



**Материалы международной
научно-практической конференции
"ГЕОСОЧИ-2022. ТЕМАТИЧЕСКАЯ СЕССИЯ:
"СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ
ГЕОФИЗИКИ"**

ГЕО *Сочи*
2022



**г. СОЧИ
27-29 АПРЕЛЯ 2022 ГОДА**

www.geoearu.com

Сборник

*материалов международной
научно-практической конференции*

"ГЕОСОЧИ-2022. ТЕМАТИЧЕСКАЯ СЕССИЯ:
"СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ"
(27-29 апреля 2022 года)

г. Сочи-2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕССИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ	3
Д.И. Фадеев	
ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ	3
К. Д. Ефремов, Д. К. Большаков, И. Н. Модин	
РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧЕТЫРЕХСЕГМЕНТНЫХ РАССТАНОВОК В МЕТОДЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ	9
И.О. Шапаренко Н.Н. Неведрова	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛОМНЫХ СТРУКТУР (НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО АЛТАЯ)	14
Г.Л. Панин ¹ , Т.А. Котенко ² , Е.В.Балков ¹	
СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУРАХ ВУЛКАНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ И КАМЧАТКИ	18
И.Н.Модин ^{1,2} , А.Д. Скобелев ^{1,2} , С.С. Рыбаков ^{1,2} , И.В.Лыгин ¹ , К.М.Кузнецов ¹ , Д.А.Арутюнян ¹ , А.Д.Шклярчук ¹	
КОМПЛЕКСНЫЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ И ГРАВИРАЗВЕДОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СВАЛКЕ ХИМИЧЕСКИХ ОТХОДОВ	23
И. Д. Ефремов , Д. К. Большаков, И. Н. Модин	
ОСОБЕННОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДАННЫХ ЕСТЕСТВЕННОГО ПОЛЯ ИЗ ПОЛЕВЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ	29
Д.К. Большаков, К.Д. Ефремов, И.Н. Модин	
ОПРОБОВАНИЕ ПЛОЩАДНЫХ РАССТАНОВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ.	34
СЕССИЯ "ИЗУЧЕНИЕ КРИОЛИТОЗОНЫ МЕТОДАМИ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ"	42
И.И. Христофоров, И.В. Горохов, К.П. Данилов	
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ПОДВОДНОГО ГАЗОПРОВОДА С ПОВЕРХНОСТИ РЕЧНОГО ЛЬДА	42
Д.С. Никитин, О.С. Самсонова	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГРУНТОВ ГУБЫ БЕЗЫМЯННОЙ АРХ. НОВАЯ ЗЕМЛЯ (О. ЮЖНЫЙ)	42
Д.В. Копылов, С.Ю. Янин	
СТРОЕНИЕ БУТРА ПУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ БЕСКОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ НА ТЕРРИТОРИИ ТУНДРЫ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ	44
И.И. Христофоров, К.П. Данилов, И.И. Горохов	
ОСОБЕННОСТИ ПОИСКА БИВНЕЙ МАМОНТА В ВОДОЕМАХ КРИОЛИТОЗОНЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ	48
СЕССИЯ "ГЕОТЕХНИКА И ГЕОМЕХАНИКА"	49
Д.С. Смирнов, О.В. Казанов, И.Г. Манылов, Г.С. Мелихова, С.Н. Ванфуба ¹	
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕЛЕАКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ПРИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	49
Ю.А. Строчков	
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ВИБРАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ РЫХЛЫХ ГРУНТОВ	55
К.В. Романевич, М.О. Лебедев, С.В. Андрианов	
РЕЗУЛЬТАТЫ ДОЛГОСРОЧНОГО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ В ПЕРИОД 2009-2022 ГГ.	56
М.О. Лебедев, А.Д. Басов, С.А. Шляев, К.В. Романевич	
ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ ТРАССЫ «АДЛЕР-КРАСНАЯ ПОЛЯНА»	62
СЕССИЯ "РАЗВИТИЕ АППАРАТУРНЫХ РАЗРАБОТОК"	66
И.А. Попов ¹ , Е.В. Балков ² , Г.Л. Панин ² , Ю.Г. Карин ²	
ИСПЫТАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИЛЫ МНОГОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ, ИСПОЛЪЗУЕМОГО ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ	

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ КОС ДЛЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ	66
М.П. Широбоков	
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОДВОДНОЙ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ. ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ.....	69
А.В. Лехнович, Г.Л. Панин	
ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ОДНОЧАСТОТНОГО ПРИБОРА ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАЛОГЛУБИННЫХ ПРОФИЛИРОВАНИЙ	69
С.В. Гудков	
ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СЕЙСМОМЕТРОВ И ГЕОФОНОВ С АВТОНОМНЫМИ РЕГИСТРАТОРАМИ GEOSPACE ДЛЯ ЗАДАЧ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И СМР	72
СЕССИЯ "НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ"	73
И.Н.Модин ¹ , В.А.Шевченко ¹ , А.Д.Скобелев ¹ , А.Д.Приходько ¹ , Е.Ю. Гиренко ²	
ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОИСКА ФУНДАМЕНТА ДРЕВНЕГРЕЧЕСКОЙ БАЗИЛИКИ НА БОРИСОГЛЕБСКОМ ГРЯЗЕВОМ ВУЛКАНЕ	73
И.П.Орлова ¹ , Н.К. Капустян ^{1,2} , Г.Н. Антоновская ²	
СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В КРИОЛИТОЗОНЕ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТА... 80	
А.Д. Скобелев, И.Н. Модин	
ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ НА ОПОРНОМ РАЗРЕЗЕ СИНИХ ГЛИН	84
В.В. Романов ¹ А.А. Иванов ² , М.П. Широбоков ³	
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИКАЦИИ МПВ–ОГП ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ	93

Д.И. Фадеев

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ

(ИНГГ СО РАН)

Для решения задач малоглубинной геофизики широко применяются индукционные электромагнитные методы исследований. Эффективность и простота обуславливает их применимость для решения широко круга вопросов: от поиска локальных объектов, до выделения структурных особенностей распределения удельного электрического сопротивления в первых метрах геологического разреза. Среди популярных компактных устройств для выполнения исследовательских работ можно выделить GEM-2, ЭМС, DUALEM, CDM-Explorer, EM-31, EM-38, EMP-400, CMD.

Перечисленные устройства для индукционных исследований поверхностного пространства имеют ряд недостатков. Если не выполняется компенсация прямого поля генератора, то уменьшается информативность вторичного сигнала от среды, который измеряется на фоне первичного поля, при значительном превосходстве амплитуды последнего. Схемы с компенсацией первичного поля работают лучше, но их настройка и калибровка требуют применения сложных электротехнических схем и конструктивных решений (Манштейн и Балков, 2013). Кроме того, в случае устройств, все катушки которых расположены в одной плоскости, одному объекту, расположенному на глубинах не более метра, могут соответствовать несколько образов на полученных картах, графиках и разрезах, что затрудняет интерпретацию (Балков, 2011).

Метод электромагнитного профилирования (ЭМП), активно применяемый за рубежом при археолого-геофизических изысканиях, реализован в ряде аппаратурных решений ИНГГ СО РАН (рис. 1). Среди них 14-частотная аппаратура ЭМС (Манштейн и др., 2000), 3-частотная компактная аппаратура Геовизер (Балков и др., 2017).

В ИНГГ коллективом специалистов проведены комплексные испытания компактной малоглубинной аппаратуры электромагнитных исследований. В настоящей работе будут описаны использованные методы и освещены отдельные результаты исследования.



Рисунок 1. Внешний вид и процесс полевой съемки с использованием аппаратуры электромагнитного профилирования ЭМС (слева) и «ГеоВизер» (справа).

Применение ЭМП при локализации пустот

Основной задачей на объекте является определение расположения пустот под землей. Пустоты приурочены к старым погребам, которые много лет назад частично засыпали строительным мусором и грунтом, плана расположения погребов не сохранилось. Для выделения заданных областей эффективно применение разрабатываемой аппаратуры. Среди имеющихся аналогов прибора, «Геовизер», ввиду своей бесконтактности, компактности и скорости работы, максимально подходит для решения поставленной задачи. Одна приемная катушка обеспечивает единственный экстремум над локальным малоглубинным объектом, что значительно упрощает задачу интерпретации данных. Объект исследования представляет собой участок выделенный под сквер расположен между пересечениями улиц Демакова и Российской, и Арбузова и Российской, г. Новосибирск. Площадь участка составляет 2,5 гектара (25 000 м²). При классическом методе работы по рулеткам, основываясь на опыте практических работ автора, за 1 день удастся сделать съемку площадки 50 x 50 м (2500 м², шаг 1м по профилю и между ними). Перед проведением работ была проведена ортофотосъемка местности (рис. 2). Выделены сложности в построении регулярной прямолинейной сети наблюдений. Измерения решено было проводить в непрерывном режиме с привязкой по дифференциальному GPS (RTK). В ходе рекогносцировочных измерений на характерном объекте с известным расположением (есть выход на дневную поверхность) установлено наличие плиты перекрытия над полостями погребов. Эта плита перекрытия имеет в своем строении арматуру, являющуюся яркой мишенью для разрабатываемой аппаратуры (рис. 3).



Рисунок 2. Ортофотоплан исследуемой территории

Рекогносцировочные измерения проводились над объектом вскрытым на дневной поверхности (рис. 3). Объект представляет собой заброшенный погреб, перекрытый бетонной плитой,

задернованной 20-30 см слоем. На картах распределения уровня сигнала ЭМП сооружение проявляется в виде положительных аномалий высокой амплитуды, соответственно низкого удельного электрического сопротивления (УЭС). Это связано с наличием арматуры в плите перекрытия. По результатам геофизических исследований построены карты распределения электромагнитных свойств среды (рис. 4), выделены целевые объекты поиска, подтверждение которых необходимо проводить прямыми методами исследования.

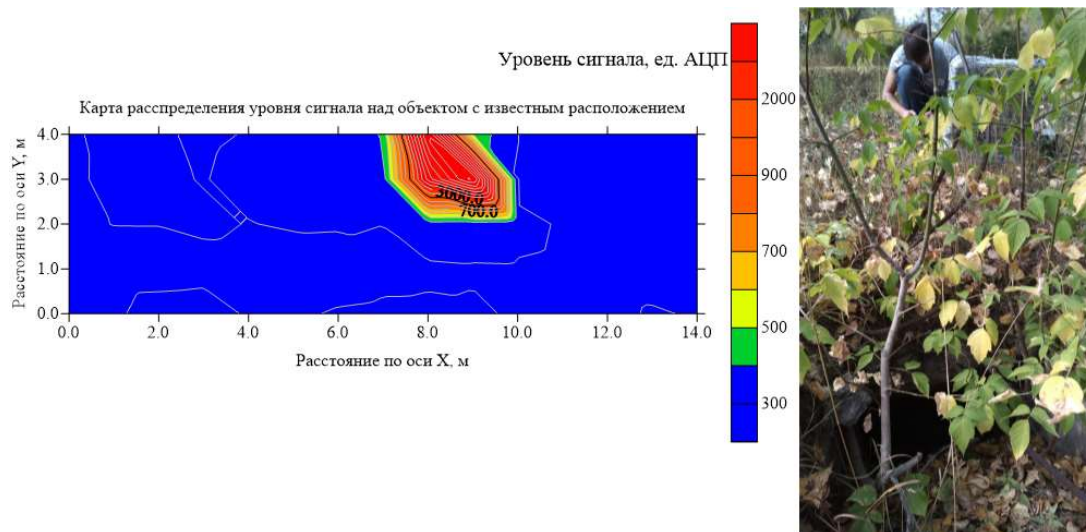


Рисунок 3. Карта распределения уровня сигнала индукционной аппаратуры над известным объектом, виден вход в погреб

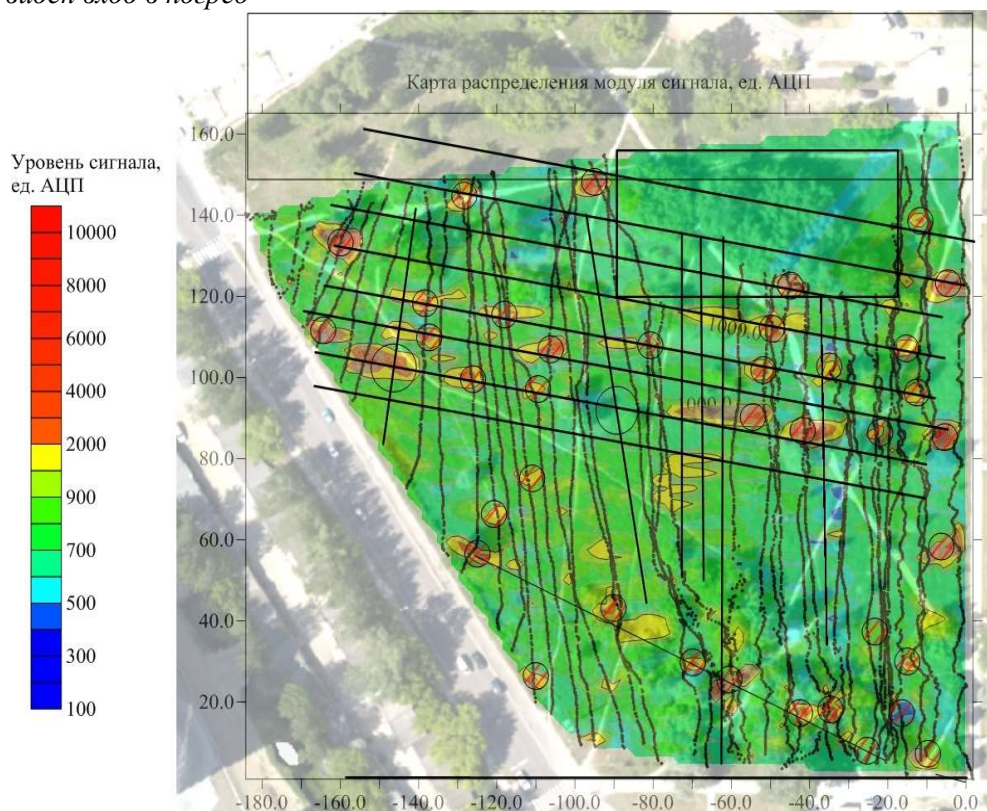


Рисунок 4. Карта распределения уровня сигнала аппаратуры Геовизер на исследуемом объекте. Кругами выделены аномалии, отнесенные к погребенным сооружениям

К сожалению, не всегда задача локализации полости в земле легко разрешима за счет наличия металла в сооружениях, как это было описано выше. Рассматривать задачу без этих дополнительных свойств объекта можно в рамках поиска ограниченного объема, заполненного воздухом, в более проводящей вмещающей среде. Разрешимость задачи в таком случае явно зависит не только от геометрических размеров и глубины до кровли, но и сопротивления вмещающей среды. В случае

достаточно проводящих пород (УЭС 50-150 Ом·м) удастся решить задачу при глубине залегания кровли объекта до 2 м. Карта отображает результаты проведенных изысканий по поиску погребенного бункера. В структуре сооружения нет армированных элементов, соответственно поисковым признаком будет повышенное сопротивление по сравнению со вмещающей средой. На картах распределения кажущего УЭС можно выделить две области, начинающиеся проявляется с 1.5 метров глубины на интервале 2-4 метра по оси X и 1.5-2.5 метра по оси Y. На дневной поверхности асфальтовое покрытие до 14 метра по оси X. Эскавация обозначенного участка подтвердила наличие искомого объекта на 2-4 метрах. Аномалия, выделяемая на 7 метре, не нашла отражения при вскрытии, возможно она связана с выемкой и последующим возвратом грунта при строительстве сооружения.

