анализ волнового поля и его частотного состава, а также определить характер и возможные причины помех, чтобы оптимально спланировать процедуры помехоподавления.

Также следует отметить принципиальную возможность восстановления скоростной модели среды по поверхностным волнам. В малоглубинной геофизике иногда используют метод мультиканального анализа поверхностных волн «MASW» [67]. Основными данными для метода являются рэлеевские волны. Данная волна, распространяющаяся в реальной среде, имеет дисперсию скорости (изменение фазовой скорости с изменением частоты). На основе частотновременного анализа волнового поля происходит построение дисперсионных кривых.

Далее в ходе инверсии подбирается теоретическая дисперсионная кривая, которая имеет наиболее высокий коэффициент корреляции с практической. Результатом вычислений является глубинно-скоростной разрез поперечных волн.

1.2.Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) в инженерных

скважинах

Вертикальное сейсмическое профилирование - разновидность 2Dсейсморазведки, при проведении которой источники сейсмических волн располагаются на поверхности, а приёмники помещаются в пробуренную скважину [15].

Результатами ВСП является «геологическая информация (как для любого другого метода сейсморазведки), которая представляется в виде [55]»:

- карт: глубин, мощностей, разломов, литологических замещений, развития коллекторов;
- карт физических свойств коллекторов;

- карт или схем преимущественного направление трещиноватости пласта коллектора;
- карт изменения во времени контура залежи.

К основным задачам, которые решает ВСП, относятся:

- изучение сейсмического волнового поля;
- изучение формы сейсмического сигнала;
- определение скоростной модели среды;
- согласование каротажных и наземных сейсмических данных.

В скважинной малоглубинной сейсморазведке используются более простые системы наблюдений по сравнению с нефтяной сейсморазведкой, которые собой размещение одного зачастую подразумевают фиксированного на поверхности ПВ (на постоянном удалении от устья) и одного скважинного ПП (одноканального трехкомпонентного зонда). Перемещение зонда по вертикали от забоя к устью обеспечивает регистрацию данных на различных глубинах. В инженерном ВСП обычно не используется перемещение ПВ по поверхности. Это обусловлено тем, что основной задачей данного метода в малоглубинной геофизике является получение скоростной модели среды по годографам падающих волн и выделение основных пластов, что необходимо для пересчета временных сейсмических разрезов в глубинные. Схематическое изображение системы наблюдений при проведении работ приведено на рисунке 4[55].

Таким образом, видно, что в малоглубинной геофизике ВСП применяется в упрощенном варианте. Стоит отметить, что конструкция инженерных скважин довольно сильно отличается от нефтяных и газовых, а именно:

• в инженерных скважинах не применяется цементаж обсадных колон;

• обсадные колонны различного диаметра могут перекрывать друг друга в большом интервале глубин.



Данные факторы осложняют проведение сейсморазведки, поскольку между стенкой скважины и обсадной колонной или стенками обсадных колонн образуется воздушное пространство, которое затрудняет прохождение сигнала и резко ухудшает качество данных.

Методика проведения работ и обработка данных подробно описаны в главе 5.1 настоящей работы.

1.3. Малоглубинная электроразведка

Современная электроразведка насчитывает довольно много методов, основанных на постоянном или переменном токе. В малоглубинной электроразведке наиболее широко используемыми из методов постоянного тока являются ВЭЗ (вертикальные электрические зондирования) и их модификация ЭТ (электротомография) [4]. В отечественной литературе и статьях по наземным

исследованиям ЭТ иногда называют СЭЗ (сплошные электрические зондирования), а применительно к работам на акваториях – НАЗ (непрерывные акваторные зондирования) [51]. Данная методика представляет собой совокупность классических ВЭЗов, модифицированных под специальную аппаратуру, а также специальной методики обработки и интерпретации данных, которая позволяет проводить 2D-интерпретацию, в отличие от 1D-интерпретации в методе ВЭЗ [4].

Классические ВЭЗ и методику проведения работ можно представить следующим образом. Установка состоит из 4-х электродов, два из которых приемные, два - питающие. Приемные электроды принято обозначать М и N, питающие - А и В. В зависимости от расстояния между питающими электродами изменяется глубина исследования. К питающим электродам подключают источник тока (генератор, батарея и т.д.), таким образом, создавая в данной линии ток, силу которого измеряют амперметром. В то же время, на приемных электродах появляется разность потенциалов, которую, В свою очередь, измеряют вольтметром. При увеличении разноса увеличивается глубина исследований. На практике применяются разносы от нескольких метров до нескольких километров, что порывает довольно широкий диапазон изучаемых глубин.

По полученным данным вычисляется кажущее и удельное сопротивление горных пород. Основным результатом метода ВЭЗ является геоэлектрический разрез.

Метод ЭТ появился относительно недавно и завоевал популярность в России и за рубежом [63]. Данный метод является модификацией классических ВЭЗ. С точки зрения аппаратуры, в методе используются схожие с ВЭЗ измерители и генераторы и добавляется коммутатор, который позволяет переключать пары питающих и приемных электродов внутри косы, которая, в свою очередь, подключена к станции [24]. Таким образом, электроразведочная аппаратура для ЭТ является многоэлектродной. Есть модификации аппаратуры, которые являются еще и многоканальными (могут измерять значения разности потенциалов (*dU*) несколько пар приемных электродов одновременно). В обработке данных электротомографии используется более сложный математический аппарат, который будет описан ниже.

В настоящее время имеется множество станций для проведения работ данным методом, как отечественных, так и зарубежных.

В качестве примеров можно привести следующие аппаратные решения для ЭТ:

• Комплект измеритель МЭРИ-24, генератор АСТРА-100 и коммутатор COMx64 (производство Россия);

- Омега-48 (производство Россия);
- Syscal Pro Switch-72 (производство Франция).

Указанная аппаратура позволяет производить съемку профиля длиной в 1000 - 2000 метров с шагом по электродам (по косе) 5 метров за 6 – 9 часов.

Принципиальная схема многоэлектродной и многоэлектродной многоканальной аппаратуры представлена на рисунке 5 [2].



Рисунок 5 - Принципиальная схема многоэлектродной аппаратуры (А) и многоканальной многоэлектродной аппаратуры (Б) [4] (на рисунке А крестиками обозначены точки записи)

Как и в других методах разведки, параметры расстановки, шаг по профилю и иные характеристики системы наблюдения определются проектной глубиной исследований и характером пород верхней части разреза. Типовые расстояния между электродами составляют 0.5, 1, 2, 5 и 10 метров. Число электродов у разных станций колеблется от 48 до 144 штук.

Как видно из описания выше, глубины исследований колеблются от первых метров до 120 – 150 метров. Этого вполне хватает для изучения строения разреза под инженерные задачи и ОГП.

Стоит отметить отличительные особенности, а также преимущества и недостатки данных методов (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительные характеристики мет			
Особенности (преимущества и недостатки)	ВЭЗ	ЭT	
Высокая скорость работ	Нет	Дa	
Высокая плотность наблюдений	Нет	Дa	
Обработка	Одномерная	Двумерная или трехмерная	
Шаг по разносам	Логарифмический	Линейный	
Большая глубинность засчет разносов	Дa	Нет	
Большой вес аппаратуры	Нет	Да	
Высокая стоимость аппаратуры	Нет	Дa	
Наличие квалифицированного персонала	Нет	Дa	

В целом, методика проведения полевых работ выглядит следующим образом:

• расстановка электродов по профилю с требуемым шагом, зависящим от проектной глубины исследования. При определении шага используются эмпирические зависимости (глубинность исследований методом ЭТ, как правило, составляет от 1/10 до 1/4 максимального разноса) и тестовые (опытные) наблюдения;

• Подсоединение электродов к косе, а косы, в свою очередь, к станции и, проведение измерений.

Проведение измерений на станциях электротомографии происходит по протоколу (сценарию). Под протоколом в ЭТ понимают последовательность назначения тех или иных электродов питающими или приемными. Как видно из рисунка 5, от выбора пары питающих электродов зависит разнос, положение точки записи на профиле, а соответственно, и глубина исследований. От расстояния между электродами зависит плотность наблюдений и максимальный разнос. Схема разреза точек записи установки Шлюмберже показана на рисунке 6.



Рисунок 6 – Разрез точек записи для 4-х электродной установки типа Шлюмберже (на рисунке изображены позиции питающих (AB) и приемных электродов (MN), а также точка записи (фиолетовый квадрат)

В результате проведения полевых работ получается разрез кажущихся сопротивлений, который приведен на рисунке 7.

Обработка данных ЭТ происходит в 2D-пространстве с помощью двумерной инверсии. Более подробно данный этап описан в главе 5.2. Результатом обработки являются разрезы УЭС (рисунок 8).



Рисунок 7 - Пример полевых данных электротомографии (разрез кажущихся сопротивлений для 4-х электродной установки Шлюмберже)



Рисунок 8 - Разрез удельных электрических сопротивлений

1.4.Георадиолокация

Георадиолокация - один из наиболее популярных методов малоглубинной геофизики [12]. Он позволяет получать результаты практически в режиме реального времени. Его относят и к электромагнитным методам, и к сейсмическим; данный метод сочетает в себе принципы распространения и регистрации электромагнитных волн, при этом само формирование отраженных сигналов основывается на контрасте электрических свойств горных пород [46].

Георадиолокация дает отличные результаты (структурные планы) при применении на небольшие глубины (до 10 метров) при обследовании полотна дорожной одежды, неглубоких водоемов, снежно-ледяного покрова, бетонных сооружений и т.д [11, 60].

Суть метода заключается в возбуждении электромагнитной волны и регистрации ее отражения от границы раздела сред. По сути георадиолокацию можно назвать "сейсмическим профилированием электромагнитными волнами".

Георадар, как правило, состоит из одного источника, одного приемника, блока управления и записи данных. В мире существует множество различных антенных блоков (АБ) с георадаров И различными параметрами И характеристиками. На практике используют несколько антенных блоков с различной центральной частотой для обследования одного профиля, так как от центральной частоты зависит длина волны, разрешающая способность и глубинность исследований. Оптимально использовать антенный блок с высокой частотой (1200 - 2000 МГц) для изучения строения самого верхнего слоя (до 1 метра), антенный блок со средней частотой (700 - 1200 МГц) для исследования до глубин 1-2 метра и антенный блок с низкой частотой (25 - 700 МГц) для исследования на глубины более 2 - 5 метров. Как пример приведем разрез полотна дорожной одежды на одном из шоссе в Московской области. Данный разрез получен с помощью трех антенных блоков с центральными частотами 400, 1000 и 1700 МГц. Георадиолокационный планшет (совокупность геологической модели и радарограмм), содержащий геологический разрез и волновые поля, приведен на рисунке 9. На данном планшете изображены: геологическая модель – результат интерпретации (закрашена крапом) и радарограммы, зарегистрированные различными АБ (цветными линиями выделены геологические границы).



Рисунок 9 - Георадиолокационный планшет (совокупность геологической модели и радарограмм)

(А - геологический разрез; Б - волновое поле, зарегистрированное АБ-1700 МГц; В - зарегистрированное АБ-1000 МГц; Г - зарегистрированное АБ-400 МГц.)

1.5. Топогеодезические работы в малоглубинной геофизике

Немаловажным для обеспечения корректности малоглубинных геофизических исследований является тщательное проведение топогеодезических работ. Для небольших по объему работ достаточно использовать тахеометр, для крупных проектов – GPS или GNSS дифференциальные системы, состоящие из базовой станции и ровера [26]. На пересеченных местностях используют сочетание приборов (GPS или GNSS + тахеометр). Данные работы помогают получить данные о пространственном расположении профилей на объекте и высотные отметки точек наблюдения – что является немаловажным для многих из методов малоглубинной геофизики. Рельеф оказывает влияние на структуру волновых полей (данных),

искажая их, и должен учитываться соответствующим образом на этапе обработки и интерпретации данных.

Для геофизики в целом, особенно для малоглубинной, требуется большая точность определения планового и высотного положения пунктов геофизических наблюдений. Современные тахеометры позволяют вести угловые измерения с точностью до трех угловых секунд, а измерения расстояний с точностью до 0.5 - 1 мм на км. Точность же дифференциальных систем наблюдений (при использовании поправок) достигает 8 – 10 мм в плане и 10 – 15 мм по высоте. Современные геодезические приборы способны решать задачи малоглубинной геофизики, обеспечивая высокоточные привязки пунктов геофизических наблюдений.

2. Физико-геологическое обоснование методов малоглубинной геофизики на примере различных целевых объектов

Геофизические методы (сейсморазведка, электроразведка и георадиолокация) основываются на контрасте физических свойств горных пород. Сейсморазведка способна проводить расчленение разреза при изменении плотности горных пород различного типа и скорости пробега акустических волн. Электроразведка на постоянных токах основывается на изменении сопротивлений (проводимости) горных пород, а георадиолокация - на изменении диэлектрической проницаемости пород.

Перечисленные аспекты, а также геологическую информацию по данным бурения (при ее наличии) следует учитывать, как при проведении полевых работ, так и на камеральном этапе. Для каждого объекта или задачи методы и методика подбираются индивидуально на основе физических свойств, геологической обстановки и опытно-методических работ (объектно-ориентированный подход). Необходимо априорное представление об изучаемом объекте (его размеры, глубина залегания, геологическое строение, генезис и т.д.) для выбора оптимальной методики, системы наблюдений и комплекса работ.

Рассмотрим более подробно возможности различных методов на примере основных целевых объектов малоглубинной геофизики: карстов и карстующихся толщ, оползней и оползневых процессов, зон вечной мерзлоты и археологических объектов.

2.1.Карст и суффозионные процессы

Геологическое описание карста и суффозионных процессов

Карст представляет собой процесс растворения, или выщелачивания трещиноватых растворимых горных пород подземными и поверхностными водами, в результате которого образуются отрицательные западинные формы рельефа на поверхности Земли и различные полости, каналы и пещеры в глубине [67, 16, 31]. Впервые такие широко развитые процессы детально были изучены на побережье Адриатического моря, на плато Карст близ Триеста, откуда и получили свое название. К растворимым породам относятся соли, гипс, известняк, доломит, мел. В соответствии с этим различают соляной, гипсовый и карбонатный карст. Наиболее изучен карбонатный карст, что связано со значительным площадным распространением известняков, доломитов, мела.

Необходимыми условиями развития карста являются: 1) наличие растворимых пород; 2) трещиноватость пород, обеспечивающая проникновение воды; 3) растворяющая способность воды. Наибольшее разнообразие карстовых форм наблюдается в открытом типе карста (горные районы известнякового плато Крыма, Кавказа, Карпат, Альп и др.). В этих районах развитию карста благоприятствуют открытая поверхность растворимых пород и частые ливни [27].

В общем случае карст можно представить следующим образом (рисунок 10) [1].

Типология и классификация карста

Общая классификация карста на территории СССР, которая используется и на сегодняшний день предложил Н.А. Гвоздецкий в 1965 году. По его мнению, карст следует разделять по морфолого-генетическому и литологическому типам. Объединение данных типов дает полное представление о данном карстовом процессе [16].



Рисунок 10 - Формы карста и суффозионных процессов.
Условные обозначения: 1 - карры, 2 - воронки,
3 - естественные шахты, 4 - пещерная галерея,
5 - вертикальная пещерная полость, 6 - сталактиты,
7 - сталагмиты и сталагнаты, 8 - натечные драпировки,
9 - подземные водотоки, 10- сифон, 11 - подземный водопад,
12 - грот с карстовым источником, 13 - вход в пещерную систему

По морфолого-генетическому типу можно выделить следующие типы карста:

- Погребенный (ископаемый);
- Бронированный;
- Покрытый;
- Задернованный:
- Полузадернованный и частично-задернованный;
- Голый;
- Сочетающийся с вечной мерзлотой;
- Останцовый тропический (реликтовый).

По литологическому типу карст делится на:

- Известняковый;
- Доломитовый;
- В мраморах;
- Меловой и в мелоподобных мергелях;
- Гипс-ангидритовый;
- Соляной.

Исходя из данной классификации видно, что первый тип выделяет карсты по обнаженности и перекрытости карстующейся пачки горных пород, второй - по литологическому составу горных пород.

С нашей точки зрения, данная классификация является оптимальной для малоглубинной геофизики, поскольку при проведении моделирования волновых полей, выполнении инженерно-геофизических работ, обработки и интерпретации она позволяет наиболее точно учесть особенности строения района работ и его физико-геологические особенности.