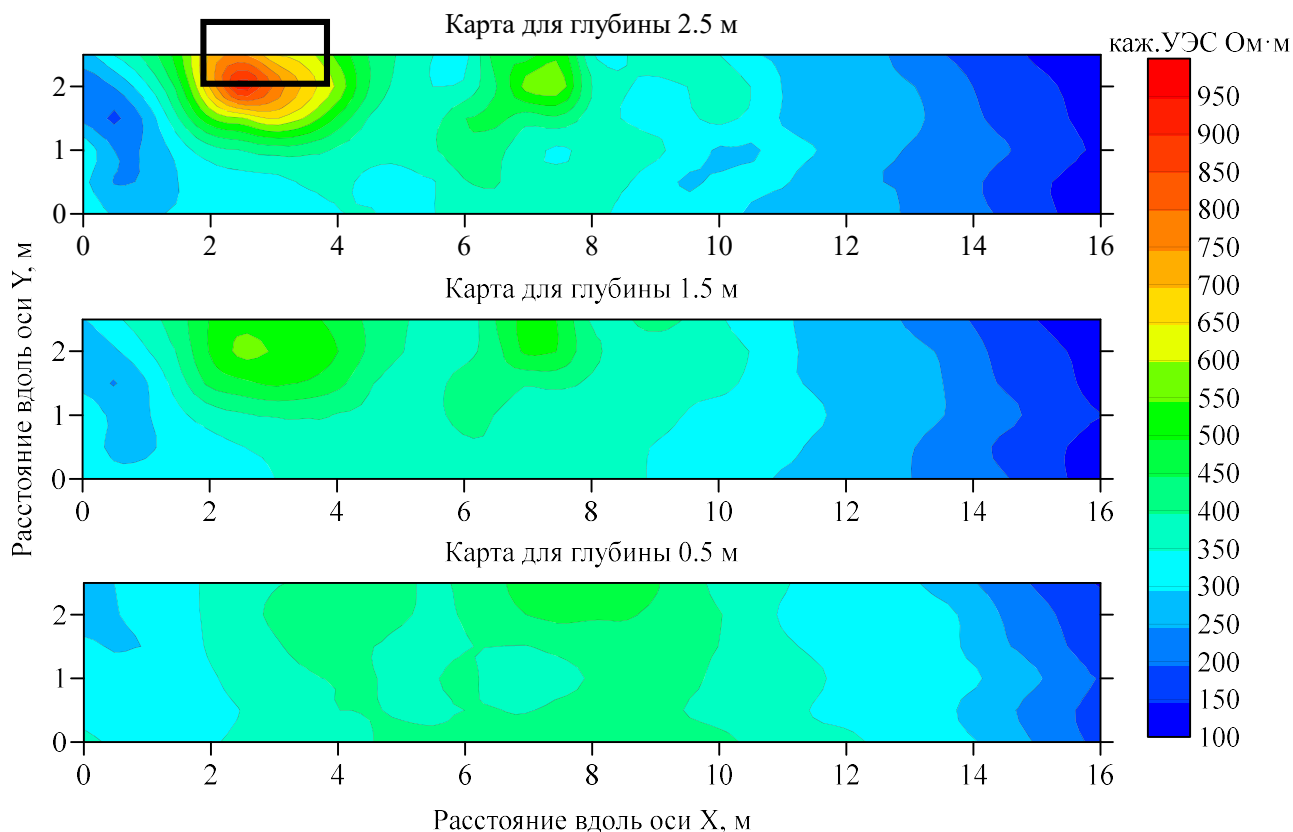


Рисунок 5. Карты распределения кажущегося удельного электрического сопротивления для трех частот аппаратуры ЭМП. Задача локализации полости. Подтверждено ее наличие на 2-4 метрах по оси X

Поиск под завалами.

К сожалению горный туризм помимо всех плюсов обладает еще высокой степенью опасности. В мае 2019 года, в Горном Алтае группу Новосибирских туристов из 9 человек накрыло лавиной. Выжило только двое. В таких случаях тела, погребенные под слоем снега найти практически невозможно. При точном определении площадки поиска проводится обследование щупом. Такой метод слишком медленный и дискретный. Посмотрев на эту проблему с точки зрения малоглубинной электроразведки можно выделить конкретные критерии. Необходимо найти пару металлических альпинистских «кошек» под слоем снега [Hauck et al., 2001]. Для определения максимальной глубины снежного покрова при котором выделение аномалий от объекта возможно, были проведены измерения с магнитометром «ММПОС-2», глубинным металлоискателем «Detech SSP-3100 Pro» (заявленная производителем глубинность до 6 метров), аппаратурой «ЭМС» и «Геовизер». Исследовалось влияние от двух характерных типов этого элемента альпинистского снаряжения, представленных на рисунке 6. Таким образом установлено что магнитометры определяют искомый объект на высоте 1 метра на уровне собственных шумов, типичные металлоискатели справляются с задачей обнаружения на глубине 0.5-0.7 м, глубинный металлоискатель до 1 метра. Разработанная аппаратура определяет

объект на глубине 1 м с сохранением соотношения сигнал/шум равным 3, максимальная глубина обнаружения 1.5 метра (близко к уровню шумов) (Таблица 1).

Таблица 1 – Максимальная чувствительность к объекту «Кошка» различной аппаратуры

«Кошка» одна	Магнитометр MMPOS-2, в воздухе, на уровне фона 4-5 единиц, на глубине 1.2 метра, видно значение, ед.	Глубинный металлоискатель Detech SSP-3100 Pro, определяет на глубине в воздухе, метров	Металлоискатель White's COIN PRO, находит на глубине в воздухе, метров	ЭМС, в воздухе, на уровне фона 2 единицы, на глубине 1 метр, видно значение, единиц	Геовизер, в воздухе, на уровне фона 20 единиц, на глубине 1 метр, видно значение, единиц
Petzl Charlet Moser	1.0 - 1.2	1	0.7	Два пика +3 и -3	60 единиц
Vertical	2.3	1	0.7	Два пика +3.7 и -3.7	60 единиц



Рисунок 6. Фото объектов поиска: «кошек» альпинистов (Petzl Charlet Moser, Vertical)

Выводы

Использование методов электрометрии при решении поставленных поисковых задач оказалось весьма эффективным, в силу контрастности объектов по сравнению с вмещающим грунтом. Установлена выраженная корреляция между уровнем сигнала аппаратуры ЭМП и УЭС.

В результате проведенной работы были построены карты и разрезы распределения модуля и компонент сигнала, кажущегося УЭС, измеренных индукционной аппаратурой. На картах и разрезах выявлены аномалии, вызванные наличием изменений в структуре среды. Исходя из условий и возможности проведения исследований были частично подтверждены границы фундамента. Характер сигнала в зонах контрастных аномалий, указанных выше, свидетельствует о наличии проводящих объектов, к которым могут также относиться армированные бетонные конструкции. Наложение априорной информации с полученными геофизическими данными-позволяет с большей вероятностью сопоставить на местности схему расположения здания. В результате построены карты распределения кажущегося удельного электрического сопротивления на площади 2 Га (рис. 4).

Выполненные исследования выражено демонстрируют эффективность применения методов и аппаратуры ЭМП в рамках комплексного изучения распределения УЭС первых метров геологического разреза, что открывает перспективы по расширению круга задач, решаемых в инженерной геофизике в экспресс режиме.

Благодарности

Разработка аппаратурных и методических решений для электромагнитного профилирования ведется в ИНГГ СО РАН в рамках проекта № FWZZ-2022-0025.

Библиография

1. Балков Е.В. Множественные образы в сигнале от локальных объектов при электромагнитном профилировании компактным зондом с разнесенными катушками // Всероссийская школа-семинар имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли, Санкт-Петербург, 2011, 4 с.
2. Балков Е.В., Фадеев Д.И., Карин Ю.Г., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А. Панин Г.Л. Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям // Геология и геофизика, 2017, Т. 58, № 5, С. 783-791.
3. Манштейн А.К. и Балков Е.В. Способ и устройство для индукционного частотного зондирования: пат. 2502092 Российская Федерация, МПК G01V 3/10 (2006.01) / заявитель и патентообладатель ИНГГ СО РАН - № 2011132460/28; заявл. 01.08.2011; - опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35. 7 с.
4. Манштейн А.К., Эпов М.И., Воевода В.В., Сухорукова К.В. Способ индукционного частотного зондирования: пат. 2152058 Российская федерация, МПК G01V 3/10 / заявитель и патентообладатель ИНГГ СО РАН; заявл. 24.06.1998, опубл. 2000, Бюл. № 18, 4 с.
5. Hauck C., Guglielmin M., Isaksen K., Vonder M.D. Applicability of frequency-domain and time-domain electromagnetic methods for mountain permafrost studies // Permafrost Periglac. Process. 2001, Vol. 12: 39-52. doi:10.1002/ppp.383

References

6. Balkov E.V. Multiple images in the signal from local objects during electromagnetic profiling by a compact probe with spaced coils. All-Russian School-Seminar named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan on electromagnetic sounding of the Earth, St. Petersburg, 2011, 4 p.
7. Balkov E.V., Fadeev D.I., Karin Yu.G., Manshtein A.K., Manshtein Yu.A. Panin G.L. A new approach to shallow electromagnetic sounding // Geology and geophysics, 2017, vol. 58, no. 5, pp. 783-791
8. Manstein A.K. and Balkov E.V. Method and device for induction frequency sounding: Pat. 2502092 Russian Federation, IPC G01V 3/10 (2006.01) / applicant and patent holder IPGG SB RAS - No. 2011132460/28; dec. 08/01/2011; - publ. 20.12.2013, Bull. No. 35. 7 p.
9. Manstein A.K., Epov M.I., Voevoda V.V., Sukhorukova K.V. The method of induction frequency sounding: Pat. 2152058 Russian Federation, IPC G01V 3/10 / Applicant and patentee IPGG SB RAS; dec. 06/24/1998, publ. 2000, Bull. No. 18, 4 p.
10. Hauck C., Guglielmin M., Isaksen K., Vonder M.D. Applicability of frequency-domain and time-domain electromagnetic methods for mountain permafrost studies // Permafrost Periglac. process. 2001 Vol. 12:39-52. doi:10.1002/ppp.383

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕТЫРЕХСЕГМЕНТНЫХ РАССТАНОВОК В МЕТОДЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

¹Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

Круг задач, решаемых с применением комплекса методов современной инженерной геофизики, расширяется с каждым годом. Совершенствуются и сами методы. Одним из наиболее активно используемых является метод электротомографии. Именно этот метод электрических зондирований был выбран авторами для изучения пространственного изменения удельных сопротивлений при оценке гидрогеологических характеристик терригенных отложений до глубин 100 метров и более.

Основная цель выполненных исследований – построение геоэлектрической модели правого берега реки с высокой детальностью и глубинностью превышающей глубинность исследований достижимую с применением стандартной (двухсегментной) модификации метода электротомографии. Для построения достоверной геоэлектрической модели исследуемой территории, сочетающей присущую методу высокую детальность в приповерхностной части и значительную глубинность, полевые данные были получены по многосегментной технологии [Большаков и др., 2019], выполнена их последующая обработка и расчет двумерных инверсий. Основной отличительной особенностью выполненных работ является использование многосегментной технологии измерений в зимний период с сочетанием наземных измерений и измерений на акватории реки (со льда). Таким образом, несмотря на преодоление водной преграды, данные электрических зондирований получены непрерывно с одинаковой плотностью наблюдений, сохранением методики и глубинности на всей площади исследований. Еще одной особенностью проведенных исследований является значительный объем выполненных работ, – суммарная протяженность профилей составила более 10 км (рис. 1).

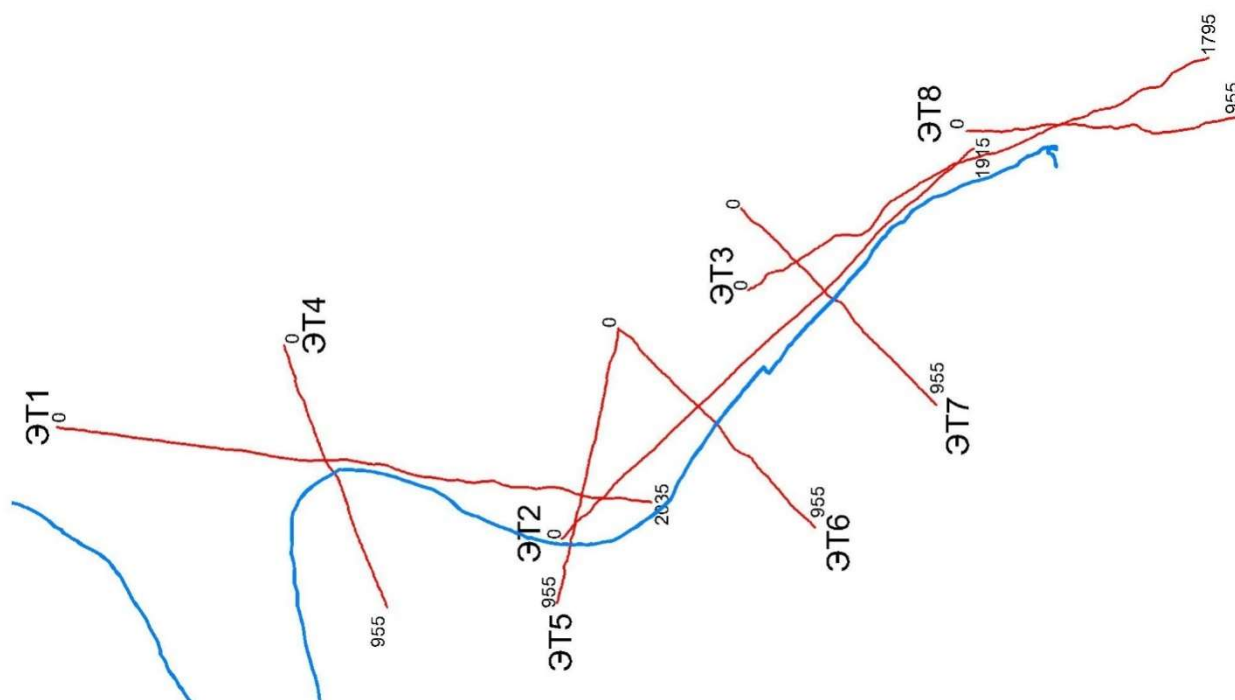


Рисунок 1. Карта взаимного расположения профилей электротомографии (ЭТ1-ЭТ8) и берега реки

Указанные особенности позволили получить качественные данные с требуемой детальностью и без потери глубинности. Для полевых измерений использовалась 48-электродная станция «Омега-48» (ООО «Логис», www.logsys.ru), сегменты кос и изготовленное дополнительное оборудование – удлинители кос длиной 130 м (ООО «ГЕОДЕВАЙС», www.geodevice.ru), а также соединители-переходники (ООО «НПЦ ГЕОСКАН», www.geoscan.su).

Стандартная технология электротомографии обеспечивает высокую плотность данных [Бобачев и др., 2006] при значительной глубине исследования [Шевнин, Колесников, 2011]. Дополнительное увеличение глубинности исследований при сохранении детальности возможно при использовании комбинированной трехэлектродной установки $Amn + mnB$ вместо четырехэлектродной установки $AmnB$ (рис. 2, сверху). Однако, вне зависимости от используемых установок, глубинность стандартной методики зависит от максимального разноса, который определяется шагом между электродами, одновременно доступными для измерений, и их количеством. Многосегментная технология электротомографии [Большаков, Модин, 2015] позволяет достигать значительно большей глубинности (рис. 2, внизу), по сравнению со стандартной двухсегментной [Большаков и др., 2017]. При переходе от двухсегментной методики измерений к четырехсегментной, происходит многократное (формально, более чем в два раза) увеличение глубинности.