На основе приведенных выше сведений можно выделить следующие особенности выделения карста на различных геофизических полях:

• карстовые полости или воронки, заполненные суффозионными отложениями различного рода, проявляются в виде зон понижения скоростей пробега сейсмических волн и низких сопротивлений;

• карстовые пустоты и пещеры, заполненные пустотой (воздухом), проявляются в виде зон резкого понижения скоростей пробега сейсмических волн и высоких сопротивлений;

• различного рода карстовые проявления, связанные с формированием скрытых полостей, характеризуются областями потери корреляции или спорадическими осями синфазности основных структурных горизонтов, а также появлением дифрагированных волн на краях карстовых полостей.

Таким образом, опираясь на характерные признаки карста, видно, что наиболее эффективным методом его обнаружения и исследования должны являться электротомография и сейсморазведка с отработкой сети профилей.

2.2.Оползни, оползневые процессы и обвалы

Геологическое описание оползней, оползневых процессов и обвалов

Оползни и обвалы относятся к ОГП и вызывают массу проблем у инженерных служб. Изучение и мониторинг данных процессов является одним из базовых направлений малоглубинной геофизики [37].

Рассмотрим генезис оползневых тел, их строение и на основе этих данных попытаемся определить те особенности строения и физические свойства, которые отразятся в геофизических полях.

Из классических представлений геологии «оползень - это скользящее смещение (сползание) масс горных пород вниз по склонам гор и оврагов, крутых берегов морей, озер и рек под влиянием силы тяжести. Причинами оползня чаще всего являются подмыв склона, его переувлажнение обильными осадками, землетрясения или деятельность человека» [58].

К обвалам относят «отрыв масс горных пород с последующим их опрокидыванием, дроблением и скатыванием на крутых и обрывистых склонах» [34, 47].

Естественные обвалы наблюдаются в горной местности, прибрежных зонах и в районах речных долин. Антропогенные обвалы зачастую наблюдаются на месторождениях с открытым способом добычи запасов (карьеры). Предпосылкой формирования и проявления обвалов является ослабление горных пород под воздействием процессов выветривания, подмыва и растворения. Способствуют же образованию обвалов системы трещин, блочное геологическое строение пород, неправильная разработка бортов при проведении горных работ, а также буровзрывные работы.

Таким образом, видно, что оползни от обвалов отличаются лишь по механизму отделения масс горных пород: скольжение или падение.

Схема образования оползня и обвала представлена на рисунке 11.



Рисунок 11 – Схема образования оползня (слева) и обвала (справа)

В самом простом рассмотрении оползни можно представить двух типов.

<u>Первый тип оползней - блочный.</u> Из самого названия очевидно, что соскальзывание пород происходит блоками и внутри каждого из блоков сохраняется первоначальное геологическое строение участка склона. При формировании оползней блочного типа образуется четко выраженная в рельефе стенка отрыва, сама оползневая масса и западина.

<u>Второй тип оползней - поточный.</u> Характерной особенностью такого рода оползней является распад сорвавшегося блока. Оползни такого типа обычно развиваются на глинистых горных породах.

На практике, зачастую, приходиться работать на более сложно построенных оползневых и обвальных массивов, формирование которых происходит длительное время.

Классификация оползней

Существует несколько признаков классификации оползней, а именно: по масштабам явления (мелкие, средние и крупные), по скорости движения и активности (медленные, умеренные, быстрые и т.д.), по месту образования и по механизму процесса [56]. С точки зрения геологии, интересны все классификации, однако с точки зрения геофизики остановимся более подробно на классификации по механизму процесса, так как именно она нам даст первичное представление об объекте.

«По механизму образования принято выделять следующие типы: оползни сдвига (срезающие, консеквентные, срезающе-консеквентные), оползни выдавливания, оползни вязкопластические (оползни-потоки, сплывы, оплывины), оползни гидродинамического выноса (суффозионные, гидродинамического выпора)» [34, 47]. На основе данной классификации можно четко выделить геологические особенности строения, которые могут быть зафиксированы на волновых полях малоглубинной геофизики. Схема типизации была предложена И.О. Тихвинским в сборнике: «Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов» [39].

Классификация обвалов

Как таковой классификации обвалов не существует. В основном обвалы принято характеризовать мощностью процесса (мелкие, средние и крупные) и масштабом проявления (размером вовлеченной в процесс площади): мелкие, малые, средние и огромные.

Физико-геологические параметры оползневых и обвальных тел

Исходя из описанного выше строения оползневых участков, можно выделить несколько отличительных особенностей, которые позволяют выделить оползневое/обвальное тело или предпосылки для его формирования на фоне ненарушенного геологического строения склона. Геоморфологические особенности:

- наличие довольно крутого склона (не менее 25°);
- наличие четко выраженной границы скольжения (смещения или отрыва) прямолинейной или циркообразной формы;
- граница скольжения связана с деятельностью грунтовых вод на поверхности глинистых отложений или в неустойчивых ослабленных породах;
- «блочность» или «ступенчатость» склона;
- наличие у подошвы склона обломочной массы горных пород.

Особенности выделения оползневых и обвальных тел и предпосылок их формирования на разрезах:

- неоднородность строения горизонта;
- наличие на разрезах границ, которые не согласуются со строением вмещающего разреза;
- понижение скоростей пробега сейсмических волн;
- понижение удельных сопротивлений на границе контакта «оползень/обвальное тело – ненарушенный склон»;
- проявление трещин и ослабленных зон в массиве горных пород, которые прослеживаются на разрезах.

Оползневое или обвальное тело может быть сложено породами с различными физическими свойствами (скоростями пробега упругих волн, удельными сопротивлениями и т.д.), но они будут отличаться от вмещающего разреза. Различие может быть не столь ощутимо, но основным признаком будет наличие границы скольжение или системы трещин, говоря другими словами, границы раздела «оползень/обвальное тело – ненарушенный склон».

Таким образом, опираясь на характерные признаки оползневых и обвальных тел и процессов, видно, что наиболее эффективным методом их обнаружения и исследования должны являться электротомография и МПВ с отработкой сетки профилей, что поможет четко откартировать потенциально опасный участок, а также выявить его структурные особенности.

2.3. Многолетнемерзлые породы и зоны растепления

Геологическое описание многолетнемерзлых пород

«Многолетнемерзлые породы (ММП) - это породы, которые постоянно находятся в условиях отрицательных температур. На территории России многолетняя мерзлота распространена на территории Сибири и Урала» [21, 20]. Вопрос изучения распространения зон вечной мерзлоты и растепления остро стоит при проектировании, сооружении и эксплуатации трубопроводов, скважин, различных объектов НГК, жилых зданий и помещений. Исследование и мониторинг состояния зон вечной мерзлоты является неотъемлемой частью общественной и экономической безопасностей [45]. Практика показывает, что при длительной или неправильной эксплуатации объектов строительства, в том числе нефтегазодобывающих предприятий, многолетнемерзлые породы могут менять свои прочностные свойства в результате перехода из мерзлого состояния в состояние растепления, что, в свою очередь, способствует возникновению аварийных ситуаций. Типовой вид ВЧР Западной Сибири можно представить в виде рисунка 12.

В зоне вечной мерзлоты происходят довольно сложные геологические процессы, которые связаны с расклиниванием, пучением, перемещением и течением горных пород под действием замерзания подземных вод [24, 25]. Данные процессы зависят от условий залегания, режимов работы подземных вод и характера подземных льдов.

Существуют два механизма образования подземных вод, разделяющиеся по времени их образования. Первый - сингенетический, второй - эпигенетический. Сингенетические воды возникают совместно с формированием самих горных пород, эпигенетические - образуются после. Эпигенетические подземные воды в зонах распространения ММП из-за физических свойств самой воды могут привести к активизации и формированию ОГП, влияющих на прочностные характеристики пород. Это такие процессы, как: морозное выветривание, морозные трещинообразование, склоновые процессы (крип, солифлюкция) оползневого характера и термокарст [9, 35].



Рисунок 12 – Пример строения ВЧР Западной Сибири

• Морозное выветривание - разрушение горных пород и грунтов, происходящее из-за замерзания и расширения воды, попадающей в поровое пространство и трещины породы.

• Морозное трещинообразование (рисунок 13) - раздавливание рыхлых горных пород замерзающей водой.

• Крип - процесс, который характеризуется медленным сползанием по склону горных пород под действием силы тяжести. Частицы грунта при нагревании расширяются и приподнимаются; находясь на склоне под действием силы тяжести, при понижении температуры частицы опускаются обратно, но не своем первоначальное место, а ниже по склону. Таким образом, происходит как бы
волнообразное перемещение горной породы [8]. Процесс перемещения частиц изображен на рисунке 14.



Рисунок 13 - Морозное трещинообразование



Рисунок 14 - Крип (схема движения частиц). Условные обозначения: 1 пройденное по склону расстояние, 2 вертикальная амплитуда перемещения

• Солифлюкция - это медленное течение (растекание) горных пород по склону, связанное с тем, что в верхних слоях скапливается талая вода, а нижние слои скованны льдом, который является своеобразным водоупором и границей скольжения [6]. Схематично данный процесс изображен на рисунке 15.

• Термокарст - это образование просадочных и провальных форм рельефа, подземных полостей и пустот из-за вытаивания льда или растепления мерзлых грунтов, связанное с изменением температурного режима их нахождения [7, 49]. Процесс образование термокарста изображен на рисунке 16.



Рисунок 15 - Схематичное изображение процесса солифлюкции [6]



Рисунок 16 - Схема образования термокарста

Мощность зон вечной мерзлоты может колебаться от 10 до 2000 метров [20]. На данный момент «существуют методы и методики малоглубинной геофизики и термометрии, которые позволяют выделять и оконтуривать зоны вечной мерзлоты и зоны растепления, проводить их мониторинг, а также моделировать тепловой режим и ореол оттаивания вокруг объектов различных типов и назначений» [10, 23].

Так, с помощью малоглубинной сейсморазведки с применением в качестве источника кувалды или падающего груза можно обследовать верхнюю часть разреза и выделить на разрезе многолетнемерзлые породы до 150 - 200 метров, если использовать альтернативный источник (вибрационный или взрывной), то глубина исследований может достичь 300 - 500 метров. С помощью малоглубинной электроразведки (электротомографии) возможно изучение многолетнемерзлых пород до глубин 120 - 150 метров.

Физико-геологические параметры ММП

Так как все непрямые методы исследования Земли основываются на том или ином контрасте физических свойств горных пород, то необходимо четко понимать, какими именно свойствами обладают ММП; как данные свойства будут проявляться в различных геофизических полях.

Строение и свойства многолетнемерзлых пород напрямую зависят от распространения в них льда, его минерализации и свойств горных пород, в которых мерзлота распространилась. В кристаллических и метаморфических горных породах лед заполняет жилы и трещины. В песчаных породах лед распространяется в виде кристаллов между зернами породы, в глинах и глинистых породах лед может находиться между чешуйками или виде тонких прослоев.

Таким образом, мы видим, что физические параметры многолетнемерзлых пород зависят от следующих факторов:

- физических свойств скелета горных пород;
- количества льда и жидкой фазы, содержащихся в горных породах;
- минерализации;
- глинистости;
- криогенной текстуры;
- температуры.

Основными факторами, влияющими на характер и изменение данных малоглубинной геофизики, являются только первые три. Именно физические свойства скелета, количество льда/жидкой фазы и пористость будут вносить основной вклад в формирование значений скоростей пробега сейсмических волн. На значения удельных сопротивлений, в основном, будут влиять физические свойства скелета, количество льда/жидкой фазы, минерализация, температура и глинистость. Криогенная текстура может зависеть от типа пористости. Глинистость связана с пористостью. Увеличение глинистости приводит к общему понижению сопротивления горных пород. При понижении температуры поровый флюид будет превращаться в лед, что будет повышать сопротивления. Данный эффект обусловлен тем, что большая часть породообразующих минералов является диэлектриками, а проводимость обуславливается движением ионов солей, растворенных в поровой влаге. Породы данного типа называются ионопроводящими [51].

«Для северной части России зоны вечной мерзлоты связаны в основном с глинистыми и песчано-глинистыми отложениями верхней части разреза» [57]. Породы данного типа обладают довольно широким диапазоном и скоростей пробега сейсмических волн и значений удельных сопротивлений. Например, глины имеют скорости пробега продольных волн от 1200 до 2500 м/с. Пески - от 1500 до 4000 м/с в зависимости от плотности. Значения удельных сопротивлений для глин может колебаться от 5 до 30 Ом⁻м, для песков от 100 до 300 Ом⁻м [51]. Данные сведения являются обобщенными и справедливы только для нормального (не промерзшего) состояния горных пород.

Рассматривая же данные породы в мерзлом состоянии, можно выделить следующие закономерности: их скорости, сопротивления и плотности будут отличаться. Это дает возможность их выделения геофизическими методами. В общем случае при переходе в мерзлое состояние данные свойства меняются следующим образом [13]:

• Скорость распространения упругих волн увеличивается, так как скорость пробега продольных волн (*Vp*) во льду 3500 - 4000 м/с, что примерно в 2-2.5 раза больше, чем в воде;

• Сопротивление возрастает скачком (для скальных пород не более чем в 10 раз, для рыхлых пород не более чем в 10 - 100 раз);

Плотность с увеличением льдистости уменьшается, так как плотность льда 0.9 - 0.95 г/см³;

• Магнитная проницаемость и восприимчивость остаются неизменными.

При переходе пород в мерзлое состояние, как правило, скорости распространения упругих волн возрастают, а плотность уменьшается, поскольку эти свойства зависят от минерального каркаса и типа флюида, заполняющего поровое пространство. Из этого стоит сделать вывод, что данное высказывание

справедливо для трещиноватых пород и пород с открытым типом пористости, в которых пластовая вода, заполняя весь массив породы, переходит в мерзлое состояние. Для массивных пород, при переходе в мерзлое состояние скорости могут не меняться.

Если рассматривать более подробно вопрос скоростей, то можно дать следующую оценку (интервал их изменений) [13]:

• При промерзании грубодисперсных пород скорости пробега продольных (Vp) волн увеличиваются резко, примерно 3 - 5 раз;

• При промерзании тонкодисперсных пород увеличение Vp составляет 1.5 - 3 раза;

• При промерзании скальных пород увеличение скоростей Vp составляет не более 2-х раз.

Аналогичные изменения касаются и скоростей поперечных волн. По экспериментальным данным существует довольно интересный факт, что соотношение скоростей *Vs* к *Vp* составляет 0.4 - 0.6 и является довольно стабильным показателем.

Значения удельных сопротивлений аномальных зон (ММП) были обобщены по данным полевых электроразведочных работ в виде интервалов (градаций) в зависимости от литологии, криогенного строения и температуры [50]. Для Западной Сибири значения УЭС ММП различного литологического состава и криогенной текстуры приведено в таблице 2.

«Не стоит забывать, что такой сильный разброс скоростей зависит от пористости, плотности горных и наличия флюида в порах, а разброс сопротивлений зависит сопротивления скелета горной породы, от объема пластового флюида, содержащейся в породе и его минерализации» [50].

Порода	Криогенная текстура	Удельное электрическое сопротивление р, Ом∙м	Суммарная влажность породы, %	Температура, 0° С
Пески	Массивная	$3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$	15 - 20	Около 0
Супеси и суглинки	-		20-30	0 ÷ -8
Пески	-	$3 \cdot 10^3 - 10^4$	15 - 20	-(1 ÷ 6)
Супеси и суглинки	Шлировая		20-30	-(1 ÷ 6)
Пески	Массивная	$10^4 - 5 \cdot 10^4$	15 -20	-(6 ÷ 8)
Супеси и суглинки	Шлировая		20 - 30 50 - 100	$-(1 \div 6)$ $0 \div -4$
Пески	-	$5 \cdot 10^4 - 10^5$	50 - 100	$0 \div -4$
Супеси и суглинки	-		5 - 100	-5 и ниже
Пески	-	>1,5.10 ⁵	50 - 100	-5 и ниже

Таблица 2 - Значения удельных сопротивлений горных пород в мерзлом состоянии [50]

Исходя из вышеперечисленного видно, что задача выделения ММП и зон растепления - довольно многогранная и сложная из-за непостоянства и широкого разброса физических свойств и в плане, и по глубине для одних и тех же горных пород. Поэтому для данных аномалий необходимо использовать комплекс методов малоглубинной геофизики, состоящей как минимум из сейсморазведки, электротомографии (наземной и скважинной) и скважинной термометрии. Также, для оценки динамики ММП и зон растепления в пределах ответственных объектов необходимо проводить регулярных их мониторинг.

На основе приведенных выше сведений можно подвести следующие итоги:

- ММП обладают повышенными сопротивлениями на фоне вмещающего разреза, так как они состоят из смеси песчаных или глинистых пород и льда (для островной мерзлоты);
- ММП обладают высокими скоростями пробега сейсмических волн;
- ММП обладают пониженными температурами (даже в летние периоды времени);

- Зоны растепления обладают более низкими скоростями пробега сейсмических волн;
- Зоны растепления вызывают более сильное поглощение энергии сейсмических волн;
- В процессе прохождения сейсмической волны через зону растепления может образовываться "псевдоотражение" из-за образования отраженных волн на обводненном участке.

Таким образом, опираясь на характерные признаки ММП и таликов, видно, что наиболее эффективным методом их обнаружения на этапе быстрой разведки должна являться электротомография, а на этапе детального изучения – комплекс: электротомография и сейсморазведка.

2.4.Оценка применимости методов малоглубинной геофизики для решения инженерно-геологических задач

Как видно из описания физико-геологических свойств и характерных особенностей выделения целевых объектов, малоглубинная геофизика решает довольно сложные задачи, которые зачастую требуют применения комплекса методов. Опираясь на приведенные данные по геологии и физические возможности методов, а также их результаты, в таблице 3 приведена оценка их применимости в различных условиях. Из данной таблицы видно, что основными методами, которые способны давать хороший результат в различных условиях (даже при минимальном количестве априорной геологической информации) являются: сейсморазведка и электротомография.

	ΜΟΓΤ	КМПВ	ЭТ	Георадио-	Магнито-	Грави-
				локация	разведка	разведка
Изучение строения		+/-		I		
разреза	–	(*)	Ŧ	–	-	-
Оползни	-	+	+	+	-	-
Карсты	+	+	+	+	-	+/- (**)
ММП	+	+	+	+/- (***)	-	-
Поиск линейных объектов	-	+	+	+	+	-
Археология	-	+	+	+	+	-

Таблица 3 – Оценка применимости различных методов на целевых объектах

Комментарии к таблице

* <u>Изучение строения разреза</u> подразумевает построение структурных планов, которые должны быть привязаны по глубине. Сейсморазведка МОГТ позволяет выделить структурные горизонты, которые на основе данных ВСП могут быть пересчитаны в глубину. Глубинно-скоростные модели МПВ являются градиентными (см. граф обработки данных МПВ - глава **5.3**), поэтому при интерпретации возникает вопрос перехода от градиентной модели среды к пластовой.

** <u>Карст.</u> Перед проведением работ методом гравиразведки необходимо провести математическое моделирование для оценки величины изменения гравитационного поля при известных параметрах карстовой полости (размеры и глубина залегания). Из этого следует, что одним из условий является обязательное наличие априорной геологической информации.

*** <u>ММП.</u> Метод георадиолокации стоит применять на объектах данного рода при небольшой глубине их залегания (3 – 10 метров). Также стоит отметить, что наличие глинистых пород во вмещающем разрезе может значительно ухудшить качество данных и снизить глубинность метода.

3. Моделирование данных сейсморазведки и электротомографии на целевых объектах

Моделирование проводится с целью выработки методики для проведения сейсморазведочных и электроразведочных работ в различных условиях. Как было сказано ранее, большинство методов малоглубинной геофизики основываются на контрасте физических свойств пород или аномалий, в силу этого на различных объектах те или иные методы разведки могут быть неэффективными. В таких случаях следует выполнять комплекс изыскания для построения достоверных геолого-геофизических моделей.

В данной главе приведены результаты моделирования для различных ОГП. Сведения об общем строении вмещающих разрезов взяты из геологических справочников и отчетов по ранее выполненным изысканиям.

3.1.Карст и суффозионные процессы

3.1.1. Модели сейсморазведки

Для решения прямой и обратной задач были построены несколько моделей. Исходная модель состоит из 4-х пластов: песок, глина, переслаивающаяся карбонатная толща и карбонатная толща. Далее в модель помещается несколько вариантов полостей. Первый вариант – полость, наполненная пустотой, второй – наполненная суффозионным материалом. Полость находится в переслаивающейся карбонатной толще, переходя в пласт глин. Таким образом, имитируется предстоящий провал, когда свод полости вскрывает неустойчивые вышезалегающие породы. Данные модели изображены на рисунке 17.

В результате решения обратной задачи по данным сейсморазведки МПВ были получены скоростные модели среды, представленные на рисунке 18. При наличии в разрезе низкоскоростной аномалии (полости) глубинность метода резко падает. Модели восстанавливаются неоднозначно. Единственными проявлениями верхней кромки аномалии является шероховатость изолиний скоростей, наблюдаемая в интервале средних глубин. Подошва же аномалии не выделяется.



Рисунок 17 – Исходная модель ВЧР (слева), модель ВЧР с карстовой полостью - справа

Таким образом, можно сделать вывод, что изучение карстовых полостей и процессов по данным лишь сейсморазведки МПВ довольно затруднительно.



Рисунок 18 – Восстановленные глубинно-скоростные модели: для карстовой полости, заполненной суффозионным материалом - слева; для карстовой полости заполненной воздухом – справа

Вместе с тем, метод ОГТ позволяет увидеть в волновом поле аномалии, связанные с карстовыми полостями (рисунок 19). На временных разрезах выявляется аномальное тело. Погрешность составляет примерно 10 - 15%.

По совмещенным данным МОГТ и ЭТ (рисунки 20 - 21) видно, что разрезы довольно точно повторяют друг друга. Это позволяет сделать вывод о высокой сходимости результатов геофизических методов при решении поставленных задач и дать некоторую свободу при выборе комплекса методов и проектировании систем наблюдения для минимизации временны и финансовых затрат на выполнение работ.



Рисунок 19 - Временные разрезы



Рисунок 20 – Совмещение временных сейсмических разрезов и разрезов удельных электрических сопротивлений на модели карстовой полости, заполненной воздухом



Рисунок 21 – Совмещение временных сейсмических разрезов и разрезов удельных электрических сопротивлений на модели карстовой полости, заполненной суффозионным материалом

3.1.2. Модели электротомографии

Решая аналогичную задачу (модели приведены на рисунке 22) методом ЭТ, были получены разрезы КС и УЭС, приведенные на рисунках 23 - 24.



Рисунок 22 - Исходная модель ВЧР (слева), модель ВЧР с карстовой полостью - справа

На разрезах УЭС выделяются контуры аномалии, значения разносов соответствуют исходным глубинам.



Рисунок 23 - Модельные разрезы кажущихся сопротивлений для 4-х электродной установки Шлюмберже: для карстовой полости, заполненной суффозионным материалом - слева; для карстовой полости заполненной воздухом - справа

В результате решения обратной задачи были рассчитаны разрезы УЭС, приведенные на рисунке 24.

Данные разрезы довольно точно описывают исходные модели. Стоит отметить, что в случае заполнения полости суффозионным материалом (малоконтрастным по сопротивлению глинам) контуры аномалии практически не выделяются, что является ожидаемым результатом. В противном случае (при заполнении воздухом) латеральные размеры аномалии, а также ее кровля восстанавливаются довольно точно. Тем не менее, подошву аномалии выделить остается затруднительным.

<u>Выводы</u>

Проведенное математическое моделирование доказывает, что применение одного метода является малоэффективным. Сочетание МПВ и ЭТ дает неполное описание разреза. Лишь в благоприятных ситуациях (наличие контрастного разреза; размера аномалии, сопоставимого с разрешающей способностью методов; малой глубиной залегания карста и пр.) методы смогут дать большую информативность.

49



Рисунок 24 – Разрезы удельных сопротивлений, полученные в результате инверсии данных: для карстовой полости, заполненной суффозионным материалом - слева; для карстовой полости заполненной воздухом - справа

Таким образом, для получения надежных геолого-геофизических данных на карстовых процессах комплекс МПВ и ЭТ следует дополнить методом ОГТ.

3.2. Оползневые и обвальные процессы

3.2.1. Модели сейсморазведки

Моделирование проводилось с целью оценки возможности и эффективности проведения сейсморазведочных работ в зонах развития оползневых и блочнообвальных процессов, скоростной разрез которых может иметь сложную структуру.

При моделировании оползней была построена модель с круто выраженным рельефом, который имитирует горные условия местности, состоящая из двух пластов. Верхний пласт осложнен наличием оползневого тела. Параметры модели и скорости пробега сейсмических волн изображены на рисунке 25.

В результате моделирования и решения обратной задачи (методом инверсии) была получена скоростная модель среды, представленная на рисунке 26.

По данной модели видно, что она обладает малой глубинностью. Данный факт обусловлен наличием «крутого» рельефа, поэтому второй пласт не прослеживается. Тем не менее, стоит заметить, что само тело оползня прослеживается хорошо. Его границы восстанавливаются довольно однозначно.

50

Проведение сейсморазведки в подобных поверхностных условиях может быть малоэффективным.







Рисунок 26 – Скоростная модель среды

3.2.2. Модели электротомографии

Изначально для описания обвальных процессов была построена модель, состоящая из двух пластов с различными сопротивлениями. Данная модель описывает строение бортов карьера, состоящего из магматических пород. Внутрь первого пласта было помещено тело трапецеидальной формы с довольно низким сопротивлением, которое отвечает отдельному блоку с изменением свойств верхнего пласта (рисунок 27). Структурная модель имитирует блочно-обвальный процесс.

В результате решения обратной задачи был получен разрез УЭС, представленный на рисунке 28.

По данному разрезу видно, что латеральные размеры аномалии (блока) восстанавливаются с погрешностью 5 – 10 %. Подошва аномального тела практически точно соответствует заложенной модели.



Рисунок 27 – Модель борта карьера с аномальной зоной пониженных сопротивлений



Рисунок 28 – Разрез УЭС, полученный в результате решения обратной задачи

<u>Выводы</u>

Моделирование оползневых и обвальных процессов доказывает эффективность применения электротомографии при картировании данных разновидностей ОГП. Применение ЭТ позволяет решить данные задачи при меньшем времени проведения полевых и камеральных работ. В условиях крутого рельефа, наличия скальных пород на поверхности или техногенных помех от добывающих и иных предприятий проведение сейсморазведки может быть затруднено. Таким образом, одним из основных и эффективных методов в данной ситуации является электротомография.

3.3. Многолетнемерзлые породы

3.3.1. Модели сейсморазведки

Моделирование проводилось с целью оценки возможности и эффективности проведения сейсморазведочных работ в зонах вечной мерзлоты, скоростной разрез которых может иметь сложную структуру. Объектом исследования является

полуостров Ямал и близлежащие территории, располагающиеся за полярным кругом.

Существуют три типа сейсмогеокриологического разреза, подробно описанные А.Г. Скворцовым [41] (рисунок 29 [38]):

- Нормальный разрез скорости продольных и поперечных волн растут в подстилающих толщах с увеличением глубины, т.е. имеет положительный градиент скорости;
- Инверсный разрез скорости продольных и поперечных волн снижаются с увеличением глубины;
- Частично инверсный разрез пласт с пониженной скоростью залегает в толще с повышенными относительно него скоростями (положительный градиент скоростей).



Рисунок 29 - Типы сейсмогеокриологических разрезов. Слева направо: инверсный, нормальный, частично инверсный разрезы [38]

Скорости распространения волн в геологических средах можно описать в градиентном представлении, в нашем случае повышающаяся и понижающая скорость в среде представлена как пачка очень тонких слоев с постоянными скоростями, где размер пласта пренебрежимо мал.

Для построения моделей и последующей дальнейшей обработки методом инверсии времен пробега первых вступлений выбраны нормальный и частично

инверсный разрез, полностью инверсный не использовался из-за отсутствия в нем преломленных волн, наибольший интерес в данном случае представляет частично инверсный разрез, в котором может наблюдаться эффект «выпадения» слоя.

Градиентные модели описываются математическими функциями, которые в дальнейшем проходят процедуру объединения. Для описания приустьевой зоны используется горизонтальный градиент скоростей, температура прискважинной зоны принимается постоянной, с учетом того, что температура ближе к поверхности падает, как и скорости распространения волн в окружающих его породах. Для упрощения латеральную мощность и скоростной градиент растепления можно взять с постоянным значением. Для газовых шлейфов, располагающихся под землей (под насыпным грунтом дороги), используется вертикальный градиент, описываемый несколькими функциями.

Для моделирования используются скорости в диапазоне 2000 - 3000 м/с. Для прискважинных растепленных зон выбрана скорость 1800 м/с и для газового шлейфа (ГШ), где ядром растепления является трубопровод - 2000 м/с.

Таким образом, было построено три класса моделей: растепление от ГШ в виде частично инверсного разреза в толще с нормальным разрезом; растепление от скважины в частично-инверсном и в нормальном разрезах.

На рисунке 30 представлены три типа исходных моделей с графиками распределения скоростей вдоль красных линий.

Для томографической обработки первых вступлений преломленных волн использовано ПО «Rayfract» (компании Intelligent Resources Inc.). Анализировались два типа инверсии: WET и DeltatV.

На рисунке 30 представлены результаты инверсии. Более подробно результаты моделирования приведены в материалах конференции [38, 81, 80].



Рисунок 30 - Глубинно-скоростные модели ММП с зоной растепления. Слева – растепление от газового шлейфа, в центре – растепление от скважины в частичноинверсном разрезе, справа - растепление от скважины в нормальном разрезе. Графики скоростей (нижний ряд) приведены для сечений модели А и Б



Рисунок 31 – Исходные модели (слева), результат восстановления методами сейсмотомографии Delta-t-V (в центре) и WET (справа)

Выводы

Растепление от газового шлейфа на всех профилях в условиях нормального разреза хорошо локализовано по латерали, но центр можно локализовать на глубинах до 11 м. Восстановленная глубинно-скоростная модель растепления от скважины в условиях частично инверсного разреза, имеет глубинность несколько

метров (до глубины кровли инверсного слоя). В случае нормального разреза - зона растепления выделяется до глубин 10 - 12 м.

Использование сейсморазведки на преломленных волнах показало возможность выделения ММП и зон растепления в условиях нормального и частично-инверсного разреза. К минусам можно отнести малую глубинность метода.

3.3.2. Модели электротомографии

Общее описание групп моделей

Зададим несколько групп моделей ВЧР, где последний слой - нижнее полупространство. Далее рассчитаем модельные разрезы КС для различных установок и выполним инверсию данных (решение обратной задачи), а после проведем качественную и количественную оценку результатов. Контраст сопротивлений вмещающего разреза, ММП и таликов довольно высокий в силу физических свойств и климатических условий, поэтому моделированию данных этой главы уделено особое внимание. Подобного рода контраст может наложить ограничения на глубинность исследований и качество данных в целом.

<u>Первая группа моделей</u> будет отображать общее строение ВЧР. Затем мы будем добавлять в них реликтовые ММП во второй слой. Группа моделей будет отображать изменение разрезов КС и УЭС в зависимости от изменения латеральных размеров и мощности ММП. Таким образом, мы сможем понять динамику изменения данных и выделить их особенности в зависимости от конфигурации аномалии.

Вторая группа моделей будет состоять только из верхних двух пластов кустовой площадки (пески и глины), в которые будут включены различного рода аномалии: скважины и зона растепления, образовавшаяся из-за их работы; а также ММП.

В данной главе настоящей работы будут приведены результаты только по наиболее характерным моделям. Более подробно с полным описанием моделирования и результатами можно ознакомиться в статье [77].

Параметры моделей и установок

В общем виде параметры моделей и групп можно представить в виде сводной таблицы 4. Латеральные размеры моделей превышают длину активной расстановки, это необходимо для минимизации краевых эффектов при моделировании.

Классы моделей внутри первой группы подписаны буквами в углу рисунков, аналогично результатам, полученным по ним (разрезам КС и УЭС).