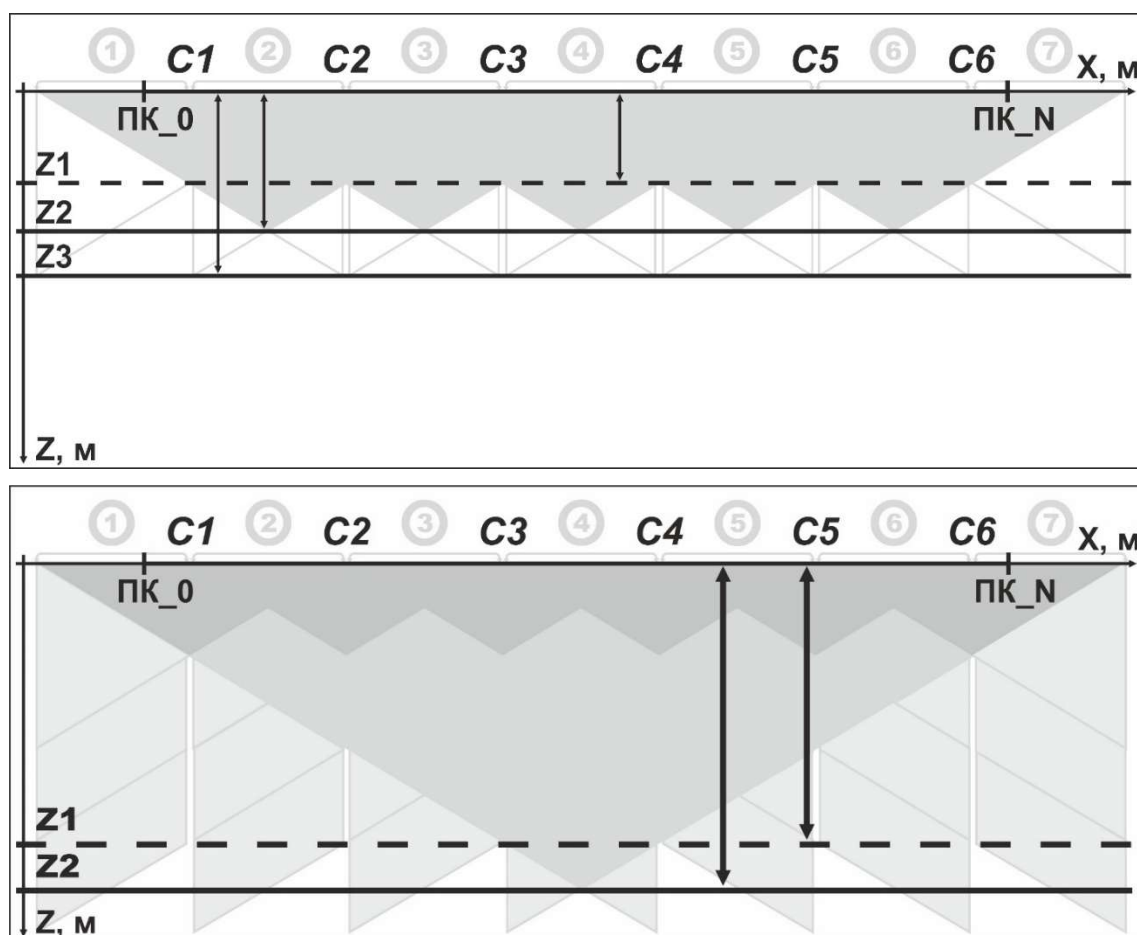


Рисунок 2. Схематичное положение условных эффективных глубин (Z_1 - Z_3) для двухсегментной (вверху) и четырехсегментной (внизу) методик с установками Amn, mnB (Z_2, Z_3) и $AmnB$ (Z_1)

Основным принципом многосегментных измерений является последовательное (по два сегмента) подключение к станции всего количества электродов (четыре сегмента) для выполнения измерений, что обеспечивает значительное увеличение глубинности исследований. Возможность дополнительных измерений, с удаленными от станции

сегментами, обеспечивается применением сегментов-удлинителей и специальных переходников. На рисунке 3 условно изображены основные (серый цвет) и дополнительные (другие цвета) области исследований встречных трехэлектродных установок, для двухсегментной (основные измерения) и четырехсегментной (дополнительные измерения) методик, соответственно.

Для изучения терригенной толщи на глубину более 100 метров, использована именно четырехсегментная методика, позволяющая и увеличить глубину исследований в два раза, по сравнению со стандартной двухсегментной, и сохранить детальность в приповерхностной части, благодаря сохранению шага между электродами в 5 м. При работах методом электротомографии важным условием является прямолинейность профилей. Это требование в совокупности с необходимостью изучения протяженного криволинейного участка, прилегающего к берегу реки повлияло на выбор системы наблюдений. Основной магистральный профиль (рис. 1), повторяющий геометрию реки, для соблюдения линейности применяемых электроразведочных установок, был разбит на три пересекающихся линейных участка (профили ЭТ1, ЭТ2, ЭТ3) длиной 1.5-2 км. Для получения более полной информации о строении и свойствах терригенных отложений на исследуемой территории выполнены измерения на пяти поперечных профилях (ЭТ4-ЭТ8) длиной около 1 км каждый. Поперечные профили пересекают основной магистральный профиль, русло реки и расположены на расстоянии около 0.5 км друг от друга (рис. 1).

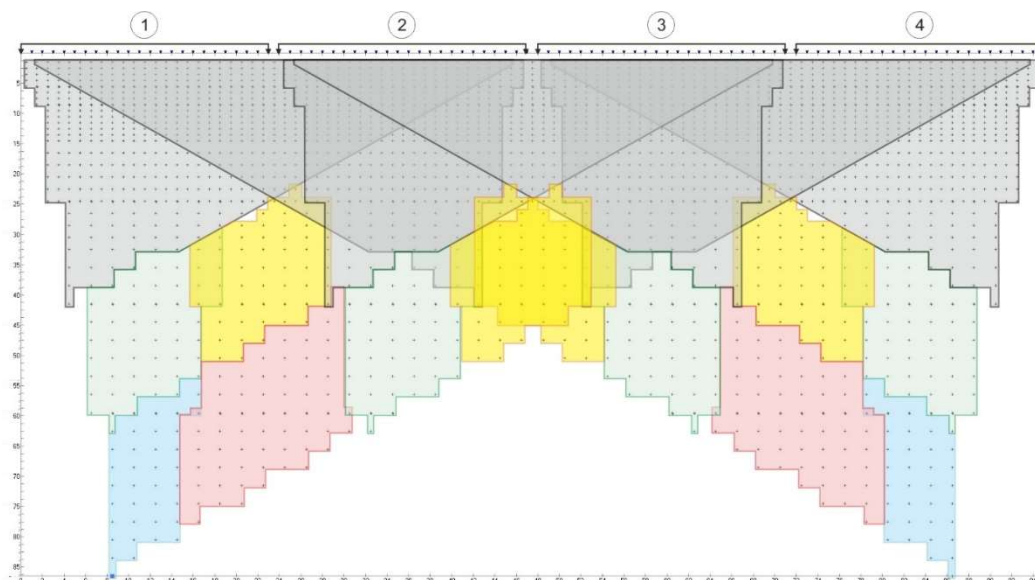


Рисунок 3. Схематичное изображение областей исследования для трехэлектродных установок Atn и tnB , реализованных на четырехсегментной расстановке электродов (цвет областей соответствует протоколу измерений)

Объем данных метода электротомографии в приповерхностной части изучаемой геологической среды для многосегментной технологии точно такой же, как и для стандартной. Однако, наличие дополнительных данных, соответствующих большим глубинам исследований, делает возможным уточнение строения верхней и средней частей геоэлектрической модели, получаемой по результатам двумерной инверсии. Таким образом, четырехсегментные измерения необходимы не только и не столько для получения строения глубинной части геоэлектрического разреза (что, конечно, является важным), сколько нужны для повышения достоверности построений, выполняемых автоматически программой двумерной инверсии, в средней части модели, а также, частичного уточнения строения верхней части. Что, к сожалению, недоступно для двумерной инверсии данных стандартной двухсегментной технологии.

Расчет геоэлектрических моделей с использованием программ двумерной инверсий

данных четырехсегментной электротомографии повышает устойчивость решения и позволяет уменьшить количество «артефактов» порождаемых работой алгоритма инверсии на интересующих нас глубинах. Это продемонстрировано результатами двумерной инверсии, представленными на рисунке 4. Модели получены по программе ZondRes2D (автор А. Е. Каминский, zond-geo.com,) для двух наборов данных, соответствующих двухсегментной (рис. 4, вверху) и четырехсегментной (рис. 4, внизу) технологиям. Визуальный анализ представленных на рисунке 4 результатов (профиль ЭТЗ) показывает, что в случае проведения работ с применением стандартной двухсегментной технологии (рис. 4, вверху), подошва второго слоя полученной модели проявляется не полностью, а третий слой не проявляется вообще, по сравнению с моделью, полученной для данных четырехсегментной технологии (рис. 4, внизу).

Для совместного анализа и комплексной интерпретации все геоэлектрические разрезы, построенные по результатам инверсии, были собраны в одну общую пространственную модель. Три фрагмента общей модели в виде изометрических проекций представлены на рисунке 5. Первый фрагмент (рис. 5, вверху) содержит результаты вдоль магистрального профиля ЭТ1 и пересекающих его профилей ЭТ4 и ЭТ5 (см. также рис. 1). Второй фрагмент – результаты для магистрального профиля ЭТ2 и пересекающих его профилей ЭТ5, ЭТ6, ЭТ7 (рис. 5, в середине), третий – для магистрального профиля ЭТ3 и пересекающих его профилей ЭТ7 и ЭТ8 (рис. 5, внизу).

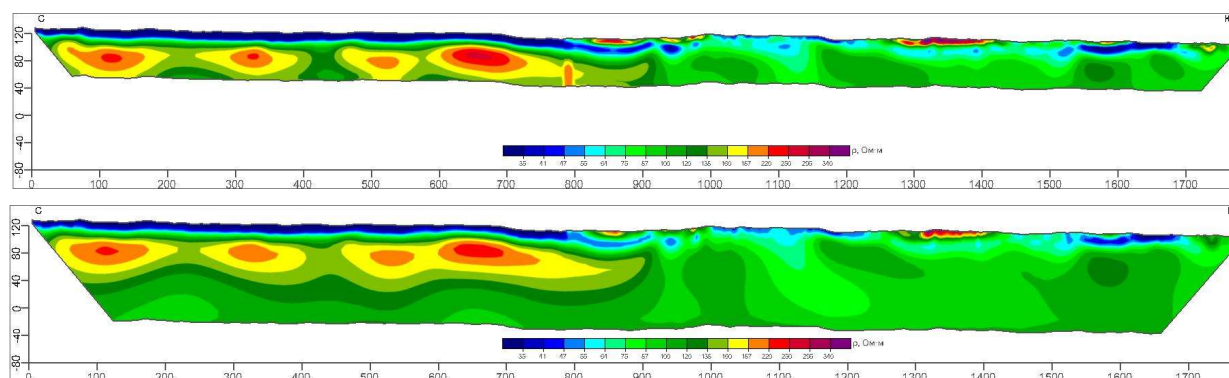
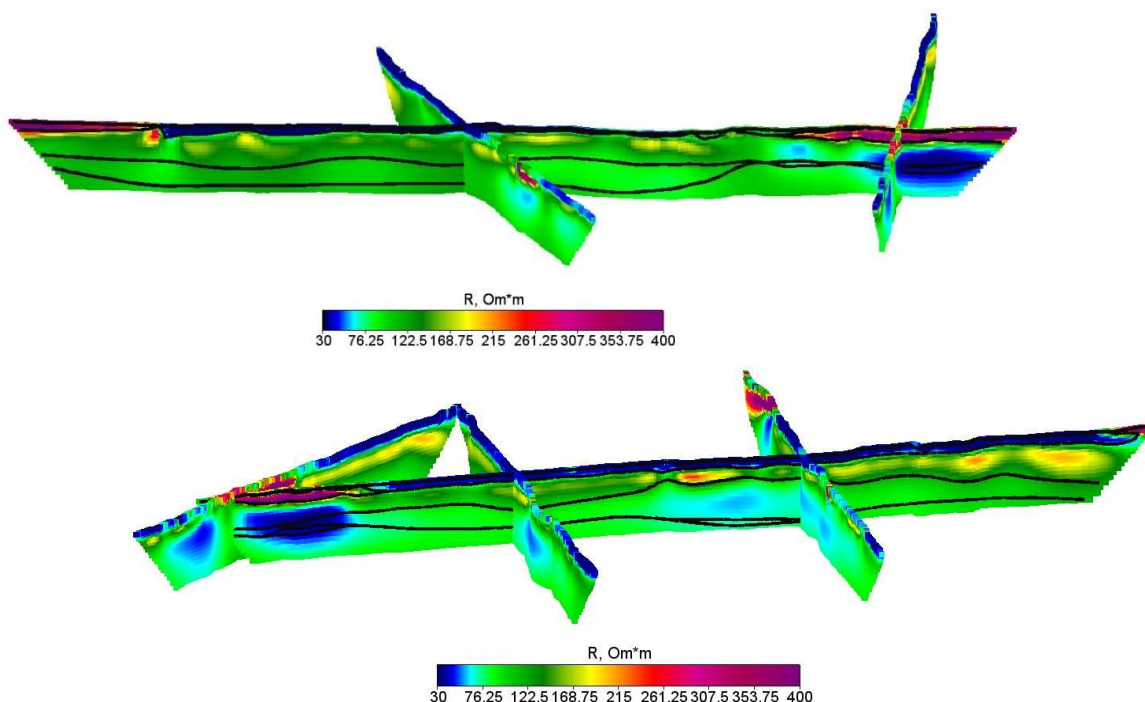


Рисунок 4. Результаты двумерной инверсии данных двухсегментных (вверху) и четырехсегментных (внизу) измерений вдоль профиля ЭТЗ (2022 г.)



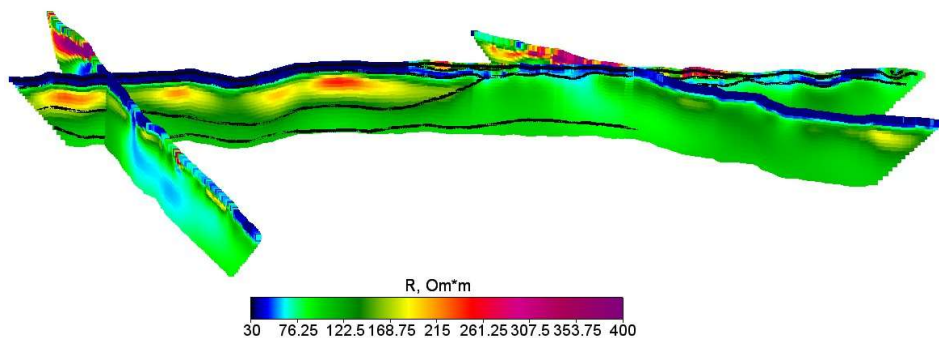


Рисунок 5. Фрагменты общей пространственной модели вдоль магистральных профилей ЭТ1 (вверху), ЭТ2 (в середине) и ЭТ3 (внизу) и пересекающих их (см. рис. 1) поперечных профилей (черные линии – границы слоев по результатам предварительной интерпретации)

Глубинность исследований составила 140 м. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о преимущественном распространении на участке работ трехслойной модели типа «К» с некоторыми изменениями удельного электрического сопротивления внутри каждого слоя (рис. 4, 5).

Верхний слой модели имеет мощность от 10 до 15 м и сопротивление до 50 Ом·м, сложен предположительно суглинками и песками с прослоями суглинков. Ниже залегает слой мощностью до 40-50 м и сопротивлением от 100 до 220 Ом·м, по геологическим данным соответствующий нижнетульскому водоносному горизонту (C_{1t1}). Он представлен песками с тонкими прослоями и линзами глин и углей. Нижний слой имеет сопротивление от 50 до 120 Ом·м и сложен водоносными известняками с прослоями глин (C_1). Незначительные изменения значений удельных электрических сопротивлений свидетельствуют о выдержанности фильтрационных свойств этих отложений в пределах участка работ.

Таким образом, при выполнении исследований реализованы основные преимущества четырехсегментной методики электротомографических измерений – увеличение глубинности и повышение детальности модели на средних глубинах по сравнению с двухсегментной методикой.

Полученные оценки удельных электрических сопротивлений терригенных водоносных отложений на всей исследованной территории соответствуют значениям сопротивлений обводненных песков, подошва которых располагается на глубине около 70 метров (и более). Незначительные пространственные изменения удельных электрических сопротивлений песков свидетельствуют о выдержанности фильтрационных свойств этих отложений в пределах участка работ.