Группа моделей	1	2			
Латеральный размер	2000	200			
Тип пород верхнего пласта	супесь / суглинки	песок			
Мощность верхнего пласта, м	30	8			
УЭС пород верхнего пласта, Ом м	30	250 (промерзание верхнего слоя)			
Тип пород среднего пласта	пески	глины			
Мощность среднего пласта, м	300	22			
УЭС пород среднего пласта, Ом [.] м	200	30			
Тип аномалии в среднем пласте	ММП				
Мощность аномалии, м	200	0 / до подошвы модели			
Латеральные размеры аномалии, км	0 / 200 / 800 / ∞	неправильной формы			
УЭС аномалии, Ом м	16000	1650			
Тип пород нижнего пласта	глины	-			
Мощность нижнего пласта, м	70	-			
УЭС пород нижнего пласта, Ом м	70	-			
Тип электроразведочной установки	AMNB и AMN+MNB				
Длина активной расстановки	1420	142			
Число электродов в расстановке, шт	72				
Шаг по электродам, м	20	2			

Таблица 4 – Параметры моделей и установок

Первая группа моделей

Общий вид моделей и конфигурация ММП приведены на рисунке 32. Модели данной группы разбиты на четыре класса (А – Г). Рисунок 26А соответствует общему строению ВЧР. На рисунке 26Б во второй пласт добавлена зона ММП, имеющая и латеральный размер, и мощность 200 метров. ММП на рисунке 26В имеет аналогичную мощность, но латеральный размер увеличен до 800 метров, а на рисунке 26Г зона ММП проходит через всю модель. На рисунках 33 - 34

представлены разрезы КС по результатам моделирования для установок AMNB и AMN+MNB соответственно.



Рисунок 32 - Первая группа моделей ВЧР с реликтовыми ММП постоянной мощности и переменных латеральных размеров (классы А – Г)

Построение данных моделей необходимо для выявления особенностей изменения разрезов КС и УЭС при внесении в них ММП различных латеральных размеров и мощностей.



Рисунок 33 – Первая группа моделей, классы А - Г. Модельные разрезы кажущихся сопротивлений для 4-х электродной установки Шлюмберже



Рисунок 34 – Первая группа моделей. Классы А - Г. Модельные разрезы кажущихся сопротивлений для 3-х электродной комбинированной установки

Результаты и выводы по первой группе

Для проверки правильности и корректности моделирования была решена обратная задача с помощью алгоритма двумерной инверсии. Данные по двум установкам были объединены и экспортированы в программу «RES2DINV» (Geotomo, Малайзия). На рисунках 35 - 38 показаны результаты.

Видно, что при отсутствии аномального тела ММП (рисунок 35) разрез УЭС имеет спокойный и ровный характер. На данном разрезе прослеживаются все три пласта, которые изначально заложены в модель ВЧР. Границы пластов на разрезе УЭС, а точнее говоря градиентные зоны сопротивлений (особенность сеточного алгоритма задания стартовой модели) соответствуют отметкам пластов стартовой модели.

При наличии ММП во втором пласте (класс моделей Б – Г) на разрезах (рисунок 36 - 38) довольно точно начинают прослеживаться их латеральные границы. На разрезах появляется высокоомная аномалия. По мере увеличения размеров ММП, увеличивается и контраст аномалии по сравнению с вмещающим разрезом. Конфигурация разрезов и размер аномалии напрямую зависит от заданной модели.





Рисунок 35 - Первая группа моделей, класс А. Заданная модель разреза и восстановленная по данным моделирования и инверсии

Стоит отметить несколько особенностей. На разрезах Б и В (рисунок 36 - 37) латеральные размеры аномалии восстанавливаются с погрешность 7 – 10 % от размера ММП. На разрезе УЭС класса Б возможно проследить третий пласт, а на В уже невозможно. Также на данном разрезе мы видим искажение сопротивлений второго пласта, начиная с глубины 80 метров и ниже. Сопротивления данной зоны вне ММП явно занижены.

Класс Г имитирует частичное промерзание второго пласта в диапазоне глубин 80 - 280 метров на всем участке профиля (по всей длине модели). При такой конфигурации ММП являются пластом изолятором, ниже которого мы уже не можем проследить геологическое строение ВЧР. Это подтверждается разрезом УЭС на рисунке 38.



Рисунок 36 - Первая группа моделей, класс Б. Заданная модель разреза и восстановленная по данным моделирования и инверсии

61



Рисунок 37 - Первая группа моделей, класс В. Заданная модель разреза и восстановленная по данным моделирования и инверсии



Рисунок 38 - Первая группа моделей, класс Г. Заданная модель разреза и восстановленная по данным моделирования и инверсии

Немаловажным фактором является точность восстановления кровли и подошвы зоны ММП. На всех классах мощность ММП завышена на 10 – 15 %, хотя центр аномалии расположен на заданном месте. Это можно объяснить падением разрешающей способности электроразведки с глубиной.

Вторая группа моделей

Моделирование данной серии необходимо для выделения особенностей влияния аномалий различного рода на регистрируемые данные и оценки достоверности решения обратной задачи в сложных условиях. Поэтому изначально была задана малоглубинная модель, в которую в последующем были внесены ММП и проводящие зоны, которые в свою очередь имитируют металлические объекты в разрезе (влияние обсадных колонн скважин).

62

Результаты и выводы по второй группе

Строение модели показано на рисунке 39. На разрезах КС (рисунки 40 - 41) прослеживаются оба пласта, которые изначально заложены в модель кустовой площадки. При наличии аномалий на модельных разрезах появляются зоны высоких и низких сопротивлений. Аномалии от низкоомных тел (обсадные колонны скважин) уверенно выделяются на разрезах.

Разрезы УЭС (рисунок 42) довольно детально описывают геологическую картину исходных моделей. Правый разрез имеет сложное строение, однако стоит заметить, что общий вид (контур) аномалий, их пространственное положение и размеры восстанавливаются однозначно. В зоне растепления присутствует высокоомное тело, которое является артефактом инверсии. Таким образом, видно, что, несмотря на сложное строение моделей (наличие контрастных аномалий различного размера) ЭТ способна решить поставленную задачу с высокой достоверностью.

Краткий анализ моделирования ММП в различных геологических условиях

Результаты моделирования и решения обратной задачи показывают довольно устойчивый и хороший результат в различных условиях. Отличительной чертой всех моделей является стабильное выделение латеральных размеров аномалий. Точное выделение кровли возможно при небольшой глубине залегания аномалий (глубина залегания аномалии до 1/4 - 1/3 максимального разноса). Подошву высокоомной аномалии однозначно восстановить не удается из-за физических основ метода. На разрезах УЭС в зависимости от параметров моделей могут проявляться артефакты, которые связаны с особенностями математического аппарата «гладкого» (устойчивого) решения обратной задачи. В целом, данный метод подходит для картирования многолетнемерзлых пород и таликов как в условиях их естественного залегания (даже внутри сложно построенных сред), так И при ИХ мониторинге В условиях существующей И развивающейся инфраструктуры (строительство и эксплуатация объектов различного назначения на территории распространения вечной мерзлоты).



Рисунок 39 – Вторая группа моделей ВЧР с островными ММП зоной растепления и низкоомными проводящими аномалиями



Рисунок 40 - Вторая группа моделей. Модельные разрезы кажущихся сопротивлений для 4-х электродной установки Шлюмберже



Рисунок 41 - Вторая группа моделей. Модельные разрезы кажущихся сопротивлений для 3-х электродной комбинированной установки



Рисунок 42 – Вторая группа моделей. Разрезы удельных сопротивлений, полученные в результате инверсии данных: для исходной модели – слева; для модели с ММП и трубами - справа

65

4. Проектирование комплекса методов малоглубинной геофизики в различных физико-геологических условиях

Проектирование методики исследований – начальная и базовая часть выполнения любого геофизического проекта. В связи с широким кругом стоящих перед малоглубинной геофизикой задач и их сложностью необходимо применение максимально эффективных методик и методов, которые позволят достичь поставленных целей и получить достоверную геолого-геофизическую информацию при минимальных рисках и оптимальных затратах на производство работ.

Нами разработана схема выбора методики, показывающая различные этапы, которые должны учитываться перед началом работ и во время их проведения для достижения оптимального результата. В основу схемы положен опыт работ лаборатории инженерной геофизики на различных объектах с применением наиболее широкого комплекса доступных методов, в том числе и результаты, представленные в данной работе. Схема представлена на рисунке 43.

Рассмотрим подробнее составляющие схемы.

На этапе 1 при формировании комплекса исследований необходимо вначале определить и конкретизировать конечные цели и задачи работ. Это могут быть: восстановление И прогноз динамических свойств грунтов; картирование горизонтов, связанных с уровнем грунтовых вод или подошвой зоны малых скоростей (началом пород осадочного чехла); поиск И выделение аномалиеобразующих объектов различного масштаба в геофизических полях.

Конкретные задачи, стоящие перед работами, требуемые виды отчетных материалов во многом определяют возможности применения различных методов малоглубинной геофизики.



Рисунок 43 - Блок-схема методики проектирования исследований

Следует отметить, что на данном этапе, в зависимости от требования детальности и масштабов отчетных карт закладываются основы выбора типа съемки (одиночные профильные работы или площадные) и ее основные параметры.

На следующем этапе (этап 2) проводится сбор сведений об общем геологическом строении района работ (подэтап 2.1) (априорная геологическая информация, литология, сведения о бурении и изысканиях прошлых лет). В случае необходимости исследования опасных зон, оконтуривания аномалий, изучения ОГП необходимо параллельно с подэтапом 2.1 собрать сведения о данных процессах, их природе и физико-геологических свойствах (подэтап 2.2). Такой подход позволяет выявить все особенности, детали и характерные признаки, которые оказывают влияние на структуру геофизических полей.

Обобщив информацию, собранную на предыдущем этапе, необходимо построить общую (фоновую, вмещающую) модель и модель с предполагаемыми аномалиями (этап 3). Построение данной модели необходимо для первоначального этапа отбора и апробации методов, которые рекомендуются к применению для решения поставленных целей и задач. Основная задача данного этапа – геометризация модели.

Следующим этапом (<u>этап 4</u>) необходимо наполнить структурную модель различными физическими свойствами (в зависимости от геологии и физических свойств пород или аномалий): скоростями и плотностями, удельными электрическими сопротивлениями, пористостью, проводимостью и так далее.

По набору структурных моделей, наделенных физическими свойствами, проводится оценка возможностей выбранных методов (этап 5). Данная процедура происходит на основе решения прямой задачи геофизики для каждого из выбранных методов средствами математического моделирования (этап 6). Далее оценивается вид, характер и изменчивость соответствующего геофизического поля. При этом особое внимание необходимо уделить заданию граничных условий. Рекомендуется выполнять моделирование для целого набора моделей с перебором их латеральных и вертикальных размеров, соответствующих априорным представлениям об исследуемом объекте. Далее оценивается эффективность метода (этап 7) на основе решения обратной задачи. Критерием эффективности выступают минимизация погрешности восстановления фоновой модели и ее аномальной части при максимальном контрасте физических свойств, формирующих геофизическое поле. Также исследуется устойчивость методики к внешним шумам и неполноте данных. По результатам данного этапа формируется список методов, которые целесообразно применять во время исследований.

Исходя из оценки эффективности, на этапе 8 выбираются параметры систем наблюдения для каждого метода (длина активной расстановки, шаг по ПП и ПВ, тип волн, шаг по электродам, тип электроразведочной установки, плотность съемки и т.д.). Стоит отметить, что на этапе опытно-методических полевых работ (OMP) данные параметры могут быть скорректированы с учетом особенностей местности.

Выбранные методы реализуются в полевых условиях (этап 9). Полученные материалы обрабатываются и интерпретируются (этап 10). На каждом этапе работ отмечается степень совпаления ланных c априорными модельными представлениями, в случае расхождения - итерационно проводится корректировка моделей для отображения зарегистрированных эффектов и аномалий. Для каждого выбранных методов проводится оценка достоверности на ИЗ основе моделирования, полевых результатов и комплексной интерпретации.

Таким образом, еще до момента мобилизации полевой партии, проведения работ и камеральной части, можно понять и проанализировать основные нюансы и сложности проекта. Это позволяет построить и скорректировать геологические модели, детально изучить интересующие объекты, заверить особо опасные участи и зоны, минимизировать временные и финансовые затраты на выполнение проекта.

Хотелось бы еще раз заметить, что, несмотря на наличие и использование результатов данной методики, для минимизации рисков, на подготовительном этапе (перед проведением полноценных полевых работ) необходимо проводить ОМР. Это обусловлено тем, что в некоторых ситуация невозможно полноценно учесть все тонкости и нюансы проекта. Даже при самых верных модельных расчетах особенности строения ВЧР, наличие помех техногенного характера, геометрическая ограниченность площадки работ и многое другое могут помещать

зарегистрировать кондиционные данных, без которых, в свою очередь, невозможно построить достоверную геолого-геофизическую модель.

По нашему опыту на этапе «быстрой разведки» (ОМР) основное внимание следует уделить электротомографии, которая позволяет в короткие сроки с минимальными временными и финансовыми затратами провести первоначальную разведку площадки работ и сделать предварительную оценку эффективности различных методов.

В главе 5 представлены этапы реализации данной методики на разных целевых объектах в различных условиях местности.

5. Практическое применение методов малоглубинной геофизики в различных физико-геологических условиях и комплексирование данных

В настоящей главе приведены примеры выполненных лабораторией инженерной геофизики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина работ при непосредственном участии и под руководством автора. Демонстрируется применение методики, разработанной в главе 4.

5.1.Изучение карстовых процессов (обследование карстующихся толщ и воронок) на территории Нижегородской и Калужской областей

<u>Цели и задачи</u>

Изучение карстовых процессов и оценка карстовой опасности – одно из самых востребованных направлений в малоглубинной разведке. Основными целями и задачами исследований было получение комплекса данных различных методов на открытых, задернованных и бронированных карстовых формах, оценка их проявления и влияния на формирования волновых полей, поиск карстоопасных участков и разуплотненных зон.

Описание объектов и районов работ

В данной главе рассмотрены результаты проведения изысканий на территории Нижегородской области в Навашинском и Арзамасском районах и работ в Калужской области, которые проводились на территории учебной базы МГУ имени М.В. Ломоносова «Александровка».

Нижегородская область

Первым объектом исследования стала карстующаяся толща в районе села Монаково, представленная отложениями пермской системы, состоящая, в основном из гипсов и доломитов с глубиной залегания кровли от 35 до 55 метров.

Вторым объектом изучения был выбран современный карстовый провал в районе деревни Белозерье. Провал образовался в конце августа 2012 года в результате обрушения свода подземной (гипсовой) пещеры, его обследование методами электротомографии и сейсморазведки было выполнено в начале сентября 2012.

Калужская область

Работы проводились на плато неподалеку от стрелки рек Угра и воря. Карбонатная толща залегает на глубине около 17 метров и перекрыта моренными отложениями.

Особенности объектов

К особенностям объектов, связанных с ОГП такого рода, следует относить: карстовые полости и воронки; пещеры; зоны разуплотнения, заполненные суффозионным материалом. Физико-геологические особенности этих объектов и формы их проявления на геофизических разрезах подробно приведены в главе 2.1.

<u>Модели</u>

Проведенное моделирование, описанное в главе 3.1 для электротомографии и сейсморазведки, показывает, что совместное применение двух методов необходимо для изучения карстовых процессов на средних и больших глубинах (от 40 до 150 метров). Для изучения лишь приповерхностных процессов достаточно использования электротомографии. Это обусловлено паданием разрешающей способности в ЭТ с глубиной и невозможностью однозначного выделения подошвы карстовой полости/воронки. Поэтому на глубинных объектах необходимо проведение работ МОГТ.

Карстующаяся толща в районе села Монаково

Методика проведения полевых работ

Основными методами (в соответствии с таблицей 3) исследования послужили сейсморазведка МОГТ 2D и МПВ, ВСП и ЭТ по размеченной сетке профилей.

Сейсморазведочные изыскания выполнены станцией «ТЕЛСС-3». Работы проводились по методике 52-кратного перекрытия при регистрации данных на расстановку, состоящую из 104 каналов. Средняя длина профиля составила около 800 метров. Тип расстановки: фланговая, переходящая на центральную. Для обеспечения высокой кратности и детальности шаг по ПП и ПВ был выбран 2 метра, регистрировались поперечные SH-волны.
Работы методом ВСП выполнены в скважине глубиной 53 метра для построения скоростной модели среды и увязки с сейсмическими данными МОГТ. При проведении работ использовалась классическая система наблюдений: зонд опускается в скважину на максимальную глубину, прижимается к стенке скважины. На удалении 2 метра от устья производится возбуждение колебаний кувалдой по чугунному основанию (Р- и SH-воздействия). После этого зонд поднимается на 1 м вверх и возбуждения производятся повторно. Таким образом, были получены продольная и поперечная компоненты волнового поля.

Электротомографические работы проведены С использованием комбинированной 3-х электродной установки (AMN + MNB), которая обеспечивает максимальную глубинность и 4-х электродной установки Шлюмберже, позволяющей в условиях трехмерных неоднородностей получать кажущегося сопротивления. устойчивые значения Измерения выполнены многоканальной многоэлектродной станцией «Syscal Pro Switch 72». Шаг электродов по профилю 5 метров, длина активной расстановки 355 метров, максимальный разнос 172.5 метра. Далее расстановка передвигалась вдоль линии профиля с перекрытием не менее 50%. Таким образом, глубинность исследований составила до 75 метров.

Обработка и интерпретация данных

Обработка данных МПВ, МОГТ и ЭТ проходила по алгоритмам, описанных в предыдущих главах с учетом особенностей геологии данного объекта.

Обработка данных ВСП выполнялась в программном обеспечении «3С-Interact» (ООО "НПП ГЕТЭК") и состояла из следующих процедур:

- 1. Ввод геометрии наблюдений;
- 2. Ввод статических поправок;
- 3. Автоматическая ориентация компонент волнового поля;
- 4. Пикирование первых вступлений.

В результате обработки были получены глубинно-скоростные модели. Для проведения комплексной интерпретации построены: временные и глубинные (с учетом данных ВСП) сейсмические разрезы и разрезы удельных сопротивлений.

<u>Интерпретация данных МОГТ</u> состояла из двух этапов. На первом этапе проводился анализ волнового поля, выбор основных отражающих границ, их стратиграфическая привязка, корреляция горизонтов по временным разрезам и увязка по площади. Прослеженные по временным разрезам горизонты приурочены к следующим отложениям:

Hor1 – к кровле плотных глин в кровле верхней пачки нижне-уржумского подьяруса (P2ur₁²);

Hor2 – к кровле плотных карбонатно-сульфатных пород в кровле отложений сакмарско-казанского яруса (P1s-P2kz).

На втором этапе проводилось построение карт изохрон и структурных карт. Для стратиграфической привязки отражающих горизонтов и оценки качества обработки сейсмических данных были использованы обработанные нами данные ВСП в скважине. Используя зависимости глубина-время, глубины целевых горизонтов были переведены во временную область и проассоциированы с отражающими горизонтами. На всех временных разрезах отображены стратиграфические отбивки в скважинах, переведенные во временной масштаб. Рисунок 44 демонстрирует результаты обработки интерпретации.

Отражающий горизонт Hor1 - это интенсивное отражение положительного знака, которое практически не изменяется по латерали. Поверхность данного горизонта является практически горизонтальной. Это подтверждается стратиграфическими отбивками в скважинах. Поэтому структурная карта по поверхности плотных глин в кровле верхней пачки нижне-уржумского подьяруса не приводится.

Отражающий горизонт Hor2 связан с кровлей плотных карбонатносульфатных пород в отложениях сакмарско-казанского яруса. Это интенсивное отражение положительного знака, связанное с увеличением скорости на границе переслаивающейся толщи терригенно-карбонатной пачки и плотных карбонатносульфатных пород. Прослеживание его довольно уверенное. На рисунке 45 показана карта изохрон по поверхности горизонта Hor2.



Т, мс

Рисунок 44 – Временной разрез поперечных волн с результатами интерпретации



Рисунок 45 – Карта изохрон по отражающему горизонту Hor2. Красным выделены зоны потери корреляции

Структурная карта была построена при помощи пересчета времени в глубины по данным ВСП (рисунок 46), коэффициент корреляции 0.93. Структурная карта поверхности плотных карбонатно-сульфатных пород приведена на рисунке 47. На структурной карте красным цветом выделены области, в которых затруднена корреляция целевых горизонтов из-за ухудшения качества волновой картины.



Рисунок 46 - График зависимости значений абсолютных глубин от t0 для кровли плотных карбонатно-сульфатных пород (P1s-P2kz)

Структурный план поверхности плотных карбонатно-сульфатных пород характеризуется моноклинальным залеганием с погружением с севера на юг и осложненным некоторым количеством положительных и отрицательных структур. Перепад абсолютных отметок горизонта по площадке составляет от 48 м до 57 м.

По данным МОГТ на объекте зоны возможного наличия карста не выделяются.



Рисунок 47 - Структурная карта по кровле плотных карбонатно-сульфатных пород (P1s-P2kz). Красным выделены зоны потери корреляции, связанные с ухудшением качества регистрируемого сигнала

МΠВ областей Интерпретация данных подразумевала выделение пониженных скоростей по скоростным моделям среды (пример на рисунке 48) в карбонатно-сульфатной толще, которая может быть c связана зонами разуплотнения или формирования карста. В целом, разрез выдержан по скоростям. Скорости варьируются в диапазоне от 200 до 2500 м/с, что вполне соответствует для пород данного литотипа. Аномальные зоны по данному разрезу не выделяются. Интерпретация данных ЭТ основывалась на выделении слоев и аномальных зон (зон пониженного сопротивления) в карбонатно-сульфатных породах. По разрезу можно выделить четыре слоя (рисунок 49): первый слой обладает довольно высокими сопротивлениями (порядка 200 - 300 Ом м), который относится к пескам, находящимся в приповерхностном слое. Далее следует пласт с удельным сопротивлением около 20 - 50 Ом м, который относится к глинистым породам. Также в карбонатно-сульфатных породах выделяются (и на разрезах, и на 3Dмоделях (рисунок 50)) отдельные блоки повышенного сопротивления, относящиеся к гипсу или плотным доломитам. Данные блоки имеют четко выраженные границы

и кровлю. На данных разрезах отсутствуют тела, имеющие аномальное сопротивления и формы, которые можно было бы отнести к карстово-опасным участкам. Изменения сопротивлений в карбонатно-сульфатной пачке связаны с замещением сульфатов на карбонаты.



Рисунок 48 – Скоростная модель среды (поперечные волны) по профилю



Рисунок 49 - Разрез удельных электрических сопротивлений по профилю



Рисунок 50 – Карты-слайсы распределения УЭС по заданным глубинам и куб УЭС

Комплексная интерпретация данных

Комплексная интерпретация геофизических данных заключалась В сопоставлении аномалий, найденных по отдельным методам, между собой и выделении общих аномалий. Для совместного анализа результатов интерпретации отдельных методов были составлены графические планшеты по каждому профилю. На каждом графическом планшете приведены: временной разрез МОГТ, скоростная модель среды по МПВ, разрез удельных электрических сопротивлений по методу ЭТ, а также геологический разрез среды, являющийся результатом совместной интерпретации перечисленных методов. В соответствии с физикогеологическими предпосылками карстовые зоны (или карстующиеся толщи) должны обладать следующими признаками: структурные провалы, потери корреляций ответственных горизонтов, зоны пониженных сопротивлений и скоростей. Таким образом, интерпретируя данные совместно, возможно более достоверное выделение опасных участков, которые в дальнейшем необходимо заверять бурением.

Комплексный планшет по профилю показан на рисунке 51. По разрезу МОГТ кровля карбонатно-сульфатной толщи четко прослеживается по всему разрезу. Аномальные зоны, области потери корреляции и другие признаки, которые могут быть связаны с карстом не выделяются. В районе ПК 310 - 390 наблюдается понижение амплитуд данного отражения. Данная область не вызывает опасения, так как по данным КМПВ скорости на данных пикетах высокие (порядка 2200 - 2500 м/с), а по результатам ЭТ (разрезу удельных сопротивлений) данная зона обладает средним сопротивлением около 380 - 500 Ом⁻м.

По данным КМПВ выделяется зона с небольшим понижением скоростей: ПК 540 - 630. Скорости в данной области порядка 1500 м/с. По данным ЭТ на ПК 20 - 120, ПК 220 - 275, ПК 320 - 480 и ПК 540 - 630 выделяются участки профиля с понижением удельного сопротивления до значений порядка 400 Ом м. Данные участки также не вызывают опасения, так как по данным МОГТ нет потери корреляции и нарушения осей синфазности в данных областях.

Геофизические данные по всему профилю хорошо выдержаны по характеристикам. Зон, вызывающих опасения, не выявлено, признаков карстовой опасности не обнаружено.

Изучение карстующихся толщ данной методикой доказывает оправданность ее применения на ответственных объектах. Использование одного из методов может дать неоднозначный результат в силу геологического разнообразия строения ВЧР и процессов, происходивших во время ее формирования. Комплекс методов позволяет эффективно выделять потенциально опасные участки и верифицировать их по данным других методов, что может значительно снизить временные и финансовые затраты при проведении инженерных изысканий.



Рисунок 51 – Комплексный инженерно-геофизический планшет

Карстовый провал в Арзамасском районе (окрестности деревни Белозерье)

Описание объекта и района работ

Карстовые проявления широко распространены в данном районе. Их можно проследить в виде отдельных воронок или групп, в виде подземных карстовых

пещер, сформированных целыми подземными реками или в виде небольших озер округлой или овальной форм. Карстово-суффозионным процессам подвержены гипсово-доломитовые толщи, покрывающие практически всю территорию района.

Объектом исследования стал современный карстовый провал диаметром около 70 метров и амплитудой около 35, образовавшийся на центральной улице деревни (рисунок 52). Основной задачей исследования были: определение подземного местоположения очага воронки и выделение потенциально опасных участков на территориях, примыкающих к провалу.



Рисунок 52 – Карстовый провал

Методика проведения полевых работ

В силу довольно крутопадающего рельефа в центре воронки и отвесных бортов по краям основными исследованиями стали электротомографии и МПВ. По априорным данным карстующаяся толща (гипсовые пласты) располагается на глубине около 50 метров. Исходя из этого, шаг по электродам был выбран 5 метров, количество электродов – 72. Для детального изучения окрестностей провала профиль составлялся из трех раскладок, центр первой из которых располагался на удалении около 170 метров от воронки. Таким образом, уже на расстоянии 170 метров от центра провала первая точка записи была сформирована путем сбора информации с большого количества разносов. Из-за довольно плотной застройки деревни и наличия обрывистых краев воронки профили располагались по открытым участкам между жилыми домами и обвалившимися краям зоны провала. Подробная схема расположения профилей и застройки изображена на рисунке 53.

Профиль МПВ был практически совмещен с профилем № 1 ЭТ и затрагивал часть профиля № 3.



Рисунок 53 - Схема расположения профилей

Обработка и интерпретация данных

Обработка данных ЭТ и МПВ происходила по стандартным схемам, описанным в главах 5.2 и 5.3. Особое внимание при построении изображений было уделено учету кривизны профилей. Для всех точек физических наблюдений были отсняты планово-высотные отметки. На основе координат были рассчитаны соответствующие поправки и введены в геометрию систем наблюдений.

В результате обработки были получены разрезы удельных сопротивлений по профилям и глубинно-скоростная модель. Результат обработки данных приведен на рисунках 54 - 55.



Рисунок 54 – Разрез удельных сопротивлений по профилю № 1

По разрезу УЭС видно, что подземный центр формирования карста несколько смещен относительно воронки на поверхности. Кровля карстующихся гипсов находится на глубине порядка 45 метров, карст характеризуется пониженными сопротивлениями, что говорит о замещении гипсов суффозионной смесью, состоящей их суглинков и песков, слагающих толщу над ними. На ПК 80 – 130 метров (глубина 60 метров) выделяется зона понижения сопротивления гипсово-доломитного пласта основания, которая указывает на формирование нового карста. Из-за крутого рельефа модель МПВ имеет максимальную глубинность только в центре профиля. Тем не менее, по модели видно, что в районе ПК 100 – 140 метров расположена зона понижения скоростей. Она относится к центру формирования карста и подтверждается данными ЭТ.



Рисунок 55 – Глубинно-скоростная модель среды по данным МПВ

Заверочное бурение первого профиля ЭТ подтверждает наличие разуплотненных зон, описанных выше.

Изучение карбонатной толщи в Калужской области

Описание объекта и района работ

Объектом исследования стала карбонатная толща, залегающая на глубине около 17 метров и перекрытая моренными отложениями. Основной задачей исследования было сопоставление данных ЭТ, МПВ и МОГТ при изучении данного разреза.

Методика проведения полевых работ

Методика проведения работ аналогична первым двум примерам. На рисунке 56 представлена схема расположения профиля и разведочных скважин.



Рисунок 56 – Схема расположения профиля и скважин

Обработка и интерпретация данных

Обработка данных ЭТ, МПВ и МОГТ происходила по стандартным схемам, описанным в главах 5.2 и 5.3. В результате данного этапа были получены разрезы УЭС, скоростные модели и сейсмические разрезы. Данные результаты представлены на рисунках 57 - 59.



Рисунок 57 – Разрез удельных сопротивлений по профилю ЭТ на плато



Рисунок 58 – Скоростная модель МПВ, совмещенная с разрезом МОГТ по профилю на плато



Рисунок 59 – Временной сейсмический разрез МОГТ по профилю на плато



Рисунок 60 – Результат комплексирования данных ЭТ и МОГТ по профилю на плато

В результате комплексирования данных и интерпретации была получена (с привлечением литологии по скважинам) геологическая модель (рисунок 60). На всех результатах отчетливо выделяется кровля карбонатной толщи. Карбонатная толща имеет довольно неоднородное строение. Об этом свидетельствует распределение скоростей по данным МПВ в начале профиля, а также изменение яркости и монотонности границы по данным МОГТ. Также стоит отметить, что, исходя из перечисленного выше, кровля карбонатов довольно шероховатая. Тем не менее, она довольно точно выделяется на всех методах.

Дополнительно на полученных разрезах выделяются промежуточные границы (пески, суглинки и глины), которые подтверждаются бурением.

Таким образом, видно, что методы сейсморазведки и электротомографии дополняют друг друга и позволяют с высокой степенью достоверности даже в сложных поверхностных условиях проводить изыскания по изучению карстоопасности территории и строить инженерно-геофизические и геологические модели/разрезы на стадиях составления проектной документации и принятия мер по противокарствой защите.

5.2. Изучение оползневых и обвальных процессов (оползневой склон в Сабурово и скально-обвальные борта гранодиоритового карьера)

Цели и задачи

Целью проведения работ было изучение строения оползневого массива и бортов карьера. Основными задачами являлись оконтуривание (определение латеральных размеров и мощностей) аномальных объектов, выделение границы скольжения или тектонических нарушений.

Общее описание объектов

Оползневой склон в Сабурово

Объект расположен рядом с железнодорожным мостом через реку Москва в районе Сабурово. Верхняя часть оползня начинается непосредственно у гражданских застроек, нижняя часть доходит практически до уреза воды. Оползень расположен вблизи жилой застройки. Склон имеет довольно крутой рельеф (около 45 градусов), поверхность осложнена кустарником и деревьями. Оползень активно проявляет себя последние несколько лет, о чем свидетельствуют массивы свежего перемятого грунта у его подножия и более древние «языки», заходящие в реку. Наибольшую активность оползневое тело проявляет в весенний и осенний период, когда горные породы, слагающие склон, накапливают наибольшее количество атмосферных осадков. Предполагаемая мощность оползня около 15 – 20 метров.

Гранодиоритовый карьер

Объект расположен на Дальнем Востоке. Борта карьера сложены гранодиоритами. Верхние бермы покрыты густой таежной растительностью. Мощность коры выветривания около 10 – 15 метров. Карьер пересекают системы локальных трещин, вдоль которых до начала открытой добычи протекал ручей, впадающий в реку у подножья.

Системы дизъюнктивных нарушений создают отдельные блоки в стенках карьера. Таким образом, при разработке нижних берм (при формировании склона большой крутизны) создается опасность вывала вышележащих горных пород, слагающих отдельные блоки. Данный процесс связан с нарушением естественного подпора в основаниях борта.

Особенности объектов

Оползневые процессы в районе Сабурово. Ключевой особенностью данного оползня является то, что он современный и находится на поверхности, это значит, что его слагают породы одного литологического состава. Следовательно, тело оползня является однородным, и оконтурить его можно, лишь установив пространственное положение границы скольжения.

Обвальные процессы на карьере. Основными особенностями на изучаемом гранодиоритовом карьере являются: системы трещин и отдельные блоки с изменением физических свойств горных пород, которые должны хорошо выделяться по данным геофизики.

<u>Модели</u>

Моделирование данных, аналогичное описанному для данного рода ОГП в главе № 3 настоящей работы, доказывает эффективность применения метода электротомографии в настоящих условиях.