Список литературы

1. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. [2006] Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14-17.
2. Большаков Д.К., Модин И.Н. [2015] Методика многосегментных электротомографических измерений. // В сб. мат. VII межд. научно-практ. конф. «Наука и образование в современном мире» (Москва, 25 декабря 2015 г), вып. 7. Изд. НИЦ ScienceCentre. М., 2015. – с. 11-17. (www.sciencecentre.ru)
3. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. [2017] Использование выносных линий для увеличения глубины исследования при проведении электротомографии // Инженерные изыскания. 2017. №1. С.46-53.
4. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. [2019] Многосегментная технология измерений методом электротомографии // Тезисы докладов Научной конференции «Ломоносовские чтения - 2019», Секция «Геология», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019 года (16.04.19, <https://conf.msu.ru/rus/event/5604/>, 7 стр.).
5. Шевнин В.А., Колесников В.П. [2011] Оценка глубинности ВЭЗ для однородной и слоистой среды // Электронный журнал «Георазрез». 2011. С. 1-8.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛОМНЫХ СТРУКТУР (НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО АЛТАЯ)

ИНГГ СО РАН

Введение

Опасные геодинамические процессы (землетрясения, оползни и пр.) зачастую связаны с тектоническими движениями по сейсмогенерирующим разломам. Повышенная сейсмическая активность влияет на хозяйственную деятельность населения, строительство, дорожную сеть и пр., поэтому исследование разломных структур является актуальной задачей. Кроме того, к разломным структурам бывают приурочены месторождения полезных ископаемых. Специалисты геологи методами геоморфологии изучают разломы на бортах впадин, в зонах активного орогенеза. В свою очередь обнаружение разломных структур в межгорных впадинах, перекрытых осадочными отложениями и невыраженных в рельефе, является задачей геофизических методов. Для исследований приповерхностной части геологического массива оптимально подходит метод электротомографии (ЭТ), имеющий высокую детальность, развитые технологии измерений и интерпретации. У авторов накоплен опыт наблюдений методами геоэлектрики в разломных зонах Горного Алтая, который свидетельствует, что при активизации деформационных процессов именно в этих зонах наблюдаются наиболее значимые изменения электропроводности всех горизонтов разреза, включая приповерхностные отложения (Неведрова и др., 2016). Метод ЭТ успешно используется в мировой практике при исследованиях в сейсмоактивных районах (Zhu et al., 2017; Sana et al., Турова и др., 2021).

Метод и аппаратура

Метод ЭТ основывается на дифференциации горных пород по удельному электрическому сопротивлению (УЭС), сочетая принципы зондирования и профилирования. УЭС - электрофизическая величина, характеризующая способность вещества препятствовать прохождению электрического тока. Высокая детальность метода ЭТ обусловлена небольшим шагом между электродами, каждый из которых может быть приёмным и питающим. При изучении разломных структур методом ЭТ использовалась многоэлектродная электроразведочная станция Скала48, разработанная в лаборатории электромагнитных полей в ИНГГ СО РАН. Аппаратура предназначена для выполнения электроразведочных работ методом сопротивлений и вызванной поляризации с применением методик электрического профилирования, вертикального электрического зондирования и электрической томографии (рис.1) (Балков Е. В. и др., 2012).



Рисунок 1. Многоэлектродная электроразведочная станция Скала48.

Обработка полевых данных проводилась с использованием программных средств Res2DInv (<http://geotomosoft.com/>) и ERTLab (<http://www.geostudisrl.com/>). Res2DInv - это компьютерная программа, с помощью которой можно построить двумерную (2D) модель распределения удельного сопротивления среды по данным электротомографии, а пакет программ ERTLab позволяет получить как 2D, так и 3D модели.

Примеры

Начиная с 2011 г. на территории Чуйской, Курайской и Уймонской впадин Горного Алтая полевым отрядом ИНГГ СО РАН с участием авторов проводятся исследования методом ЭТ. В основном используется 48-электродная установка Шлюмберже с шагом 5 м между электродами.

Чуйская впадина является крупнейшей межгорной впадиной Горного Алтая. По результатам проведенных измерений методом ЭТ на её территории в долине реки Мухор выделена зона с пониженными значениями УЭС (рис. 2) относительно вмещающей среды, соответствующая разломной структуре. Существование этого разлома подтверждается имеющимися геологическими данными известного геолога исследователя Горного Алтая И.Д. Зольникова (Зольников и др., 2010).

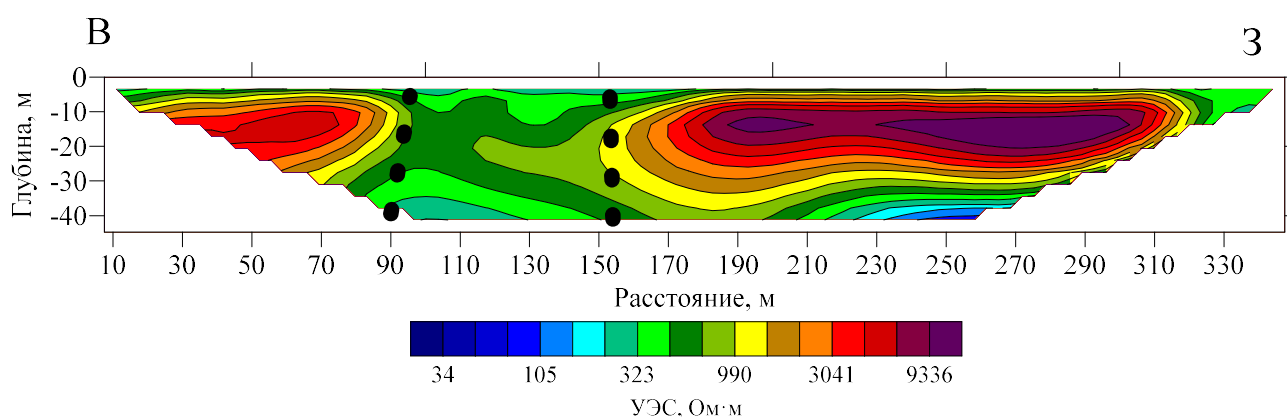


Рисунок 2. Геозлектрический разрез с разломной структурой по результатам инверсии данных электротомографии (п. Мухор-Тархата, Чуйская впадина, Горный Алтай).

Уймонская впадина также относится к крупным впадинам этого региона, но при этом наименее изучена. С севера её ограничивает Теректинский хребет, который отделяется от отложений впадины зоной Южно-Теректинского разлома северо-западного простирания. Характерной чертой строения этой зоны является наличие серий тектонических уступов. Измерения методом ЭТ около п. Маргала проводятся ежегодно на последнем тектоническом уступе на границе с отложениями впадины с учетом рельефа местности, начиная с 2015 года. По данным за 2020 г был построен геозлектрический разрез. На полученном разрезе в интервале профиля 100-180 м выделяется вертикальный блок с пониженными значениями сопротивлений, отнесенный к разломной структуре (рис. 3). Понижение УЭС, скорее всего, связано с повышенной трещиноватостью и обводненностью горных пород. Предполагается, что уступ выработан в деформированных за счет надвигания Теректинского хребта на Уймонскую впадину пестроокрашенных глинах неогена. Это подтверждено по данным скважины, пробуренной к западу от п. Маргала, у подножия Теректинского хребта, на глубине 62 м были вскрыты под толщей метаморфических сланцев теректинской свиты красно-бурые глины (Деев и др., 2012). На полученном здесь геозлектрическом разрезе наблюдается ещё один предполагаемый наклонный разлом в зоне уступа, для его обоснования необходимы измерения с более глубинной установкой.

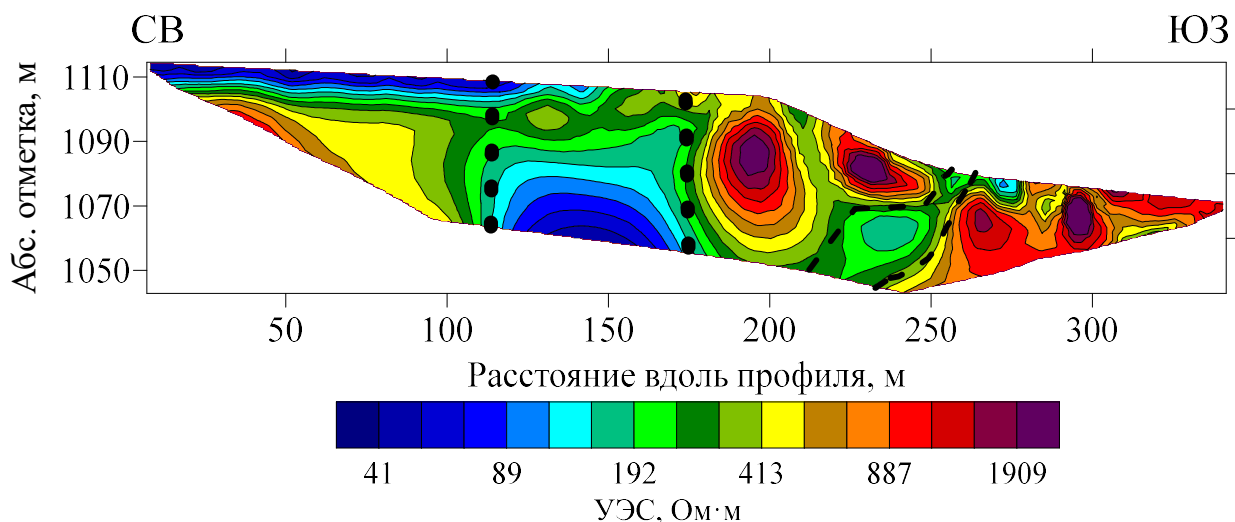


Рисунок 3. Геоэлектрический разрез с разломной структурой по результатам инверсии данных электротомографии (п. Маргала, Уймонская впадина, Горный Алтай).

В центральной части Курайской впадины были проведены измерения методом ЭТ по 4-м параллельным профилям с шагом между ними в 50 м. Профили проходят через уступ, хорошо выраженный в рельефе. С использованием программы ERTLab была построена 3-х мерная модель участка (рис. 4).

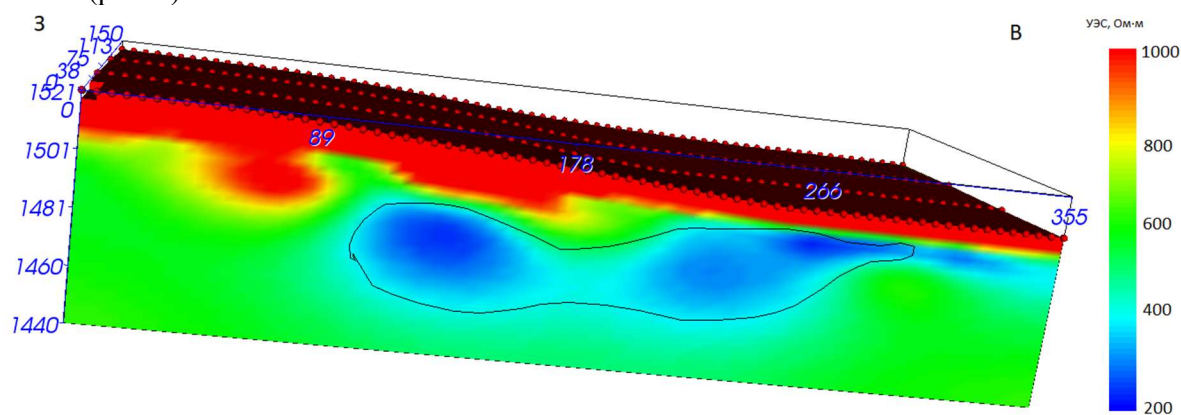


Рисунок 4. Геоэлектрическая модель с разломной структурой по результатам инверсии данных электротомографии (Курайская впадина, Горный Алтай).

На рисунке 4 показана модель с высокоомной верхней частью (УЭС до 1000 Ом·м) и проводящей зоной с понижением УЭС до 300 Ом·м, соответствующей разломной структуре в районе уступа.

Выводы

Определены геоэлектрические характеристики разломных структур Горного Алтая. Исследование основано на обработке и интерпретации полевых данных электротомографии с использованием численного моделирования на разных этапах работы и геологических данных. Можно отметить, что, все разломные зоны выделяются значимым понижением УЭС, на которое, безусловно влияет сейсмический режим исследуемой территории.

Метод электротомографии позволяет определять геоэлектрические характеристики структур, находящихся в верхней части разреза и выделить предполагаемые разломные нарушения. Далее для обоснования эти данных выполняется геологическая интерпретация с привлечением всех имеющихся априорных данных, включая тренчинг (проходку траншей и шурфов).

Благодарности

Работа выполнена в рамках базового проекта ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0025. Авторы благодарны д. г.-м.н. Е.В. Дееву за помощь в геологической интерпретации полученных данных

Библиография

1. Балков, Е.В., Панин, Г.Л., Манштейн, Ю.А., Манштейн, А. К., Белобородов В.А [2012]. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения. *Геофизика*, **6**, 54-63.
2. Деев, Е. В., Неведрова, Н. Н., Русанов, Г. Г., Санчаа, А. М., Бабушкин, С. М., Кречетов, Д. В., Ельцов, И.Н., Зольников, И. Д. [2012]. Новые данные о строении Уймонской межгорной впадины (Горный Алтай). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, **1**(9), 15-23.
3. Зольников, И. Д., Деев, Е. В., Лямина, В. А [2010]. Новые данные о четвертичном морфолитогенезе в Чуйской котловине (Горный Алтай). *Геология и геофизика*, **51**(4), 437-449.
4. Неведрова, Н. Н., Рохина, М. Г., Шалагинов, А. Е., Санчаа, А. М. [2016]. Анализ многолетних наблюдений методом нестационарного электромагнитного зондирования (на примере сейсмоактивной зоны Горного Алтая). *Горный информационно-аналитический бюллетень*, **12**, 190-212.
5. Sana, H., Taborik, P., Valenta, J., Bhat, F. A., Flašar, J., Štěpančíková, P., Khwaja, N. A. [2021]. Detecting active faults in intramountain basins using electrical resistivity tomography: A focus on Kashmir Basin, NW Himalaya. *Journal of Applied Geophysics*, **192**, 104395.
6. Turova, I., Deev, E., Pozdnyakova, N., Entin, A., Nevedrova, N., Shaparenko, I., Bricheva, S., Korzhenkov, A., Kurbanov, R., Panin, A. [2020]. Surface-rupturing paleoearthquakes in the Kurai fault zone (Gorny Altai, Russia): trenching and geophysical evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, **197**, 104399.
7. Zhu, T., Zhou, J., Wang, H. [2017]. Localization and characterization of the Zhangdian-Renhe fault zone in Zibo city, Shandong province, China, using electrical resistivity tomography (ERT). *Journal of Applied Geophysics*, **136**, 343-352.