Возможности методов

В соответствии с таблицей 3 (приведенной в главе 2 данной работы) основными методами для решения данного рода задач были выбраны сейсморазведка и электротомография. Провести сейсморазведку на объектах было сложно по нескольким причинам: довольно сильно перемятая рыхлая верхняя часть разреза (что предполагает отсутствие коррелируемых границ по МПВ и МОГТ), наличие крутого рельефа и большое количество техногенных помех. Окончательно для проведения работ был выбран метод ЭТ.

<u>Полевые работы</u>

Работы проводились с использованием многоканальной многоэлектродной электроразведочной станции Syscal Pro 72.

В связи с плотной застройкой вокруг оползневого склона (гаражный кооператив, школа и детский сад) были намечены три профиля. Расположение профилей на объекте было выбрано не случайно. Поскольку тело оползня довольно локализовано (имеет продолговатую форму вдоль склона), а края близко прилегают к густому кустарнику, то проложить хотя бы один профиль перпендикулярно склону не было возможности. Тем не менее, для решения поставленных задач и контроля качества данных во время проведения работ по характерным взаимным точкам (точкам пересечения профилей) была выбрана соответствующая схема наблюдений (рисунок 61). Данная схема позволила оконтурить объект и изучить его строение. Буква и первая цифра на схеме обозначают номер профиля, вторая и третья цифры – номера пикетов.

На карьере работы проводились по открытым бермам на разных высотных уровнях.



Рисунок 61 - Схема расположения профилей электротомографии

Стоит отметить, что при изучении оползней необходимо минимум 3 профиля. Крайние профиля оконтуривают объект в плане и дают первоначальные сведения о нем, центральный профиль – помогает выделить неоднородности внутри него. В случае изменения строения в центре оползневого тела (впрочем, как и любой аномалии) следует проводить доразведку, сгущая сеть профилей.

На объектах использовались два типа электроразведочных установок: 3-х электродная комбинированная (AMN+MNB) и 4-х электродная (AMNB). «Первая установка обеспечивает максимальную глубинность и детальность электротомографических исследований, вторая – позволяет получать устойчивые значения КС в условиях трехмерных неоднородностей». Таким образом, были получены данные хорошего качества и детальности.

Обработка и интерпретация данных ЭТ

В общем виде обработка данных метода состоит из следующих этапов:

 Подготовка данных электротомографии в формат программы x2ipi (Геологический факультет МГУ);

- Пересчет измеренного напряжения в кажущееся сопротивление, на основе измеренного значения разности потенциалов (*dU*), значения тока (*I*) и коэффициента расстановки (*k*);
- Объединение данных для различных расстановок в один профиль (при необходимости (отработка длинного профиля с перекладками));
- Построение псевдоразрезов КС;
- Отбраковка данных. При этом удаляются ненадежные измерения с сигналами менее 0.1 мВ (сигналы, сопоставимые по амплитуде с аппаратурными шумами станции);
- Учет рельефа в псевдоразрезах КС (построение псевдоразрезов КС от поверхности (уровня рельефа)) [62], которая учитывает разнос *AB*:

$$H_{\mathcal{P}\phi\phi} = \frac{AB/2}{2.63}$$

- Подготовка входных файлов данных для программы двумерной инверсии;
- Инверсия данных электротомографии (программный комплекс «Res2dinv» (Geotomo, Малайзия)) в автоматическом режиме в рамках «гладких» моделей [64, 65] для получения разрезов удельного электрического сопротивления. Использование моделей с плавным изменением удельного сопротивления является стандартным способом регуляризации алгоритмов инверсии и позволяет без учета априорной информации получать удовлетворительные результаты инверсии данных электротомографии.

Оползневой склон в Сабурово

После обработки данных по представленному графу на оползневом участке в Сабурово были получены разрезы удельных сопротивлений, один из которых приведен на рисунке 62 (соответствует профилю № 2, который отмечен голубым цветом на рисунке 61). Следующим этапом камеральных работ является интерпретация, в результате которой выделяются геологические границы или аномальные зоны.



Рисунок 62 – Разрез удельных сопротивлений по профилю № 2 (красным пунктиром показана граница скольжения оползневого тела)

Ha разрезе отчетливо прослеживается граница скольжения данном оползневого массива, она обозначена на рисунке красной пунктирной линией. Данная граница соответствует кровле глин. Так как глины являются водоупором, грунтовые воды скапливаются на ИХ поверхности. В результате слабосцементированные разуплотненные вышележащие пласты песка, супеси и суглинка постепенно движутся вниз по склону. Мощность оползня составляет около 10 – 12 метров.

Гранодиоритовый карьер

Аналогичным образом были получены разрезы по бортам карьера на Дальнем Востоке. Один из разрезов с результатами интерпретации приведен на рисунке 63.

На этапе интерпретации были выделены аномальные зоны понижения сопротивления, соответствующие отдельным блокам с изменением физических свойств, а также трещины, которые трассируются от профиля к профилю.

93



Рисунок 63 – Разрез УЭС вдоль борта карьера

Выводы и рекомендации

Проведение исследований показывает, что применение электротомографии позволяет уверенно решать данного рода задачи.

Для детального изучения строения оползневых и обвальных тел рекомендуется:

- дополнить сеть профилей до каркасной основы трехмерной модели аномалиеобразуещего тела;
- построить 3D-модель;
- провести мониторинг.

Проведение мониторинга по исходной сетке профилей позволит проследить динамику ОГП и активность склона или бортов.

В основу проектирования мониторинговой сети профилей должен быть заложен следующий принцип:

- максимальная повторяемость положения электроразведочных и сейсморазведочных профилей для возможности комплексирования методов;
- возможность создания регулярной каркасной сети для построения трехмерной модели;
- соблюдение безопасных расстояний от объектов инфраструктуры;

- минимальная допустимая плотность профилей для оптимизации сроков без потери качества и достоверности построений геологических моделей;
- обеспечение необходимой глубинности исследований (с учетом особенностей застройки района работ);
- возможность проведения одновременной отработки профилей различными методами при соблюдении высокой помехоустойчивости.

Предварительная сеть профилей формируется на основе критериев построения модели: очерчиваются крайние профиля и увязываются точки их пересечения по наличию информации на требующихся глубинах (теоретический расчет), при этом по возможности учитываются условия местности. Далее проводятся полевые работы на одном из выбранных профилей, по результатам экспресс-обработки уточняются фактические параметры сети и методики наблюдений:

- практическая глубинность и анализ необходимого набора удалений;
- сложность геофизического поля (особенности строения) и анализ плотности измерений;
- локализация объекта исследований.

Сеть профилей по возможности формируется ортогональной, что необходимо в дальнейшем для равномерного покрытия (создания) псевдо 3D-объектов или моделей. Данное требование может нарушаться при ограниченной возможности проложения профилей из-за условий местности. В таком случае на первый план выходят обеспечение заданной глубинности исследований и качество данных.

В случае получения слабо разрешенной картины в процессе проведения работ сеть профилей сгущается в проблемных областях для установления причин невыраженности сигнала. Устанавливаются тренды поля; сгущение проводится в объеме, необходимом для получения однозначности выводов о природе неблагоприятных для исследований данным методом факторов. Таким образом, оптимизация сети профилей происходит итеративно, не только на этапе проектирования, но и при выполнении полевых работ.

Данный подход к оптимизации сети наблюдений позволяет обеспечить максимальную геологическую эффективность исследований при оптимизации затрат на производство исследований.

Пример такого рода мониторинговой сети наблюдений приведен в главе 5.3 настоящей работы.

5.3.Изучение многолетнемерзлых пород комплексом методов на примере кустовых площадок Западной Сибири

<u>Цели и задачи</u>

Актуальность изучения и выделения зон вечной мерзлоты и растепления подробно описана в главе 2.3. В данной главе будет рассмотрено изучение островных типов ММП и зон растепления, связанных с работой нефтегазовых предприятий на примере кустовых площадок нескольких месторождений Западной Сибири, расположенных на территории полуострова Ямал.

Известно, что в ходе работы добывающих скважин и газовых шлейфов происходит повышение температуры пород вокруг скважины и пород ВЧР вдоль линии трубопровода. В зависимости от свойств продуктивного пласта, температура газа или нефти на устье скважины может колебаться от 10 до 40 градусов Цельсия. Таким образом, происходит изменение температурного режима мерзлых грунтов, в результате которого постепенно образуются талики.

<u>Описание объекта</u>

Объектом исследования являются процессы термокарста на территории кустовых площадок нефтегазоконденсатного месторождения. Месторождение расположено в южной части Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа в 250 км от г. Новый Уренгой.

«Высокоширотное расположение территории Ямало-Ненецкого автономного округа, небольшой приток солнечной радиации, значительная удаленность от

теплых воздушных и водных масс Атлантического и Тихого океанов, а также равнинный рельеф определяют резкую континентальность и суровость климата.

На формирование климата влияют многолетняя мерзлота, близость холодного Карского моря, глубоко впадающие в сушу морские заливы, обилие болот, озер и рек. Продолжительная зима, короткое прохладное лето, сильные ветра, незначительная мощность снежного покрова - все это способствует промерзанию почвы на большую глубину. Зима холодная, длится около 8 месяцев. Минимальные температуры опускаются ниже 60 градусов Цельсия. Лето короткое, умеренно прохладное».

Особенности объекта

Основными особенностями вмещающего разреза на территории кустовых площадок являются сами зоны растепления и вечной мерзлоты, физикогеологические параметры которых подробно описаны в 2.3 настоящей работы.

Дополнительно вызывать аномалии на волновых полях могут подземные коммуникации и армированные бетонные основания различных сооружений.

<u>Модели</u>

Примеры моделирования данных различных методов для решения такого рода задач описаны в главе 3.3. Моделирование волновых полей и решение обратной задачи доказывает эффективность выбранных методов для геологогеофизического изучения мерзлых пород и таликов, как в естественных условиях залегания, так и на действующих объектах НГК.

Возможности методов

В соответствии с таблицей 3 (приведенной в главе 2 данной работы), основными методами для решения данного рода задач были выбраны сейсморазведка и электротомография. В условиях ограниченности геометрических размеров кустовых площадок основной задачей электротомографии является выделение кровли зоны растепления или ММП, локализация их латеральных размеров и построение карт УЭС для малых глубин. Задачами сейсморазведки были выделение кровли (по возможности, зависит от глубины залегания и напрямую связана с вертикальной разрешающей способностью) и подошвы, локализация латеральных размеров аномалий, построение глубинно-скоростных моделей и карт.

Таким образом, был подобран комплекс методов и методика, позволяющие детально изучить интересующий объект и картировать его различные свойства.

Методика проведения полевых работ

Для оконтуривания и локализации очагов растепления были проведены геофизические работы на нескольких кустовых площадках. На одном из месторождений были выполнены только электротомографические исследования, на другом – комплекс методов, включающий в себя сейсморазведку МОГТ и МПВ и электротомографию.

На первом этапе с учетом зимних условий и обвязки газопроводами кустовых площадок для наблюдений была спроектирована и размечена с помощью геодезии система профилей, по которым в дальнейшем проводились исследования. Методика проектирования и редактирования сетки профилей подробно описана в конце главы 5.2. Пример «классического» расположения профилей (размеры объекта позволяют создать ортогональную систему профилей) на площадке №1 изображен на рисунке 64. Пример использования более сложной системы наблюдений (для обеспечения необходимой глубинности и уплотнения сети профилей в проблемной области) представлен на рисунке 65.

В первом случае (рисунок 64) первоначально были проведены исследования методом ЭТ по внешним профилям (оконтуривание периметра). На основе анализа данных экспресс-обработки были выделены первоначальные контуры зоны растепления. Далее были выполнены работы по нескольким диагональным профилям для уточнения границ локализации таликов. После данного этапа была проведена сейсморазведка по заданным профилям ЭТ с уплотнением сети в местах обнаружения растепленных пород.

Во втором случае (рисунок 65) методика проектирования работ была схожая, но в силу небольших размеров кустовой площадки было добавлено большое количество диагональных профилей ЭТ, которые позволили обеспечить большую глубинность исследований и создать более равномерную сеть наблюдений, что является немаловажным фактором при построении псевдо 3D-моделей. Так же, как и в предыдущем случае, профиля сейсморазведки находились в областях наличия растепленных пород.



Рисунок 64 – Схема расположения профилей при изучении ММП и зон растепления



Рисунок 65 – Схема расположения профилей при изучении ММП и зон растепления в сложных условиях

Таким образом, оба примера проектирования сетки профилей (системы наблюдений) показывают различные этапы методики проведения работ, интерактивное (гибкое) изменение параметров которых в режиме реального времени позволяют повысить качество данных и минимизировать временные и финансовые расходы на проект.

При проведении работ использовалась телеметрическая сейсморазведочная станция «ТЕЛСС-3» и электроразведочная многоканальная и многоэлектродная станция «Syscal Pro Switch 96». Сейсморазведочные исследования проведены методом многократных перекрытий, что позволяет одновременно получить достаточный набор данных и для КМПВ, и для МОГТ на SH-волнах; электроразведочные – с использованием двух типов установок: 3-х электродная комбинированная (AMN + MNB) и 4-х электродная (AMNB). Шаг по ПВ и ПП составил 2 метра, шаг по электродам – 2.5 метра соответственно. Выбор параметров основывался на данных моделирования, описанных в главе 3.3. На практике указанные системы наблюдения позволили получить качественные материалы для интерпретации в рамках двумерной (2D) модели геологической среды.

Пример полевого разреза КС по профилю, проходящему вдоль линии скважин (в непосредственной близости от них), представлен на рисунке 66.

Пример сейсмограммы ОПВ с пропикированной линией первых вступлений изображен на рисунке 67.



кажущихся сопротивлений 3-х электродной расстановки (расстановка AMN - верхняя, MNB - нижняя)

Рисунок 67 - Пример сейсмограммы ОПВ

Обработка и интерпретация данных

Обработка данных ЭТ

Обработка проводилась по стандартному графу, описанному в главе 5.2. В результате обработки были получены разрезы УЭС. Разрез по одному из профилей приведен на рисунке 68.



Рисунок 68 – Разрез УЭС вдоль линии скважин

101

Обработка данных сейсморазведки

После проведения полевых работ на основе рапортов оператора были составлены файлы-описатели геометрии (SPS-файлы), информация из которых была занесена в заголовки сейсмических трасс. Произведена отбраковка некондиционных трасс и сейсмограмм, после чего обработка разделилась на два направления: МПВ и МОГТ.

Процесс обработки данных МПВ можно представить следующим образом:

- 1. Регулировка амплитуд (АРУ в коротком окне: 40 100 мс);
- Фильтрация для повышения соотношения сигнал/помеха и улучшения прослеживания первых вступлений (двусторонний фильтр Батерворта для сохранения формы первых вступлений);
- 3. Пикирование первых вступлений по всем сейсмограммам ОПВ;
- Инверсия первых вступлений на основе различных фоновых (стартовых) моделей среды;
- 5. Построение преломляющей границы.

Ввиду сложных физико-геологических особенностей строения ММП и зон растепления (смотри главы 2.3 и 3.3.1), а именно, наличия скоростной инверсии разреза, был выбран алгоритм «DeltaV» [38]. При данном способе трассы сортируются в сейсмограммы ОСТ и каждый годограф первых вступлений «инвертируется» индивидуально для каждой точки. Результатом обработки сейсмических данных являются градиентные скоростные модели среды по профилям. Модель по профилю в крест линии скважин изображена на рисунке 69.



Обработка данных МОГТ выполнялась по следующему графу:

- 1. ввод априорных статических поправок;
- 2. восстановление амплитуд (компенсация за сферическое расхождение);
- 3. каскадная фильтрация (выделение и удаление помех в различных частотных диапазонах) для повышения соотношения сигнал/помеха;
- 4. скоростная FK-фильтрация;
- 5. скоростной анализ;
- 6. ввод кинематических поправок и мьютинг за растяжение импульса;
- 7. суммирование по общей средней точке;
- постобработка суммарных разрезов, включая коррекцию статических сдвигов.

В результате обработки были получены временные сейсмические разрезы по всем профилям. Пример изображения увязанных в точках пересечения разрезов в пространстве 3D приведен на рисунке 70 (временной масштаб).

Рассмотрим более подробно некоторые процедуры графа обработки данных МОГТ 2D, разработанного и применяемого лабораторией инженерной геофизики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина [70].