References

11. Balkov, E.V., Panin, G.L., Manshteyn, Ju.A., Manshteyn, A. K., Beloborodov, V.A. [2012]. Electrotomography: equipment, technique and application experience. *Geophysics*, **6**, 54-63.
12. Deev, E. V., Nevedrova, N. N., Rusanov, G. G., Sanchaa, A. M., Babushkin, S. M., Krechetov, D. V., Eltsov, I.N., Zolnikov, I. D. [2012]. New data on the structure of the Uimon intermountain depression (Gorny Altai). *Geology and mineral resources of Siberia*, **1**(9), 15-23.
13. Nevedrova, N. N., Rohina, M. G., Shalaginov, A. E., Sanchaa, A. M. [2016]. Analysis of long-term observations by the method of non-stationary electromagnetic sounding (on the example of the seismically active zone of Gorny Altai). *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, **12**, 190-212.
14. Sana, H., Taborik, P., Valenta, J., Bhat, F. A., Flašar, J., Štěpančíková, P., Khwaja, N. A. [2021]. Detecting active faults in intramountain basins using electrical resistivity tomography: A focus on Kashmir Basin, NW Himalaya. *Journal of Applied Geophysics*, **192**, 104395.
15. Turova, I., Deev, E., Pozdnyakova, N., Entin, A., Nevedrova, N., Shaparenko, I., Bricheva, S., Korzhenkov, A., Kurbanov, R., Panin, A. [2020]. Surface-rupturing paleoearthquakes in the Kurai fault zone (Gorny Altai, Russia): trenching and geophysical evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, **197**, 104399.
16. Zhu, T., Zhou, J., Wang, H. [2017]. Localization and characterization of the Zhangdian-Renhe fault zone in Zibo city, Shandong province, China, using electrical resistivity tomography (ERT). *Journal of Applied Geophysics*, **136**, 343-352.
- Zolnikov I. D., Deev E. V., Ljamina V. A. [2010]. New data on Quaternary morpholithogenesis in the Chuya basin (Gorny Altai). *Geology and geophysics*, **51**(4), 437-449

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУРАХ ВУЛКАНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ И КАМЧАТКИ

1-ИНГГ СО РАН им. А.А.Трофимука, 2-ИВУС ДВО РАН

Введение

В докладе описан опыт совместного применения (2007-2012 гг.) приборов двух типов – электротомографии (ЭТ) и индукционного частотного профилирования (ИЧП) на примере нескольких приповерхностных объектов вулканогенного происхождения. Работы выполнены в рамках интеграционного проекта №96 СО РАН-ДВО-РАН. Основной целью работ было выявление структуры транспорта вещества близ поверхности. Одновременно решался вопрос о границах применимости аппаратуры индукционного профилирования по удельному электрическому сопротивлению на высоко контрастных средах. Работы были осложнены тем, что исследуемые объекты представлены не только твердыми, но и жидкими фазами, разрушающий контроль которых не сможет выявить картины близкой к объективной. Несмотря на различие принципов трансформации (ИЧП) и инверсии (ЭТ) результатов, акцент сделан на принципиальном их совпадении для двух методик.

В качестве объектов исследования были выбраны гидротермы активных вулканов Мутновский, Эбеко, а так же зоны кипящих котлов и активного рудообразования в кальдере Узон. Все перечисленные объекты относятся к Курило-Камчатскому региону. Исследуемые объекты сложены из пород, удельное электрическое сопротивление которых лежит в пределах от 50 Ом•м до 1000 Ом•м. Гидротермальные приповерхностные разгрузки, в виде высоко минерализованных растворов напротив, обладают гораздо более низким удельным электрическим сопротивлением.

Методика

Основываясь на теоретических расчетах оптимального геоэлектрического сопротивления среды [1] для комплекса аппаратуры АЭМП-14 (ЭМС) которое наиболее приближено к УЭС среды вулканогенных объектов. Работы выполнялись на площадках с шагом по профилям 1 м и с шагом по точкам измерения 1 м. Электротомография проводилась с использованием двух электроразведочных кабелей, общее количество электродов которых равнялось 48. Шаг между электродами для электрических зондирований был выбран 5 м, что связано с конструктивными особенностями кабеля для достижения максимальной глубинности. Во всех случаях использовались установки Шлюмберже. Для обеспечения наименьшего искажения кривых зондирования из-за рельефа, установки для методов постоянного тока были ориентированы вдоль склонов. Частотное профилирование выполнялось в наиболее интересных для совместной геохимической съемки местах. В основе интерпретации данных индукционного частотного профилирования лежал алгоритм трансформации описанный в работе [1]. Для методов сопротивлений использовались пакеты программ Res2Dinv.

Первый объект - **Донное фумарольное поле вулкана Мутновский**. На рис. 1 показано расположение профилей частотного профилирования (площадка красного цвета и направления линий профилирования синего) и пересекающие их профиль методов постоянного тока, который обозначен белой линией. Цифрами «0,0» обозначено начало координат площадки для АЭМП-14, а цифры в рамках показывают номера электродов электро-томографии на постоянном токе.

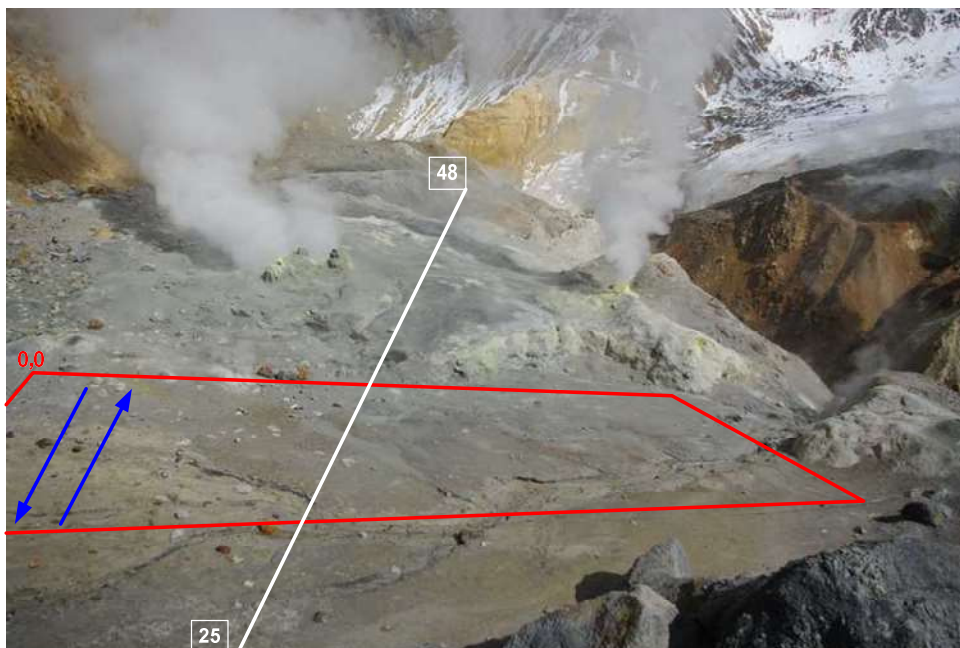


Рис. 1. Расположение профилей ИЧП (красная площадка) и профиль ЭТ (белый) на Донном Поле Северо-Восточного картера вулкана Мутновский.

Ситуация с разворачиванием профилей для зондирования методами постоянного тока осложнялась рельефом. Качество переходного заземления было достаточно для выполнения работ на постоянном токе и лежало в пределах от 2 кОм до 50 Ом. Для методики частотного профилирования важной была лишь агрессивность среды, поскольку рабочие площадки располагались в непосредственной близости от работающих фумарол. С учетом этого обстоятельства индукционная аппаратура была герметизирована.

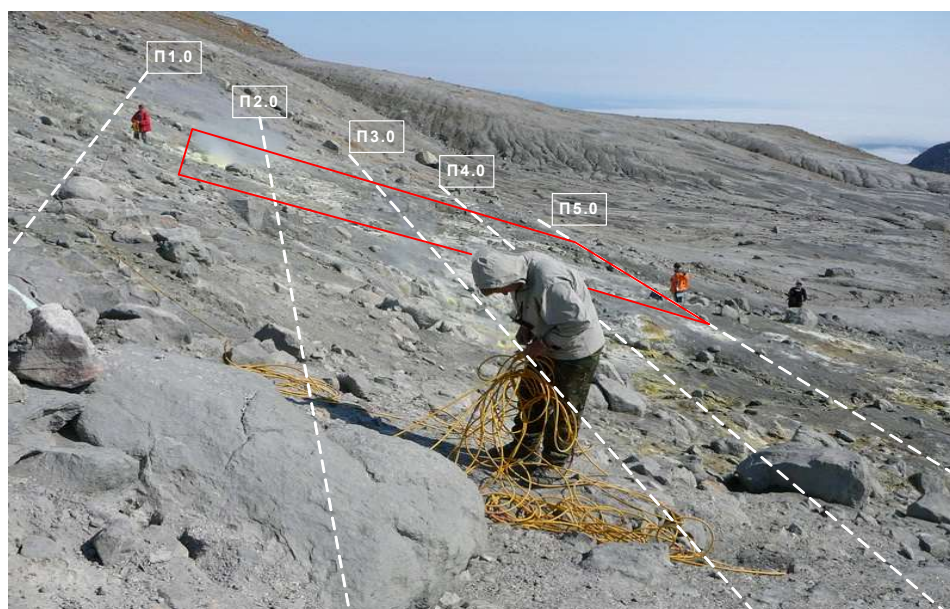


Рис. 2. Расположение профилей ИЧП (красная площадка) и профили ЭТ (белый пунктир) на Северо-Восточном поле вулкана Эбеко. Фото автора

Следующий объект – Северо-Восточное фумарольное поле вулкана Эбеко (о.Парамушир, Курилы). Профили частотного профилирования показаны на Рис. 2. Для сравнительных работ была выбрана площадка, располагающаяся на внутреннем северном склоне кратера. Площадка имеет зоны

кипящих котлов и зоны парогазовых выходов. Качество переходных заземлений для работ электротомографией лежало в пределах 50 Ом - 3кОм. Было построено 5 профилей (отмечены белыми линиями на рис. 2) с разном 235м и шагом между электродами 5 м. Такое количество профилей было выполнено с целью построить трехмерную картину внутреннего строения зон парогазовых резервуаров приповерхностного пространства Северо-Восточного поля. Методику частотного зондирования аппаратурой ЭМС было решено применить на площадке наиболее насыщенной котлами и фумаролами. Площадка индукционного частотного профилирования показана на рис. 2 красным прямоугольником. Она перекрывает поперек 4 профиля электротомографии и имеет в длину 35 м а в ширину 18 м. начало координат отстоит от центральной оси установок электротомографии на 5 м. Цифры «0.0» показывают начало координат для профилей ЧП, которые выполнялись параллельно профилям электротомографии.

В кальдере вулкана Узон были выполнены работы методикой индукционного профилирования (ИЧП) совместно с электротомографией. Наиболее характерный пример это работы на площадке Нефтяного Поля кальдеры [2] (рис. 3), где удалось удобно расположить оба типа профилей на одной линии. Для электротомографии был выбран максимально возможный разном 235м с шагом 5 метров между электродами и соответственно с таким же шагом и по той же линии был выполнен профиль частотного профилирования. Линия была выбрана так, что-бы пересечь интересующий геохимиков объект – Нефтяной Котел. На рис. 3 он находится в непосредственной близости от середины расстановки электротомографии. Начало профиля приходится на ручей Комариный [2] и обозначено цифрами «0.0». Качество переходных заземлений было достаточным для выполнения электротомографии и находилось в пределах 100 Ом – 2 кОм.



Рис. 3. Нефтяное поле кальдеры Узон. Расположение линии профилей частотного профилирования и электротомографии.

Обсуждение результатов

Вулкан Эбеко. Согласно результатам инверсии данных электротомографии и трансформации данных индукционного частотного профилирования, УЭС грунтов на рабочем участке Северо-Восточного поля колеблется в пределах 50 Ом*м – 100 Ом*м для электротомографии и от 1 Ом*м до 20 Ом*м для ИЧП. Это хорошо соотносится с электротомографией ввиду меньшей «глубинности» ИЧП [1], на таких глубинах нет сопротивлений порядка 50-100 Ом*м по данным электротомографии. Видимо, низкое удельное сопротивление среды связано с насыщенностью ее высокоминерализованными термальными растворами, а высокое с наличием вмещающих пород или газовой составляющей. Сравнение результатов трансформации данных частотного зондирования и результатов инверсии электротомографии в одинаковом масштабе, общей шкале УЭС и с привязкой по координатам показано на рис. 4. Немаловажным фактом, говорящим о качестве работы аппаратуры

ЭМС является то, что на принципиальном уровне УЭС по данным электротомографии совпадает с кажущимся УЭС в данных ИЧЗ. То есть, полученные геоэлектрические данные зондирования аппаратурой ЭМС отражают ту же картину. Для Северо-Восточного поля, по данным частотного зондирования явно выделяется не вертикальная, а скорее коническая структура подводящих каналов, которая указывает на близкое расположение парогазового резервуара, предположительно на глубине 5-8 метров (его местонахождение было получено по данным электротомографии но, описание выходит за рамки работы).

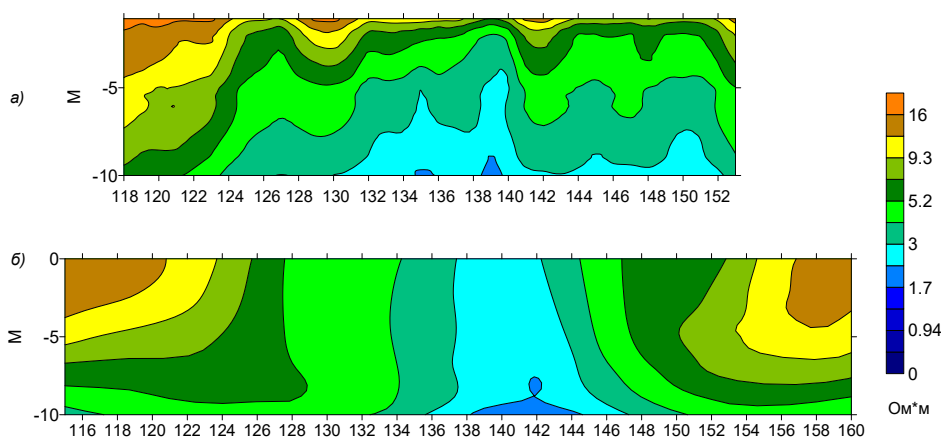


Рис. 4. а) Распределение кажущегося УЭС (результат трансформации) по профилю частотного профилирования и б) распределение УЭС по данным инверсии соответствующего участка профиля электротомографии площадки на Северо-Восточном поле вулкана Эбеко. Начало профиля ИЧП приходится на отметку 118 м для профиля электротомографии

Данные трансформации ИЧП для площадки кипящих котлов Донного Фумарольного поля вулкана Мутновский построены в равной шкале и с привязками относительно друг друга, сравнительные результаты инверсии электротомографии и представленные на рис. 5. Они отражают принципиальное совпадение в УЭС и кажущихся УЭС, а также его распределение подобное результатам для Северо-Восточного поля вулкана Эбеко. Кажущееся удельное электрическое сопротивление среды по данным ИЧП на Донном Поле менялось в пределах от 0.5 Ом*м до 95 Ом*м. По результатам электротомографии резервуар, питающий систему котлов и фумарол, не обнаруживается, однако видна структура подводящих путей.

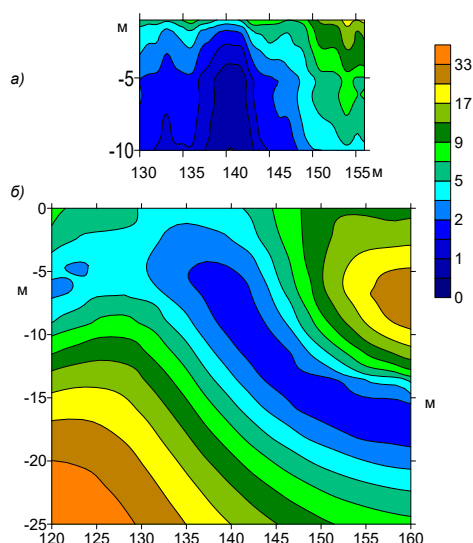


Рис 5. а) Распределение кажущегося УЭС по профилю частотного профилирования и б) распределение УЭС по данным инверсии соответствующего участка профиля электротомографии на площадке Донного Поля вулкана Мутновский

Результаты геоэлектрических работ по объекту Нефтяное Поле в кальдере Узон представлены на рис. 6. Удельное электрическое сопротивление среды, полученное методом инверсии данных электротомографии 0.5 Ом*м – 50 Ом*м, так же как и в предыдущем случае соответствует данным частотного профилирования. Отметка расстановки 120 м приходится на Нефтяной котел, видимый как на профиле ИЧП, так и на профиле электротомографии в виде антиклинальной структуры. Данные ИЧП дополняют верхнюю часть разреза для электротомографии.

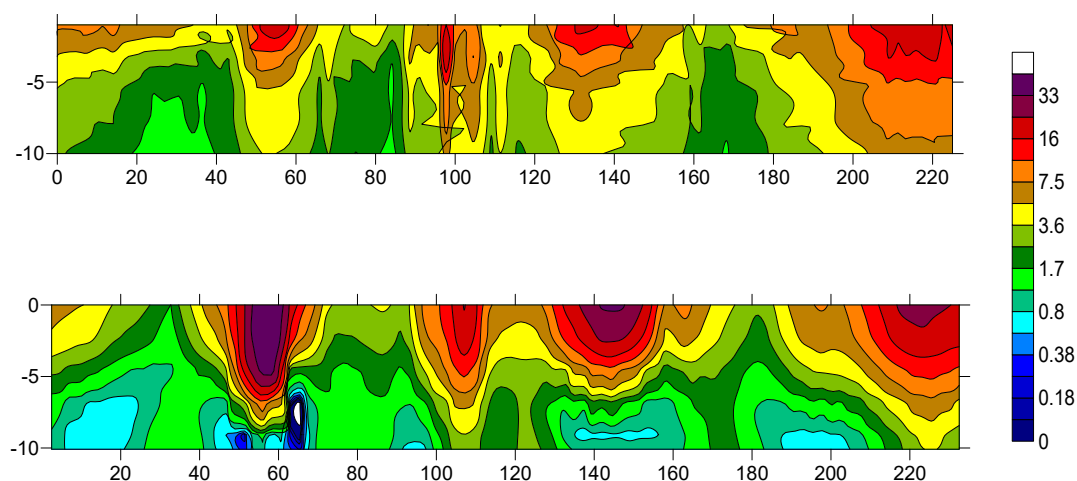


Рис. 6. а) *Распределение кажущегося УЭС по профилю частотного профилирования и б) распределение УЭС по данным инверсии соответствующего участка профиля электротомографии площадки на Нефтяном поле в кальдере Узон*

Выводы

Комплекс частотного электромагнитного профилирования (АЭМП-14) совместно с аппаратурой электротомографии (Iris и Скала-48) применялись для исследования структуры различных по составу газо-гидротермальных объектов вулканогенного происхождения. Без нарушения объектов были получены детальные карты, а также изоповерхности кажущегося удельного сопротивления. Кроме того, новые данные о структуре гидротермальных объектов помогли составить представление о зональности процессов разгрузки в верхней части разреза 5-30 м. Группирование методов контактного и бесконтактного неразрушающих типов контроля, которыми являются электротомография и частотное профилирование, дает дополнительную информацию, позволяющую составить представление об изменении структуры исследованных объектов с увеличением глубины и пространственном расположении гидротермальных резервуаров, зон парогазовой смеси, подводящих каналов фумарол и кипящих котлов. Немаловажным результатом работы является принципиальное совпадение результатов частотного профилирования и электротомографии в условиях высокого контраста среды с наличием низких УЭС, что полностью соотносится с теоретическими расчетами для использованной индукционной аппаратуры, которые описаны в [1].

Благодарности

Авторы выражают благодарности Ю.А. Манштейну, Ю.Г.Карину, С.Б. Бортниковой, С.П. Граховой.

Библиография

17. Балков, Е. В. Оценка глубинности наземного электромагнитного индукционного частотного зондирования / Е. В. Балков, М. И. Эпов, А. К. Манштейн // Геофизика.— 2006.— № 3. — С. 41–44.
18. Карпов, Г.А. Узон-Гейзерная гидротермальная рудообразующая система Камчатки / Г.А. Карпов, А.Л. Павлов. — Новосибирск: Наука, 1976.— 99 с.

19. Бобачев А. А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С.14-17.
20. Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования „ЭМС“ // Геология и геофизика. (2008). (Т. 49). (№ 6). (С. 571 – 579).
21. Манштейн Ю.А., Бортникова С.Б., Манштейн А.К. и др. Особенности строения проводящих каналов термальных источников вулкана Мутновский (Южная Камчатка) // Докл. АН. Геофизика. 2008. т. 423. № 3. С. 383-388.
22. Панин Г.Л., Котенко Т.А., Котенко Л.В. и др. Геофизико-геохимические исследования вулкана Эбеко (о.Парамушир) // Литосфера, 2010, № 3, с. 171–176.

This paper describes the experience of joint application (2007-2012) of two types of instruments - electrical resistivity tomography and electromagnetic profiling on the example of several near-surface objects of volcanic origin. The main purpose of the work was obtaining the structure of fluid transport near the surface. At the same time, the question of the applicability of the equipment for electromagnetic profiling by electrical resistivity in high-contrast soils was considered.

И.Н.Модин^{1,2}, А.Д. Скобелев^{1,2}, С.С. Рыбаков^{1,2},
И.В.Лыгин¹, К.М.Кузнецов¹, Д.А.Арутюнян¹, А.Д.Шкляр¹

КОМПЛЕКСНЫЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ И ГРАВИРАЗВЕДОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СВАЛКЕ ХИМИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

1-МГУ имени М.В. Ломоносова, 2- ООО «НПЦ Геоскан», г.Москва

Введение

Для изучения структуры старой свалки с целью ее ликвидации, построения геолого-геофизической модели, оценки объема и распространения вредных химических отходов выполнены комплексные геофизические исследования на одном из шламонакопителей, расположенных на Европейской территории РФ. Из-за трудностей выполнения съемок непосредственно на территории свалки, исследования выполнены в зимний период.

Гравиметрическая съемка выполнена с использованием гравиметров Scintrex CG5 Autograv (Scintrex Ltd.). Согласно рекомендациям Руководства по эксплуатации гравиметров Scintrex CG-5 непосредственно перед полевыми работами проведена калибровка датчика угла наклона (XY offset), установлена минимальная чувствительность к углу наклона (XY sens) и уточнены коэффициенты смещения нуля-пункта (drift).

Плановая и высотная привязка гравиметрических пунктов наблюдений выполнена непосредственно при проведении полевых работ с помощью дифференциального DGPS приемника Trimble GNSS R8. Система координат при сборе данных – географическая в системе координат WGS-84. Высокоточная наземная гравиметрическая съемка выполнена в профильном (первый этап) и площадном (второй этап) вариантах. На первом этапе выполнена гравиметрическая съемка на двух профилях север-северо-восточного и запад-северо-западного простирания с пересечением в центре шламонакопителя с целью подтверждения проявленности объекта в аномальном гравитационном поле. Средний шаг по профилю 10 м. Общая протяженность профилей 600 м. Общее количество пунктов 61 шт. По результатам съемки выявлен минимум аномалий поля силы тяжести над шламонакопителем.

На втором этапе выполнена площадная съемка по десяти параллельным профилям субширотного простирания, девять из которых полностью совпадают с профилями электроразведочных исследований. Профиль №1 вынесен на север за пределы от шламонакопителя в безаномальное поле.

Средняя длина гравиметрических профилей площадной съемки 235 п.м. Среднее расстояние между пунктами наблюдений на профилях площадной съемки составило 10 м и расстояние между профилями 10-20 м (см. Рисунок 2).

Гравиметрическая съемка выполнена по методике однократных наблюдений относительно единственной опорной точки (ОГП №0), расположенной вне контура открытой части шламонакопителя. Для учета поправки за смещение нуль-пункта гравиметров гравиметрические звенья начинались и заканчивались на опорной точке. Длительность звеньев не превышала 5 часов. Максимальное смещение нуль-пункта гравиметра за одно звено составило 0.01мГал за 5 часов.

Гравиметрическая съемка выполнена во второй половине зимнего сезона, что обусловило большое количество снега на участке работ. С целью минимизации влияния снежного покрова гравиметрическая съемка выполнена на реальной физической поверхности земли. Последнее обстоятельство потребовало значительных физических и временных затрат для удаления снега на гравиметрических пунктах. Гравиметрические работы выполнялись при отрицательных температурах, что, однако, не сказалось на окончательной точности гравиметрических работ.

Обработка данных и составление каталога значений приращений силы тяжести, полученных в результате съемки, заключались во введении поправок и вычислении аномалий силы тяжести в редукции Буге.

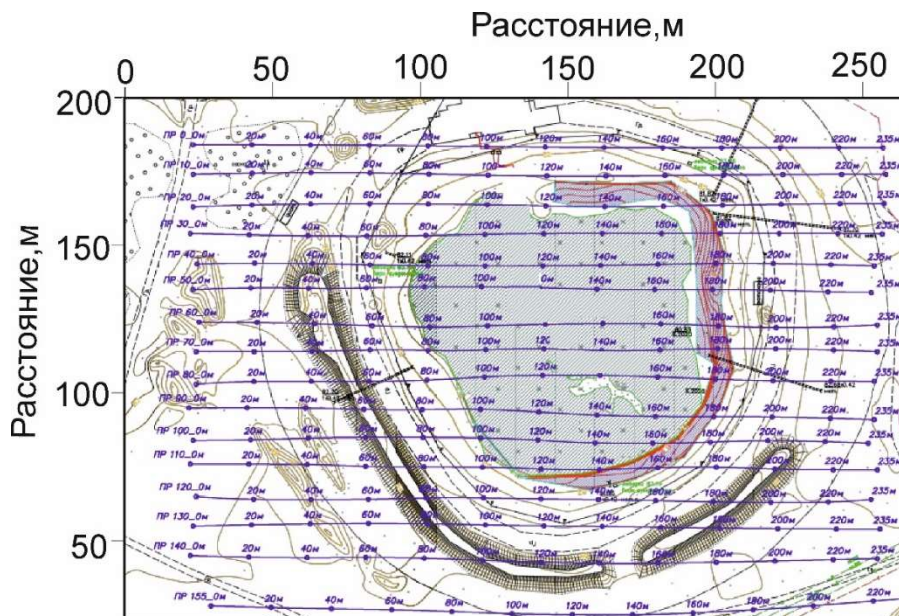


Рисунок 1. Схема размещения электроразведочных профилей.

Особенности геологического строения участка работ

В геологическом отношении верхняя часть разреза дочетвертичных отложений характеризуется наличием двух типов горных пород:

1. отложения нижнего палеогена P_{1ug1} представлены алевролитами, прослоями глин, редко мергеля, включениями гипса,
2. ниже расположены отложения, мощность которых составляет от 78 до 140 м, представленные доломитами и линзами гипса.

Верхняя часть строения участка чрезвычайно благоприятна для развития карстово-суффозионных процессов. При этом карст развивается по гипсам, ангидритам, карбонатным породам, которые находятся на глубинах порядка 40-50 м. А суффозия песков приводит к значительным перемещениям дисперсных грунтов и в результате ведет к просадкам на поверхности земли. Структура исследуемой свалки – одна из многих подобных структур. Стометровый диаметр воронки указывает на значительный объем карстовой полости в сульфатно-карбонатной части разреза.

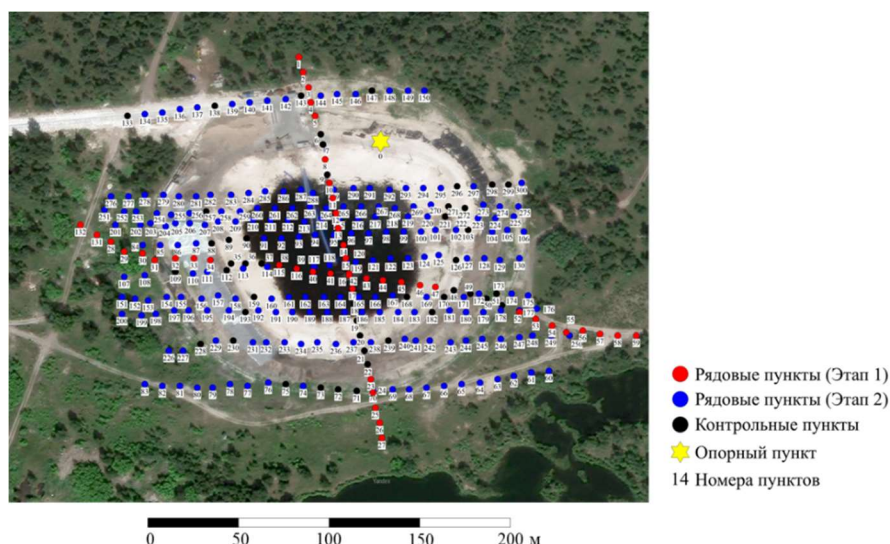


Рисунок 2. Схема пунктов гравиметрической съемки

Результаты электроразведочных работ

Геоэлектрические разрезы, полученные в результате инверсии (Loke, 2009, LokeandBarker, 1996a, b) данных (Рисунок 3), достаточно контрастны. Диапазон удельных сопротивлений составляет от 1 до 1000 и более Ом·м. По результатам интерпретации выделено пять слоев.

- Слой 1. Представлен относительно плотным, вязким веществом с удельным сопротивлением более 600 Ом·м. Мощность слоя достигает порядка 2-5 м. Снизу он подстилается переходным слоем, смешанным с песком. Удельное сопротивление этого слоя меняется от 10 до 100 Ом·м.
- Слой 2. Местами мощность слоя достигает нескольких метров. Распространен в пределах первого слоя. Удельное сопротивление составляет от 100 до 600 Ом·м.
- Слой 3. Выделен по высоким значениям проводимости. Электрическое сопротивление слоя составляет первые Ом·м. Мощность слоя достигает 10 метров.
- Слой 4: Слой высокого удельного сопротивления более 150 Ом·м, расположен вне открытой поверхности шламонакопителя, сложен песками, мерзлыми (зимой) в приповерхностной части разреза. Мощность слоя составляет порядка 4-7 метров.
- Слой 5: Слой имеет удельное сопротивления грунта порядка 20-150 Ом·м, сложен песками с включением глинистого материала и залегает субгоризонтально на западной и восточной части участка. Мощность слоя меняется от 6 до 15 м. Основание разреза представлено слоем с удельным сопротивлением более 150 Ом·м.

На рисунке 3 представлен геоэлектрический разрез по результатам двумерной инверсии данных.

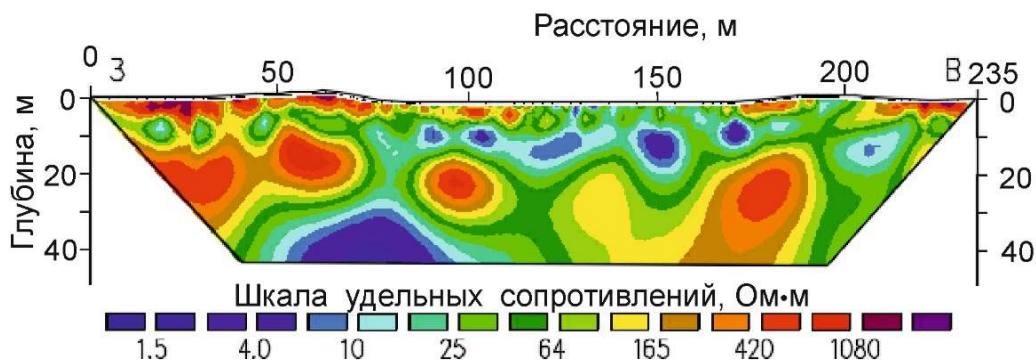


Рисунок 3. Геоэлектрический разрез по профилю 30.

Оценка плотности рельефообразующих пород

На пунктах гравиметрической съемки перепад рельефа составляет 5.6 м. Основные перепады рельефа обусловлены искусственным валом вокруг шламонакопителя. Средняя ширина вала составляет 20 м, средняя высота – 2.5 м. Для минимизации эффекта дневного рельефа в аномалии поля силы тяжести введена топографическая поправка с истинной плотностью рельефообразующих пород. Оценка плотности рельефообразующих пород выполнена в двумерном и трёхмерном вариантах.

Двумерная оценка плотности рельефообразующих пород выполнена по методу Неттельтона в ходе минимизации корреляции между аномалиями Буге и дневным рельефом на профиле №2. Минимальная корреляция наблюдается при значении плотности 1,5 г/см³, которая и определена как рельефообразующая (Рисунок 4).