По сравнению с данными нефтяной сейсморазведки, данные малоглубинных сейсморазведочных работ имеют отличия, связанные с источником и поверхностными условиями, которые накладывают довольно сильное влияние, поскольку именно в ближней зоне происходит формирование сигналов.

Стоит выделить несколько ключевых особенностей:

- малая мощность источника (кувалда и проставка);
- ограниченность по числу каналов (короткие годографы отраженных волн);
- наличие ярко выраженного «цуга» поверхностных волн, которые быстро интерферируют с отраженными (начиная со средних удалений);
- ярко выраженные преломленные волны на ближних удалениях;
- сравнительно низкие скорости пробега отраженных волн;

• неравномерность амплитуд от ПВ к ПВ и от ПП к ПП из-за поверхностных условий.



Рисунок 70 – Временные сейсмические разрезы

Данного рода особенности заставляют применять довольно широкий набор процедур, чтобы извлечь всю полезную информацию из исходных данных. Следует отметить, что некоторые процедуры, например, такие как миграция, не работают в силу математических ограничений, которые накладывают времена регистрации и частоты сигнала.

Отмечая данные особенности, необходимо привести примеры обработки на различных этапах [70]. Рисунок 71 демонстрирует <u>исходные полевые</u> <u>сейсмограммы</u>, рисунок 72 - их спектр соответственно.









На данных сейсмограммах отчетливо видны:

- прямая волна;
- преломленные волны;
- поверхностные волны;
- отраженные волны (фрагменты).

По спектру видно, что частотный диапазон записи 10 - 130 Гц. Полезный сигнал преобладает в диапазоне 30 - 75 Гц. Низкочастотные помехи, такие как поверхностные волны, лежат в диапазоне частот 8 - 30 Гц. Преломленные волны имеют слабую амплитуду на больших удалениях (на сейсмограммах фланговой расстановки), это может быть связано с мощностью источника, а также с деструктивной интерференцией антропогенных помех. На сейсмограммах не сбалансированы амплитуды от трассы к трассе. Отраженные волны

прослеживаются довольно слабо и только на малых временах и ближних удалениях. На временах 500 - 1000 мс отраженных волн не наблюдается.

Проведение <u>поверхностно-согласованных регулировок амплитуд</u> - важный этап обработки данных малоглубинной сейсморазведки. Это обусловлено разуплотненностью пород ВЧР и неравномерностью условий возбуждения и приема. Поэтому для выравнивания соотношения амплитуд от трассы к трассе необходимо провести поверхностно-согласованную балансировку амплитуд. Это позволит нам проследить отражения на больших удалениях и несколько убавить высокоамплитудные зоны на ближних удалениях, связанные с близостью пункта возбуждения (ПВ). Результат применения процедуры приведен на рисунке 73.

Для удаления помех и выделения отраженных волн было проведено *каскадное вычитание волн-помех*. Процедура позволяет сохранить спектр и избавиться от помех, которые могут ухудшить качество временного разреза МОГТ.

Основной задачей является подавление низкочастотных шумов, некогерентных помех, удаление остатков поверхностных волн.



Рисунок 73 – Сейсмограммы в сортировке ОПВ после применения поверхностносогласованной регулировки амплитуд

Изначально материал разделяется на несколько полос частот, внутри которых применяются различные регулировки амплитуд на базе медианных фильтров. Фильтр задается размером окна: по горизонтали определяется количеством трасс, а по вертикали – временем. Для удаления отдельных амплитудных выбросов выбирается небольшое окно: 5 – 10 % от максимального количества трасс в

подборке и 2.5 – 5 % от длины записи. Исходя из среднего количества каналов в малоглубинной сейсморазведке (96 – 200 штук) и длины записи (1 – 2 сек.) описанное выше окно имеет типовые размеры: 5 трасс * 25 мс. После следует уделить внимание удалению низкочастотных помех (превалирующая часть которых относится к поверхностным волнам). Для этого необходимо выбрать окно больших размеров и отработать им в области основного конуса помехи. Область задается линией мьютинга и медианный фильтр отрабатывает только в ней, в то время как расчет его коэффициентов происходит во всем диапазоне сейсмограммы. Размеры этого же окна задаются в соотношении 30 – 40 % от максимального количества трасс в подборке и 5 - 10 % от длины записи. Данные параметры соответствуют окну: 30 трасс * 50 мс.

В обоих случаях медианному фильтру задается порог срабатывания, который подбирается индивидуально для каждого проекта и обусловлен динамическими особенностями волнового поля.

На каждом этапе работы каскадной фильтрации необходимо выполнять качественную и количественную оценку применения алгоритмов, чтобы оценить форму изменения сигнала и по необходимости произвести корректировку параметров.

Завершением каскадного вычитания помех является применение FKфильтрации для погашения остатков поверхностных волн и других типов когерентных помех, оставшихся после медианной фильтрации.

После всех этапов работы алгоритма, полосы частот "сшиваются" между собой. На выходе мы получаем материал, очищенный от основной части помех (рисунок 74).



Рисунок 74 – Сейсмограммы в сортировке ОПВ каскадного вычитания волн-помех

Интерпретация

Интерпретация данных проводилась в пакет интерпретации «GeoGraphix». В ходе ее были выполнены следующие этапы:

- выделение аномальных зон по разрезам ЭТ, МПВ, МОГТ;
- выделение аномальных зон по картам-слайсам удельных сопротивлений и скоростей для разных глубин;
- выделение верхней кромки зон растепления по данным ЭТ;
- выделение нижней кромки зон растепления по данным МОГТ;
- сопоставление и анализ результатов с расположением объектов на КП (скважин, обвязочного шлейфа).

Основными признаками, по которым выделяются зоны растепления, являются (на основании физико-геологических особенностей ММП, см. главу 2.3): понижение удельных электрических сопротивлений и уменьшение скоростей (увеличение времени пробега) сейсмических волн в талике. На рисунке 75 продемонстрирован разрез УЭС, а на рисунке 76 - скоростная модель МПВ. Рисунок 77 иллюстрирует карты-слайсы для разных глубин.

108


На кустовой площадке хорошо видна зона пониженных сопротивлений и скоростей в области скважин, начинающаяся с глубины около 10 метров. Однако в силу низкой глубинности МПВ (из-за инверсии скоростей) и падения разрешающей способности с глубиной у ЭТ однозначно определить подошву зоны растепления невозможно, поэтому условно мы ее определили по данным МОГТ, как характерное изменение волнового поля на границах ММП – талик – ММП (рисунок 78). Таким образом, после проведения интерпретации можно четко выделить кровлю и подошву зоны растепления и ММП, рассчитать их размеры, а также согласовать их расположение с объектами на КП.

109



Рисунок 77 – Карты сейсмических скоростей (вверху) и удельного электрического сопротивления (внизу) на разных глубинах



Рисунок 78 – Пример выделения кровли и подошвы ММП по данным МОГТ (верхняя пунктирная линия – кровля талика, нижняя - подошва)

Проведенные работы доказывают, что применения одного метода недостаточно для объективной оценки ситуации. Только по результатам комплексирования возможно выделить аномальные зоны. Также видно, что зоны

110

растепления сосредоточены локально в районе скважин, а их форма и пространственное положение довольно сложны.

5.4.Изучение археологических объектов на примере древнего Смоленска

(Гнездово) и городища IX – XI вв. на примере комплекса Шниткино

<u>Цели и задачи</u>

Сопровождение археологических поисков методами малоглубинной геофизики – одно из самых интересных направлений в разведке. Зачастую, инженерные изыскания выполняются до проведения археологических работ для выделения наиболее перспективных участков на будущих раскопах, а также во время проведения раскопок для уточнения строения и заверки аномалий.

Ключевой особенностью данных исследований является заверка (прямые методы поиска – раскопки) объектов. Это позволяет «откалибровать» методику проведения работ и обработки, интерпретации данных, практически, в режиме реального времени.

Таким образом, основными целями и задачами отдельного направления малоглубинной геофизики является выделение различного рода аномалий, которые могут археологическими артефактами.

Описание объектов

«Гнездовский археологических комплекс – крупнейший памятник эпохи образования древнерусского государства Х века, расположенный на обоих берегах реки Днепр в 12 километрах от современного г. Смоленска. Памятник состоит из двух городищ, двух известных селищ и крупнейшего могильника Х века в Европе, который насчитывал около 4500 курганов [78]».

В ходе нескольких полевых сезонов кафедра «Разведочной геофизики и компьютерных систем» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина исследовала различные объекты на территории комплекса, в том числе курганы, расположенные в северной части Центральной курганной группы.

Общее состояние курганов свидетельствовало о том, что они в центральной части были повреждены более ранними раскопками XIX в (по методу «колодца»).

Также, северо-восточный сектор одного из них был полностью уничтожен в ходе современной хозяйственной деятельности (поврежден современным кладбищем). Высота изучаемых курганов около 1.5 – 2 м, диаметр 12 – 15 м.

Шниткинское городище по своему строению и курганам является мелкомасштабной копией Гнездово, которая расположена в районе деревни Старая Таропа на берегу реки.

Особенности археологических объектов

Исходя из априорных сведений о строении курганных групп и внешнего вида (разрушенные части курганов), основными объектами являются: зоны пониженных сопротивлений – кольцевые ровики; локальные зоны повышенного сопротивления – каменно-валунные глыбы, слагающие курганы в центральной части; зоны потери корреляции слоев, которые могут соответствовать раскопкам XIX в.

Методика проведения работ

Перед началом проведения работ, была разбита сетка профилей с помощью GNSS-системы. Также, для изучения строения вмещающего разреза были размечены профиля между курганными насыпями. Схема расположения профилей и курганных насыпей изображена на рисунке 79.

Изучение структуры курганных насыпей и городища основывалось на данных электротомографии (ЭТ), георадиолокации и топогеодезических работах. При проведении работ методом ЭТ использовалась многоканальная многоэлектродная аппаратура. Проведение работ методом магниторазведки было невозможно из-за большого числа металлических конструкций и современного мусора с прилегающего кладбища вблизи насыпей и непосредственно на их поверхности.

Более подробно проведение работ методом электротомографии описано в главе 5.2 настоящей работы. Исключение составляет шаг электродов, который выбирался исходя из требуемых глубин исследования (4 – 5 метров) и составил от 0.25 до 0.5 м.

Обработка данных

Обработка данных проводилась по стандартному графу, описанному в главе 5.2. В результате данного этапа были получены разрезы УЭС, представленные на рисунке 80.

Интерпретация данных на курганной насыпи

Как следует из модели УЭС, вмещающий разрез представлен, главным образом, переслаиванием пород с сопротивлениями от 100 до 2000 Ом[•]м, что соответствует супесями и песками.

Проанализируем в качестве примера один из разрезов УЭС по профилю, проходящему через курган Ц-351 (рисунок 81). Отметим только, что общее состояние курганов свидетельствует о том, что они в центральной части были повреждены более ранними раскопками в XIX веке. Кроме того, северо-восточный сектор кургана Ц-351 был полностью уничтожен в ходе современной хозяйственной деятельности (поврежден современным кладбищем). Высота изучаемых курганов около 1.5 – 2 метров, диаметр 12 – 15 м.



Рисунок 79 – Схема расположения профилей и карта рельефа на Гнездовском кургане (зеленые точки – границы курганных насыпей и зон просадок рельефа, красные - профиля)



Рисунок 80 – Разрезы УЭС для курганной группы в 3D-представлении

На данном разрезе выделяются зоны пониженного сопротивления в районе пикетов 2 – 4 и 16 – 20 метров (около 100 Ом[•]м), которые относятся к кольцевому ровику, окаймляющему курган.

В теле насыпи на пикетах 10 – 13 метров видна аномалия с сопротивлениями порядка 300 – 400 Ом[.]м, которая соответствует раскопкам «колодцем», проведенным в XIX веке.

Левая бровка кургана имеет высокое сопротивление, что обусловлено появлением в разрезе камней и крупной гальки, которые, среди прочего, являлись основной для формирования насыпи кургана.

Глубина от дневной поверхности до «материка» – площадки, на которой была возведена курганная насыпь, – по данным ЭТ, составляет около 1.5 метров.

На рисунке 82 представлена фотография северной части археологического профиля С-Ю, проходящего через курган Ц-351, который соответствует пикетам 7 – 12 на разрезе УЭС.

Совмещенное изображение разреза УЭС и раскопа приведено на рисунке 83. Отметим, что раскопки XIX века не дошли до центральной части насыпи, поэтому в разрезе не проявляются.





Рисунок 81 – Разрез удельных сопротивлений по профилю, проходящему через курган Ц-351



Рисунок 82 – Фото северной части профиля С-Ю кургана Ц-351



Рисунок 83 – Совмещенное изображение фотографии раскопа и профиля УЭС

Интерпретация данных на Шниткинском городище

В результате камеральной части работ были получены радарограммы (рисунок 84) и разрезы УЭС (рисунок 85).



Рисунок 84 – Обработанная радарограмма



Рисунок 85 – Разрез УЭС

Основной целью проведения работ на данном объекте было выделении и картирование культурного слоя, в пределах которого археологи могут извлекать ценную информацию. В результате комплексирования методов ЭТ и георадиолокации была выделена подошва культурного слоя. На рисунке 86 представлен результат по одному из профилей. Красной пунктирной линией обозначена подошва культурного слоя, синей – кровля глин, желтый пунктир – граница современного раскопа.



Рисунок 86 – Результат комплексирования и интерпретации данных на Шниткинском городище

<u>Выводы</u>

Методы ЭТ и георадиолокации способны дать общее представление о строении археологических объекта, их возможных повреждениях предыдущими раскопками. Кроме того, возможно выделение в курганной насыпи различных аномалий, возможно, связанных с останками обряда захоронения и артефактами.

Глубинность метода ЭТ (3 – 7 метра при коротких расстановках в 12 – 24 метра с 48 электродами), в целом, больше области археологических интересов. Картирование мелких объектов, представляющих археологическую ценность, данным методом затруднено. Порог выделения аномалий – их размеры, сопоставимые с шагом электродов по профилю – 0.25 – 0.5 м.

Глубинность георадиолокации также лежит в пределах археологических объектов. Метод позволяет провести экспресс-разведку для получения общей картины и будущего планирования работ.

Для проведения более однозначной и детальной интерпретации результатов необходимо комплексировать данные ЭТ с результатами иных методов разведочной геофизики, в частности, с магниторазведкой.

Основным применением данных методов в археологии, как показывают наши исследования, может являться возможность до начала археологических работ прогнозировать наиболее перспективные в плане раскопок участки, а также планировать сам процесс проведения детальных исследований.

Заключение

Проведенные исследования показали эффективность разработанной методики на основе ее практического применения в различных физикогеологических условиях для повышения достоверности геологического прогноза. Рассмотренные примеры работ, проведенных на целевых объектах, наглядно доказывают объективность данного подхода на всех стадиях изысканий.

На основе теоретического исследования и практического применения доказана необходимость использования методов математического моделирования при решении прямой и обратной задачи на этапе проектирования работ для выработки оптимального комплекса исследований, который позволит повысить достоверность геолого-геофизических моделей.

Рассмотрена и обоснована необходимость качественной и количественной интерпретации результатов для надежного и уверенного построения геологических моделей по данным разведочной геофизики, которые подтверждаются разведочным заверочным бурением.

Объектно-ориентированный подход к каждому проекту позволяет сократить объемы разведочного бурения без потери качества, что в свою очередь, способствует минимизации временных и финансовых затраты с сохранением высокой достоверности геологического прогноза.

Данная методика исследований успешно применяется на различных объектах автором работы и коллективом лаборатории инженерной геофизики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Список сокращений

- ВЧР верхняя часть разреза
- ОГП опасные геологические процессы
- НГК нефтегазовый комплекс
- МПВ метод преломленных волн
- МОГТ метод общей глубинной точки
- ОПВ общий пункт возбуждения
- ПВ пункт возбуждения
- ПП пункт приема
- ВЭЗ вертикальное электрическое зондирование
- ЭТ электротомография
- СЭЗ сплошные электрические зондирования
- ММП многолетнемерзлые породы
- КС кажущееся сопротивление
- УЭС удельное электрическое сопротивление

Список литературы

1. Арсланова Х.А. и др. Геологический словарь: в 2-х томах. М.: Изд-во Недра, 1978.

2. Бобачев А. А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. N 2. C. 14-17.

3. Бобачев А.А. и др. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред // Разведочная геофизика. 1996. С. 1-28.