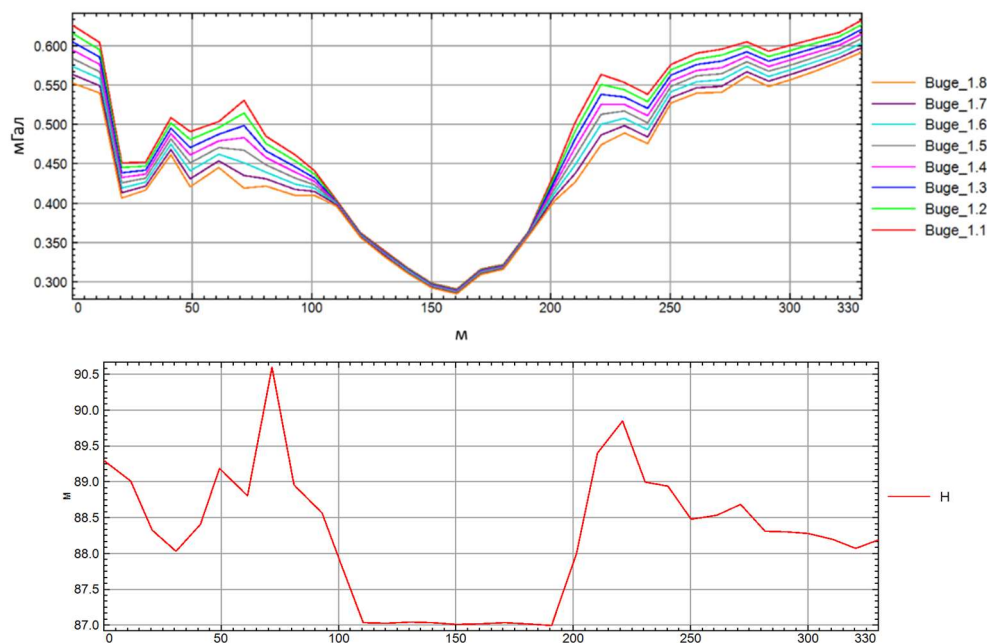


Рисунок 4. Аномалии поля силы тяжести в редукции Буге с разными плотностями промежуточного слоя (сверху) и изменение высот (снизу) на профиле №2

Кроме этого, оценка плотности рельефообразующих пород выполнена по трехмерному подбору. При этом значение плотности составило 1.44 г/см³.

На карте аномалий Буге (Рисунок 5) отчетливо выделяется отрицательная аномалия в центре площади над шламонакопителем. Амплитуда аномалии 0.2 мГал. Форма аномалии изометричная, ее размер по зоне максимального градиента поля составляет в направлении юг/север 90 метров, запад/восток – 120 метров.

Плотности поверхностного вещества в шламонакопителе

В период полевых работ были отобраны образцы вещества с видимой части шламонакопителя. Поскольку работы проводились в зимний период, то удалось отобрать образцы именно из центральной части накопителя в проталине. Вещество по консистенции напоминает резину черного цвета с явным присутствием флюидов, присутствует резкий запах.

Определение плотности образца выполнено с помощью весов AND DX-1200 (Япония) следующим путем:

- на высокоточных весах измерен вес мерного стакана;
- проведены измерения массы воды в мерном стакане объемом 100 мл;

-проведены измерения массы вещества в мерном стакане объемом 100 мл;

-путем математических преобразований (пропорции), зная плотность воды, равную 1 г/см³, получаем плотность самого вещества.

Измерения проводились три раза для достоверности полученных результатов. Результаты измерений: 1.32 г/см³; 1.29 г/см³; 1.3 г/см³. Отсюда получаем результат измерения плотности одного образца – 1.3 ± 0.015 г/см³.

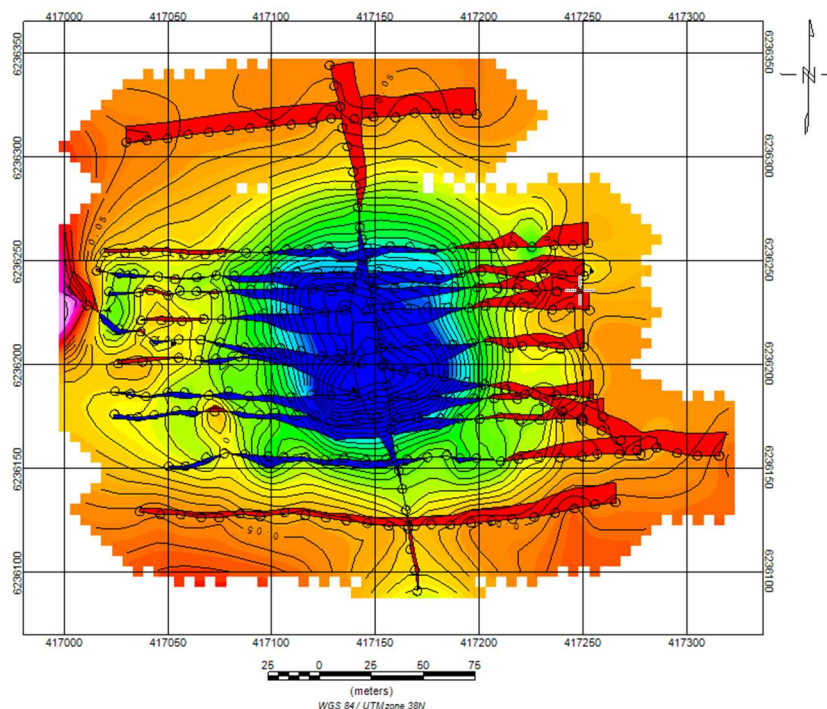


Рисунок 5. Карта графиков аномалий поля силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 1.5 г/см³

К сожалению, проведенных измерений недостаточно для формирования концепции распределения плотности в шламонакопителе, тем более что полевые электроразведочные работы доказали гетерогенность электрических параметров шлама. Для сопоставления полученного значения плотности и дальнейшего анализа в табл.1 приведена плотностная характеристика осадочных горных породы искусственных и естественных веществ. Можно отметить, что столь низких значений достигают только глины и сухие пески.

Таблица.1. Плотности осадочных горных пород, искусственных и естественных веществ

Горные породы	Пределы изменения плотности, г/см ³	Горные породы	Пределы изменения плотности, г/см ³
Глинистые		Карбонатные	
Глина	1.2 - 2.4	Мергель	2.5 - 2.8
Аргиллиты	1.7 - 2.9	Известняк	1.8 - 2.9
Глинистый сланец	2.3 - 3.0	Доломит	1.9 - 3.0
Обломочные		Гидрохимич., кремнист.	
Песок сухой	1.3 - 1.6	Гипс	2.1 - 2.5
Песок водонасыщенный	1.6 - 2.0	Ангидрит	2.4 - 2.9
Алеврит	1.8 - 2.8	Каменная соль	2.2 - 2.3
Песчаник	2.0 - 2.9	Опока	1.0 - 1.6
Конгломерат	2.1 - 3.0	Кремень	2.3 - 2.6

Плотностное моделирование

В ходе камеральных исследований с опорой на лабораторные определения плотности выполнена оценка массы и объема вещества шламонакопителя по гравиметрическим данным с помощью приближения тела цилиндрической формы и трехмерного моделирования.

Трехмерное плотностное моделирование выполнено в программном комплексе GravMagInv3D (gravmaginv.ru) с использованием оригинальных алгоритмов трехмерного подбора плотностных моделей [Чепиго, 2020].

На первом этапе плотностного моделирования оценена форма аномалообразующего объекта с учетом априорной информации о плотностях горных пород и поверхностного вещества в шламонакопителе.

Далее выполнен подбор распределения избыточных плотностей в пределах подобранной на первом этапе области с учетом увеличения плотности вещества шламонакопителя и его латеральной неоднородности [Чепиго и др., 2022] (Рисунок 6).

Для оценки массы объекта плотность вмещающей среды принята постоянной и равной 2 г/см³. Плотность вещества накопителя варьирует от 1.15 до 1.45 г/см³. Общая масса объекта, полученного в результате трехмерного моделирования, составляет 175 тыс. тонн. Полученные результаты являются неокончательными, поскольку отсутствуют реальные сведения о плотности вмещающей среды и химикатов. В то же время оценки, полученные по независимым гравиметрическим методикам, четко указывают на порядок масс наименее вязкой фракции шламонакопителя.

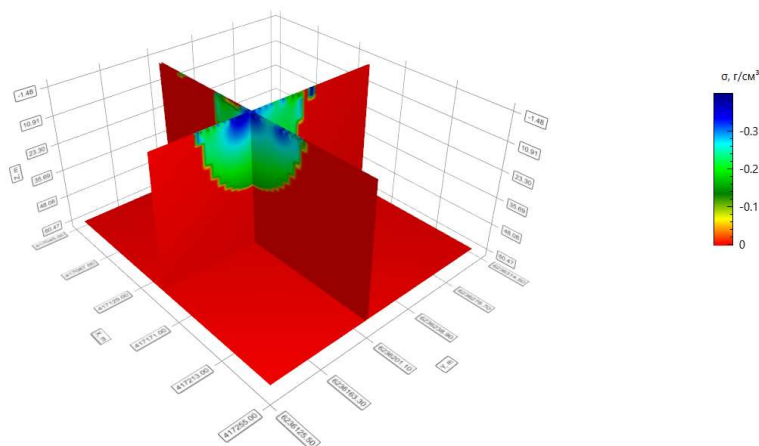


Рисунок 6. Распределение избыточных плотностей по результатам трехмерного плотностного моделирования

Заключение

По результатам работ была проведена интерпретация электротомографических и гравиметрических данных, построены карты мощностей выделенных слоев, подсчитан объем 4-х слоев. В верхней части геоэлектрического разреза фиксируется пять слоев. Гравиразведка показала высокую эффективность применения для выделения полного веса аномалообразующего объекта, а именно всей области загрязнения (область не естественного происхождения), которая отличается плотностными характеристиками от вмещающей среды. Основную проблему составляет вещество слоя 1, находящееся на поверхности шламонакопителя, имеет мощность порядка 2-5 м. Общая масса объекта, оцененная в результате трехмерного плотностного моделирования, составляет 175 тыс. тонн.

Библиография

Бобачев, А. А., Горбунов, А.А., Модин, И.Н., Шевнин, В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. Приборы и системы разведочной геофизики. 2006, N02, 14-17.

Модин, И.Н., Марченко, М.Н., Бобачев, А.А., Андреев, М.А., Шевнин, В.А. Инструкция по электротомографии с аппаратурой «Омега -48», М., 2009 г

Отчетная техническая документация по инженерным изысканиям Часть 2 «Инженерно-геологические изыскания»; Книга 5 «Геофизические работы»; 1411Г-ГСМ/2011/15/17613-

3164-ИИ 2.5.

Электроразведка. Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. По ред. проф. Хмелевского В.К., доц. И.Н. Модина и доц. А.Г. Яковлева. Москва, 2005.

Чепиго, Л.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615095 GravInv3D, 14 мая 2020

Чепиго Л.С., Лыгин И.В., Булычев А.А. Решение обратной задачи гравirazведки с переменной скоростью градиентного спуска // Геофизические исследования, 2022, том 23, No 1, с.5-19. <https://doi.org/10.21455/gr2022.1-1>

Loke, M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys // 2009, 144 p.

Loke, M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting, 1996, N44 (1), p. 131–152.

Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques // Geophysical Prospecting, 1996, N44(3), p. 499–524.

RES2DINV ver. 3.58. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. GEOTOMO SOFTWARE, Malaysia, 2009.

И. Д. Ефремов , Д. К. Большаков, И. Н. Модин

ОСОБЕННОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДАННЫХ ЕСТЕСТВЕННОГО ПОЛЯ ИЗ ПОЛЕВЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ

¹Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

При первичной обработке полевых электротомографических записей амплитуды значений разности потенциалов, измеренных в моменты пропускания импульсов тока, вычисляются относительно значений разности потенциалов, измеренных для соответствующих пауз в пропускании тока. Модули вычисленных амплитуд используются для расчета кажущегося сопротивления [Бобачев и др., 2010]. Значения разности потенциалов, соответствующие паузам в пропускании тока, фактически являются значениями градиента естественного поля (ЕП) и могут использоваться для интерпретации аналогично данным, получаемым при проведении измерений классическим методом ЕП [Семенов, 1980]. Примеры определения местоположения искусственных объектов по результатам интерпретации данных естественного поля, извлеченных из полевых записей электрических зондирований встречаются в литературе [Бобачев и др., 2018].

Извлечение постоянной составляющей из сигналов, измеряемых электроразведочной станцией при проведении электротомографических работ, требует наличия специального программного обеспечения. Авторами использовалась специальная программа обработки полевых записей метода электротомографии («ert2txt021112sp», автор А.А. Бобачев, www.geoelectric.ru), которая позволяет дополнительно получать значения постоянной составляющей (значения градиента ЕП на приемных электродах) для каждой строки протокола измерений, для каждого вычисления кажущегося сопротивления. В результате обработки полевых записей метода электротомографии с использованием указанной программы, в текстовом файле результатов к каждому расчету кажущегося сопротивления добавляется дополнительное значение, – осредненное (в зависимости от числа накоплений при записи) значение градиента естественного поля на приемных электродах [Ефремов и др., 2022].

В настоящее время авторами при проведении полевых работ методом электротомографии по стандартной двухсегментной методике [Модин и др., 2017] используется протокол измерений со встречными трехэлектродными установками, содержащий 1578 строк (измерений) для четырех приемных линий разной длины (5, 15, 25 и 45 м). Изображенное

схематично множество измерений для трехэлектродной установки mnV (**Рисунок 1**) дает общее представление о количестве, условном расположении (вдоль профиля и по глубине) проекций точек записи для каждой из четырех приемных линий. Отметим, что на каждой приемной линии выполняется несколько измерений в соответствии с выбранным количеством разносов. Так, например, для приемной линии длиной 25 м максимальное количество разносов и соответствующих им измерений в левой части расстановки достигает двенадцати, и убывает до нуля в правой части расстановки. Убывание числа измерений продемонстрировано на **Рисунке 1** и для других приемных линий.

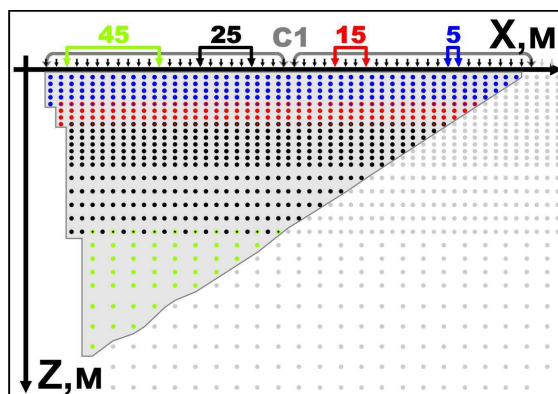


Рисунок 1. Схематичное изображение области исследования (серый цвет) трёхэлектродной установкой mnV и проекций точек записи приемных линий разной длины для двухсегментной расстановки

Для трехэлектродной установки Amn аналогичное условное распределение проекций точек записи выглядит симметрично относительно вертикальной линии, проходящей через центр расстановки (**С1** на **Рисунке 1**), а уменьшение числа измерений для всех приемных линий происходит в левой части расстановки. Таким образом, в результате специальной обработки электротомографических записей для каждого положения одной приемной линии извлекается набор из нескольких значений градиента естественного поля.

Дополнительное увеличение количества измерений (в два раза) на каждой приемной линии обусловлено передвижением расстановки вдоль профиля наблюдений с перекрытиями, как правило, в половину длины расстановки [Бобачев и др., 2006]. Наличие множества измеренных значений для каждого пикета профиля является очень важной особенностью, которая создает благоприятную ситуацию для проведения анализа и последующей обработки данных на основе вероятностно-статистического подхода, с получением статистических оценок самих значений градиента естественного поля, оценок их точности и достоверности. Эта особенность технологии электротомографии, связанная с многократным повторением измерений на одной приемной линии, порождает высокую плотность извлекаемых данных естественного поля и большое их количество в каждой точке опробования. При этом измерения проводятся параллельно с измерениями метода электротомографии и за более короткое время, по сравнению с измерениями классическим методом ЕП. Необходимо отметить, что такой способ получения данных о естественном поле не только технологичнее и рациональнее классической методики, но и открывает дополнительную теоретическую возможность изучения «меняющихся во времени естественных полей» [Семенов, 1980], природа которых в настоящее время до конца не ясна. Еще одним важным моментом является практическая возможность сопоставления данных, полученных без дополнительных затрат для нескольких (четырех) приемных линий разной длины. Аналогичное сопоставление получаемых по этим данным результатов обработки, их совместный анализ и последующая интерпретация увеличивают достоверность и значимость окончательных выводов.