4. Бобачев А.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В. Электротомография высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе // Инженерная геология. 2007. N 9. C. 31-35.

5. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.

6. Боголюбов А.С. Евроазиатская Ассоциация молодежных экологических объединений «Экосистема» // ECOSYSTEMA.RU. Москва, 1994. URL: <u>http://www.ecosystema.ru/07referats/slovgeo/785.htm</u> (дата обращения: 14.02.2017).

7. Боголюбов А.С. Евроазиатская Ассоциация молодежных экологических объединений «Экосистема» // ECOSYSTEMA.RU. Москва, 1994. URL: <u>http://www.ecosystema.ru/07referats/slovgeo/845.htm</u> (дата обращения: 14.02.2017).

8. Боголюбов А.С. Евроазиатская Ассоциация молодежных экологических объединений «Экосистема» // ECOSYSTEMA.RU. Москва, 1994. URL: <u>http://www.ecosystema.ru/07referats/slovgeo/382.htm</u> (дата обращения: 14.02.2017).

 Будз М.Д. Условия формирования селей в Прибайкалье. - В кн.: Оползни, сели, термокарст в Восточной Сибири и их инженерно-геологическое значение.
 М.: Изд-во Наука, 1969. С. 60-95.

10. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Численное моделирование растепления многолетнемерзлых пород в результате эксплуатации нефтяных скважин // Труды Международной конференции "Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика", посвященной 90-

летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко (30 мая - 4 июня 2011 г.). Новосибирск. 2011.

11. Владов М. Л., Золотарёв В. П. Старовойтов А. В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований. М.: Изд-во Моск. ун-та., 1997. 66 с.

12. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та., 2004. 153 с.

Воронков О.К., Моторин Г.А., Михайловский Г.В., Кунцевич С.П.
 Сейсмогеологические классификации грунтов криолитозоны. // Криосфера
 Земли. Новосибирск: Изд-во Гео, 1997. N 3. С. 47-54.

14. Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Изд-во Моск. ун-та.. 2001. 264 с.

15. Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование. М.: Изд-во Недра, 1982. 344 с.

Гвоздецкий Н.А. Карстовые ландшафты. М.: Изд-во Моск. ун-та.. 1988.
 112 с.

 Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Изд-во Недра, 1979. 143 с.

18. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физикогеологические процессы и их прогноз. М.: Изд-во Недра, 1980. 383 с.

Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. М.:
 Изд-во Недра, 1981. 344 с.

20. Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: Изд-во ГЕОС, 2002. 246 с.

21. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Изд-во Моск. ун-та.. 2002. 682 с.

22. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Изд-во Недра, 1986. 316 с.

23. Зверев Г.В., Тарасов А.Ю. Расчет и анализ воздействия многолетнемерзлых пород на крепление скважины № 338 Ванкорского месторождения в период эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. N 8. C. 41–51.

24. Качурин С.П. Термокарст в пределах СССР // Материалы по общему мерзлотоведению. VII Междуведомственное совещание по мерзлотоведению, выпуск 1. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 152-161 с.

25. Качурин С.П. Термокарст на территории СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 292 с.

26. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации. Киев: Изд-во Холтех, 2010. 520 с.

27. Короновский Н.В., Якушова А.Ф. Основы геологии. М.: Изд-во Высшая школа, 1991. 416 с.

28. Кузнецов В.М., Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. М.: Изд-во Герс, 2006. 160 с.

 Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Ященко З.Г. Инженерная геофизика. М.: Изд-во Недра, 1989. 254 с.

Матевеев Б.К. Электроразведка: учебник для вузов. М.: Изд-во Недра, 1990.
 368 с.

31. Михеев В.А. Геология: учебное пособие по курсу «Науки о Земле» для студентов, обучающихся по специальности 28020265 «Инженерная защита окружающей среды». Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2009. 109 с.

32. Модин И.Н. Электроразведка в технической и археологической геофизике: автореферат на соискание ученой степени д-ра т. наук. М., 2010.

33. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Гидрогеология и инженерная геология". М.: Издво Недра, 1990. 504 с.

34. Петров Н.Ф. Оползневые системы. Простые оползни (аспекты классификации). Кишинев: Изд-во Штиинца, 1987. 161 с.

35. Познанин В.Л. Эрозионные процессы в криолитозоне // Пространство и время. М.: Изд-во «Типография ИД «ГРАНИЦА», 2012. N 1(7). С. 127–132.

36. Пушкина Т.А., Мурашева В.В., Ениосова Н.В. // Гнёздовский археологический комплекс // Русь в IX - X веках: археологическая панорама / Отв. ред. Макаров Н.А. М., Вологда: Изд-во Древности севера, 2012. С. 242-273.

37. Савич А.И., Куюнджич Б.Д. Комплексные инженерно–геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений. М.: Изд-во Недра, 1990. 462 с.

 Сафиуллин Р.И., Белоусов А.В. Применение сейсмической томографии в условиях частично инверсного скоростного разреза // Инженерная геофизика - 2015 (20-24 апреля 2015 г.). Геленджик, EAGE. 2015.

39. Сборник «Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов» // ПНИИИС. М.: Изд-во Стройиздат. 1984.

40. Курганы Смоленской губернии : Вып. 1- / В.И. Сизов. - Санкт-Петербург : тип. Гл. упр. уделов, 1902. - 36. - (Материалы по археологии России, изд. Археологической комиссией; № 28). Гнездовский могильник близ Смоленска. - 1902. - [2], 136 с., 14 л. ил. : ил.

41. Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза // Криосфера Земли. Новосибирск: Изд-во Гео, 2011. N 2. C. 83-90.

42. Слепак З.М. Геофизика для города: на примере территории г. Казани. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2007. 238 с.

43. Смекалова Т.Н., Восс О., Мельников А.В. Магнитная разведка в археологии.
15 лет применения Оверхаузеровского градиентометра GSM-19WG. Симферополь:
Изд-во Доля, 2010. 76 с.

44. Смольянинов В.М., Немыкин А.Я. Общее землеведение: литосфера, биосфера, географическая оболочка. Воронеж: Изд-во Истоки, 2010. 193 с.

45. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России. 2004.

46. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во Моск. ун-та., 2008. 191 с.

47. Тер-Степанян Г.И. О длительной устойчивости склонов. Ереван: Изд-во АН ССР, 1961. 54 с.

48. Чистяков А.А., Макарова Н.В., Макаров В.И. Четвертичная геология М.: Изд-во ГЕОС, 2000. 303 с.

49. Фельдман Г.М. Термокарст и вечная мерзлота. Новосибирск: Изд-во Наука, 1984. 261 с.

50. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино: Изд-во ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.

51. Хмелевский В.К., Модин И.Н., Яковлев А.Г. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Коллектив авторов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 312 с.

52. Хмелевской В.К. Электроразведка. М.: Изд-во Моск. ун-та., 1984. 422 с.

53. Шарапанов Н.Н., Чубаров В.Н., Горяинов Н.Н. Проблемы оценки экологических ресурсов, запасов и защитных свойств гидролитосферы геофизическими методами // Геофизика. 1998. N 3. C. 57-64.

54. Шевнин В.А., Бобачев А.А. 2D инверсия данных, полученных по обычной 1D технологии ВЭЗ // Георазрез. 2009. N 3. C. 1-13.

55. Шевченко А.А. Скважинная сейсморазведка. М.: Изд-во РГУ нефти и газа, 2002. 129 с.

56. Шеко А.И. и др. Изучение режима оползневых процессов. М.: Изд-во Недра, 1982. 255 с.

57. Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Изд-во Наука, 1988. 213 с.

58. Шустер Р., Кризек Р. Оползни. Исследование и укрепление. М.: Изд-во Мир, 1981. 368 с.

59. Электронная версия журнала Европейской ассоциации геоучёных и инженеров (EAGE) «First Break», № 10 (октябрь), том 24, 2006. URL: <u>http://eage.ru/ru/firstbreak/article.php?id=1065</u> (дата обращения: 14.02.2017)

60. Advances in Near-surface Seismology and Ground-penetrating Radar / Richard D.
Miller (Editor), John H. Bradford (Editor), Klaus Holliger (Editor) // Geophysical Development Series. 2010. N 15. 487 p.

61. Dahlin, T., Zhou B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. // Geophysical Prospecting. 2010. N 52(3). 379-398 p.

62. Edwards, L.S. A modified pseudosection for resistivity and IP. // Geophysics. 1977.N 42. 1020-1036 p.

63. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology // Appl. Geophysics. 1993. N 29. 211–226 p.

64. Loke, M.H. and Barker, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting.1996a. N 44. 131-152 p.

65. Loke, M.H., Barker, R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion // Geophysical Prospecting.1996b. N 44. 499-523 p.

66. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. 1999. Vol. 64. N 3 (may-june). 800–808 p.

67. Yilmaz O. Engineering seismology. Tulsa: SEG, 2015. 954 p.

68. Yilmaz O. Seismic data processing. Tulsa: SEG, 1986.

Работы автора по теме диссертации

 Белоусов А.В., Сергеев К.С. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: материалы международной научн.-практ. конф. (26-27 ноября 2015 г) / гл.ред. В.И. Костицын. Пермь, Пермский гос.нац.исслед.ун-т. 2015.
 Белоусов А.В., Сергеев К.С., Сафиуллин Р.И. Возможности обработки различных типов волн, регистрируемых в инженерной сейсморазведке // Приборы и системы разведочной геофизики. 2014. N 1. С. 86-93.

71. Бобачев А.А., Сергеев К.С. СКВАЖИННАЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ // Малоглубинная, угольная и рудная геофизика - 2015. Современное состояние и перспективы развития (28 сентября - 2 октября 2015 г.). Сочи, ЕАГО. 2015

72. Бобачев А.А., Сергеев К.С. Электротомографические методики при геофизических исследованиях скважин // Тезисы докладов 12-й конференции и выставки EAGE «Инженерная геофизика-2016» (25 апреля 2016 г.). Анапа. 2016.

73. Бобачев А.А., Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В. Изучение карстовых процессов и оползней сейсморазведкой и электротомографией // Тезисы докладов 12-й конференции и выставки EAGE «Инженерная геофизика-2016» (25 апреля 2016 г.). Анапа. 2016.

74. Бобачев А.А., Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В. Комплексирование данных сейсморазведки и электротомографии на геофизическом полигоне МГУ «Александровка» // Тезисы докладов 12-й конференции и выставки EAGE «Инженерная геофизика-2016» (25 апреля 2016 г.). Анапа. 2016.

75. Рыжков В.И., Белоусов А.В., Бобачев А.А., Сергеев К.С., Плотников М.В. Комплексирование электротомографии и сейсморазведки для исследования зон растепления в условиях вечной мерзлоты // Арктика - Нефть и газ 2015 (21-23 апреля 2015 г.). Москва, ИПНГ РАН. 2015/

76. Рыжков В.И., Рослов Ю.В., Сергеев К.С., Половков В.В., Елистратов А.В. Инженерные изыскания по методике донной бескабельной сейсморазведки // Инженерная геофизика - 2015 (20-24 апреля 2015 г.). Геленджик, EAGE. 2015

77. Сергеев К.С., Белоусов А.В. Об отображении многолетнемерзлых пород в двумерных моделях геоэлектрики // Современные проблемы науки и образования.
2014. N 6. URL: <u>http://www.science-education.ru/120-15380</u> (дата обращения: 14.02.2017).

78. Сергеев К.С., Горин А.Д., Новиков В.В., Каинов С.Ю. Применение методов инженерной геофизики при изучении Гнездовского археологического комплекса // Инженерная, угольная и рудная геофизика - 2015. Современное состояние и перспективы развития (28 сентября - 2 октября 2015 г.). Сочи, ЕАГО. 2015.

79. Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В., Бобачев А.А. Из опыта изучения развития обвальных и карстовых процессов методами инженерной геофизики // Инженерные изыскания. 2016. N 12. C. 26-33.

80. Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В., Бобачев А.А. Проявление многолетнемерзлых пород на волновых полях различных методов инженерной геофизики на примере кустовой площадки месторождения Западной Сибири //

Малоглубинная, угольная и рудная геофизика - 2015. Современное состояние и перспективы развития (28 сентября - 2 октября 2015 г.). Сочи, ЕАГО. 2015

81. Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В., Бобачев А.А., Сафиуллин Р.И. Изучение многолетнемерзлых пород с использованием комплекса методов инженерной геофизики (на примере кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения в Западной Сибири) // Инженерные изыскания. 2015. N 10-11. С. 46-53.

82. Рыжков В.И., Белоусов А.В., Сергеев К.С., Горин А.Д., Новиков В.В., Каинов С.Ю. Применение электротомографии при изучении курганов центральной курганной группы Гнездовского археологического комплекса // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. №2. С. 58-63.

Список иллюстраций

Рисунок 4 – Система наблюдений при проведении работ методом ВСП..... 19

Рисунок 19 - Временные разрезы 47

Рисунок 24 – Разрезы удельных сопротивлений, полученные в результате инверсии данных: для карстовой полости, заполненной суффозионным материалом - слева; для карстовой полости заполненной воздухом - справа....... 50

Рисунок 25 - Общая модель оползневого тела...... 51

Рисунок 26 – Скоростная модель среды 51

Рисунок 28 – Разрез УЭС, полученный в результате решения обратной задачи

Рисунок 34 – Первая группа моделей. Классы А - Г. Модельные разрезы кажущихся сопротивлений для 3-х электродной комбинированной установки 60

Рисунок 43 - Блок-схема методики проектирования исследований...... 67

Рисунок 47 - Структурная карта по кровле плотных карбонатно-сульфатных пород (P1s-P2kz). Красным выделены зоны потери корреляции, связанные с Рисунок 48 – Скоростная модель среды (поперечные волны) по профилю. 78 Рисунок 49 - Разрез удельных электрических сопротивлений по профилю 78 Рисунок 50 – Карты-слайсы распределения УЭС по заданным глубинам и куб УЭС......79 Рисунок 57 – Разрез удельных сопротивлений по профилю ЭТ на плато 86 Рисунок 58 – Скоростная модель МПВ, совмещенная с разрезом МОГТ по Рисунок 59 – Временной сейсмический разрез МОГТ по профилю на плато Рисунок 60 – Результат комплексирования данных ЭТ и МОГТ по профилю Рисунок 62 – Разрез удельных сопротивлений по профилю № 2 (красным

Рисунок 64 – Схема расположения профилей при изучении ММП и зон
растепления
Рисунок 65 – Схема расположения профилей при изучении ММП и зон
растепления в сложных условиях
Рисунок 66 - Полевой разрез кажущихся сопротивлений 3-х электродной
расстановки (расстановка AMN - верхняя, MNB - нижняя) 101
Рисунок 67 - Пример сейсмограммы ОПВ 101
Рисунок 68 – Разрез УЭС вдоль линии скважин 101
Рисунок 69 – Скоростная модель КМПВ 102
Рисунок 70 – Временные сейсмические разрезы 104
Рисунок 71 – Исходные полевые сейсмограммы в сортировке ОПВ 105
Рисунок 72 – Спектр исходных сейсмограмм 105
Рисунок 73 – Сейсмограммы в сортировке ОПВ после применения
поверхностно-согласованной регулировки амплитуд106
Рисунок 74 – Сейсмограммы в сортировке ОПВ каскалного вычитания волн-
Theynow () Conemol pulman b copin police of the Ruekudhoro bis infuting bosh
помех
помех
помех
 помех
 108 Рисунок 75 – Разрез УЭС с нанесенной скважиной (красная стрелка) 109 Рисунок 76 - Скоростная модель КМПВ с нанесенными скважинами (красные стрелки)
 помех
 108 Рисунок 77 – Разрез УЭС с нанесенной скважиной (красная стрелка)
 помех
 помех
 помех

Рисунок 83 – Совмеш	енное изображение с	ротографии	раскопа и	профиля
УЭС				115
Рисунок 84 – Обработа	нная радарограмма	•••••	•••••	116
Рисунок 85 – Разрез УС	ЭС	•••••	•••••	116
Рисунок 86 – Результ	гат комплексировани	я и интерп	ретации да	нных на
Шниткинском городище			••••••	117

Список таблиц

Таблица 1 - Сравнительные характеристики методов
Таблица 2 - Значения удельных сопротивлений горных пород в мерзлом
гоянии [50]
Таблица 3 – Оценка применимости различных методов на целевых объектах
Таблица 4 – Параметры моделей и установок 58