Отсутствие специального программного обеспечения для первичной обработки, анализа и визуализации данных о естественном поле, извлекаемых из электротомографических записей затрудняет их подготовку к интерпретации. В настоящем сообщении приведены результаты

первичной обработки значений градиента естественного поля, извлеченных из фрагмента данных метода электротомографии длиной около 600 м, полученных вдоль профиля в районе Звенигородской биологической станции имени С.Н.Складовского биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова летом 2017 года [Большаков и др., 2018]. Общая длина профиля составила около 1300 м. Электротомографические измерения выполнены по трехсегментной технологии с шагом 5 м между размещенными вдоль профиля свинцовыми электродами.

Наличие нескольких физических измерений градиента естественного поля для каждого пикета позволяет уменьшить влияние ураганных выбросов путем применения медианного осреднения, а также визуализировать полевые данные для первичного анализа. Представленные на **Рисунке 2** четыре графика значений градиента естественного поля, полученные по данным электротомографических измерений (шаг по профилю равен шагу между электродами расстановки электротомографии, - 5 м) трехэлектродной установкой mnV с длиной приемной линии 5 м на четырех расстановках, визуально совпадают.

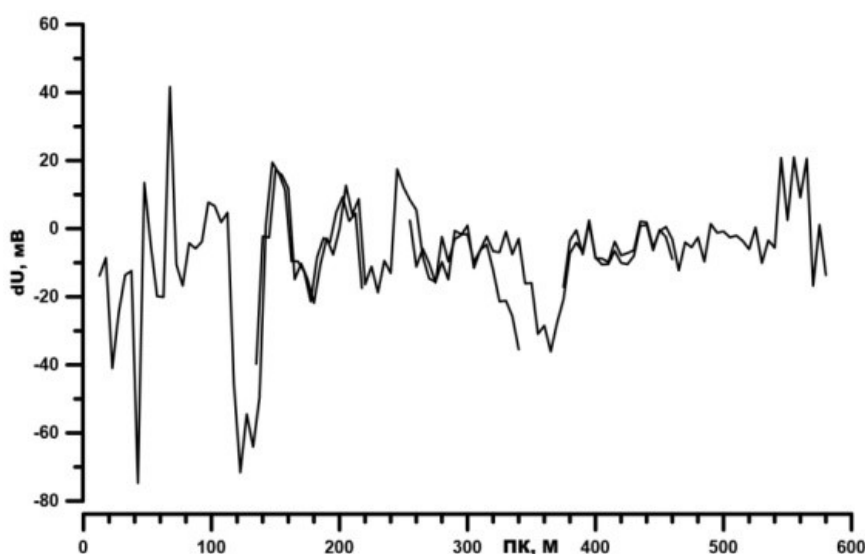


Рисунок 2. Графики значений градиента естественного поля, извлеченные из данных электротомографических измерений трехэлектродной установкой mnV ($mn=5$ м)

Несмотря на удовлетворительное совпадение представленных графиков, хорошо заметны участки, на которых графики расходятся. Например, на отрезке ПК 320 – ПК 360 м. Максимальное расхождение графиков (около 40 мВ) наблюдается на отрезке ПК 130 – ПК 140 м. Эти и другие, менее значительные расхождения, могут быть связаны как с уменьшением количества измерений на концах сегментов (см. **Рисунок 1**), так и с влиянием сторонних факторов. Необходимо отметить, несмотря на присутствие шумов, в представленных результатах «угадываются» характерные для данных метода ЕП, полученных по классической методике градиента, двузнаковые аномалии. Следовательно, данные о естественном поле, извлеченные из полевых записей метода электротомографии, могут использоваться для интерпретации и получения значимых практических результатов.

Для всех значений градиента естественного поля, извлеченных из данных электротомографических измерений на одной двухсегментной расстановке (ПК 120 – ПК 355 м), которая включает указанные выше отрезки с расхождениями графиков на **Рисунке 2**, вычислены значения отклонений от соответствующих медианных значений (на каждом пикете для всех четырех измерительных линий). Результаты этих вычислений представлены на **Рисунке 3** в виде гистограммы, а графики значений градиента естественного поля для приемных линий длиной 5, 15, 25 м этой расстановки представлены на **Рисунке 4**. Приведенная на **Рисунке 3** гистограмма построена по всем 1578 отклонениям с минимальным значением отклонения минус 213 мВ и максимальным – плюс 318 мВ (21 интервал, длина интервала 26 мВ). Ярко выраженный максимум гистограммы и его ширина (от минус 20 мВ до плюс 20 мВ) показывают, что большая часть (87%) из 1578 значений отклоняется от

соответствующей медианы на величину, не превышающую по модулю 20 мВ.

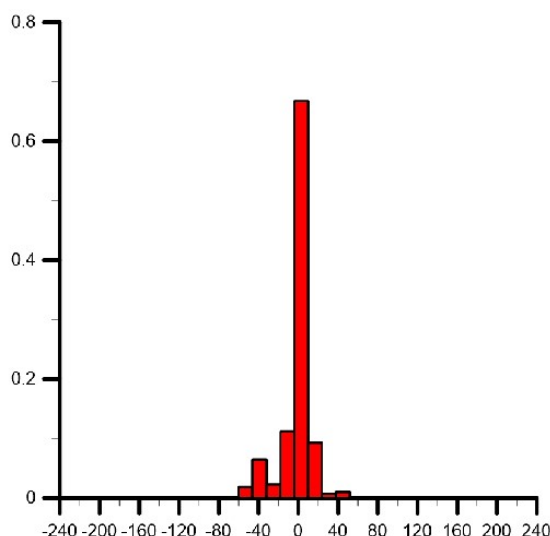


Рисунок 3. Гистограмма отклонений градиента естественного поля от медианного значения

Из этих 87% значений только около 20% отклоняются на величину от 10 мВ до 20 мВ по модулю, а большая часть, – 67%, – из этих отклонений не превышает по модулю 10-13 мВ. Из оставшихся 13% отклонений, превышающих по модулю величину 20 мВ, на ураганные выбросы с отклонениями более 60 мВ по модулю приходится 2% значений. Представленные на **Рисунке 4** графики значений градиента естественного поля удовлетворительно согласуются друг с другом для каждой измерительной линии, а на некоторых отрезках профиля, при расхождении абсолютных уровней,

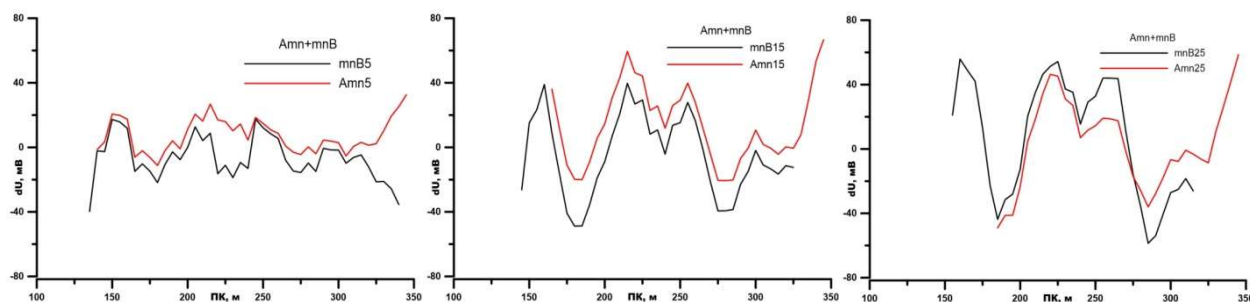


Рисунок 4. Графики значений градиента естественного поля, извлеченные из данных электротомографических измерений встречными трёхэлектродными установками с длинами приемных линий 5 м (слева), 15 м (в центре) 25 м (справа)

относительные изменения соответствующих значений градиентов совпадают «с точностью до деталей», как отмечалось А.С.Семеновым [Семёнов, 1980]. Наблюдаемые визуально различия в средних значениях графиков (абсолютных уровнях) для встречных установок, в основном, не превосходят 10 мВ. При увеличении длины приемной линии возрастает общий размах графиков.

На **Рисунке 5** представлены совместно графики значений градиента естественного поля одной расстановки, извлеченные из электротомографических данных полученных с трехэлектродной установкой mnB на четырех приёмных линиях разной длины (5, 15, 25 и 45 м). График для приемной линии длиной 45 м имеет наименьшую длину, а для mn=5 м – наибольшую, в соответствии с указанным на **Рисунке 1** условным расположением проекций точек записи (цвета графиков и проекций точек записи на рисунках совпадают). Амплитуда изменения графиков увеличивается с увеличением длины измерительной линии. Все представленные на **Рисунке 5** графики удовлетворительно согласуются между собой, на некоторых отрезках профиля имеют близкие значения (расхождение менее 10 мВ), на других – «расходятся» по средним уровням, а по форме совпадают «с точностью до деталей».

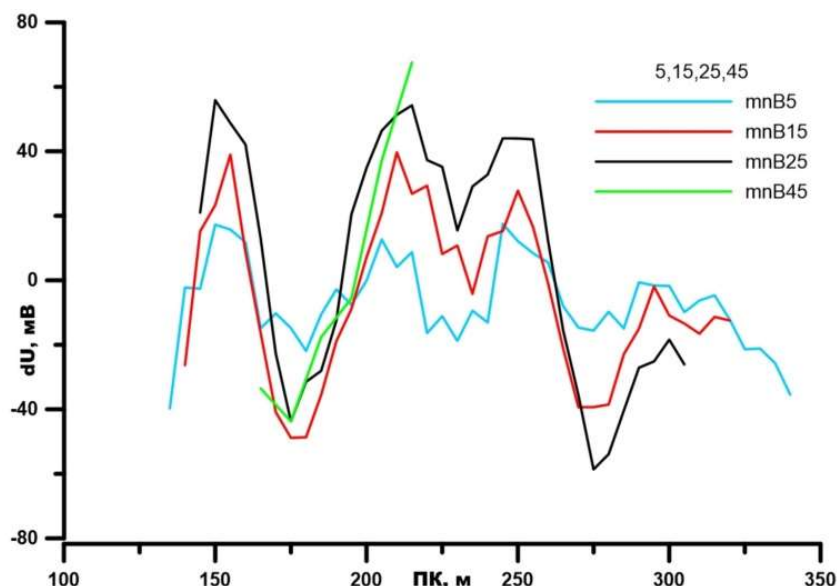


Рисунок 5. Графики значений градиента естественного поля, извлеченные из данных электротомографических измерений трехэлектродной установкой mnB ($mn=5, 15, 25$ и 45 м)

Указанные особенности графиков градиента естественного поля позволяют предположить наличие в демонстрируемых данных полезных сигналов, проявлений источников естественного поля. Следовательно, извлеченные из полевых записей метода электротомографии данные о естественном поле могут быть использованы для интерпретации (с целью получения геологических выводов) аналогично данным классического метода ЕП [Семёнов, 1980], а также для определения местоположения искусственных объектов [Бобачев и др., 2018; Ефремов и др., 2022].

Таким образом, при извлечении данных метода ЕП из данных метода электротомографии существуют следующие особенности.

Для извлечения постоянной составляющей из полевых электротомографических записей, их сортировки, первичной обработки, визуализации и анализа необходимо специальное программное обеспечение. Извлеченные из электротомографических записей данные о естественном поле характеризуются высокой детальностью, удовлетворительной точностью и большим количеством измерений (каждому положению измерительной линии соответствует несколько измерений и самих измерительных линий тоже несколько).

Количество измерений извлекаемых из данных метода электротомографии зависит от числа приемных линий и от количества измерений на каждой приемной линии. Число приемных линий зависит от типа и числа используемых электроразведочных установок, количества сегментов в расстановке электродов. Количество измерений для одной приемной линии зависит от типа и числа используемых электроразведочных установок, количества сегментов в расстановке, количества действующих разносов, шага перемещения расстановки вдоль профиля (перекрытия расстановок).

Из всего набора значений для каждого положения одной приемной линии рекомендуется использовать медианное значение. Извлеченные из полевых электротомографических записей данные естественного поля следует представлять и анализировать совместно, объединяя в графики медианные значения, полученные вдоль профиля для приемных линий одинаковой длины. Сопоставление результатов первичной обработки для нескольких измерительных линий, их совместный анализ и последующая интерпретация увеличивают достоверность, представительность и значимость получаемых практических выводов.

Извлеченные из полевых записей метода электротомографии данные о естественном поле могут быть использованы для интерпретации и получения геологических выводов.

Выводы

Извлекаемые из полевых электротомографических записей данные естественного поля

обладают двумя основными особенностями, которые позволяют использовать их для интерпретации и получения геологических выводов при решении практических задач инженерно-геологической направленности. Первой важной особенностью этих данных является их высокая плотность вдоль профиля и наличие в каждой точке наблюдения набора значений для нескольких приемных линий разной длины. Вторая важная особенность – наличие в этих данных полезных сигналов, получаемых без проведения измерений классическим методом ЕП, но содержащих аналогичную геологическую информацию.

Список литературы

1. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. [2006] Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14-17.
2. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Дудник А.В., Андреев М.А., Каминский А.Е. [2010] Инструкция по выполнению работ методом наземной двумерной электротомографии с аппаратурой «Омега -48». (Под ред. И.Н. Модина, В.А. Шевнина) «НПЦ Геоскан», «Логис». Москва, 2010, 58 с.
3. Бобачев А.А., Сергеев К.С., Дубовицкий А. Ю., Горин А.Д. [2018] Применение электротомографии на реке Москва // Тезисы докладов на конференции «Инженерная и рудная геофизика – 2018», г. Алматы, Казахстан, 23-27 апреля 2018 г. У09-02 (46323). 9 стр.
4. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д., Топилина Т.В. [2018] Трехсегментная методика электротомографии и результаты исследований долины Москвы-реки в районе Звенигородской биостанции МГУ (п. Луцино, Московская обл.). Тезисы докладов, на конференции «Инженерная геофизика – 2018», г. Алматы, Казахстан, 23-27 апреля 2018. (10 стр.)
5. Ефремов И.Д., Большаков Д.К., Модин И.Н. [2022] Возможность использования полевых записей метода электротомографии для получения информации о полях электрохимической природы // Тезисы докладов Научной конференции «ГеоЕвразия – 2022». Москва, Россия, 30 марта - 1 апреля 2022 года. (в печати, www.gece.moscow).
6. Модин И.Н., Большаков Д.К., Ефремов К.Д. [2017] Развитие технологии электротомографии с использованием многосегментных измерений // Тезисы докладов, на конференции «Инженерная геофизика – 2017», г. Кисловодск, Россия, 24-28 апреля 2017. (Е07, 10 стр.)

Д.К. Большаков, К.Д. Ефремов, И.Н. Модин

ОПРОБОВАНИЕ ПЛОЩАДНЫХ РАССТАНОВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ.

(МГУ им. М.В. Ломоносова)

Опытно-методические работы методом электротомографии выполнены летом 2019 года на восьмисегментной площадной расстановке электродов [Большаков и др., 2019, 2022]. Цель получения трехмерных данных разных категорий [Loke, 2018] – сравнение результатов их трехмерных инверсий и выбор оптимальной, наиболее рациональной системы измерений. Опробование нескольких методик измерений с площадными аналогами трехэлектродной и дипольной установок [Большаков и др., 2019, 2019a] проводилось на участке (46 x 14 м) территории Звенигородской биологической станции имени С.Н.Складовского биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Основная особенность участка работ – наличие под ровной дневной поверхностью (частично заросшей кустарником и травой) остатков оснований стен и фрагментов фундамента разрушенного здания, перекрытых маломощными песчано-глинистыми грунтами (*Рисунок 1*).



Рисунок 1. Общий вид участка (вверху) и сохранившиеся фрагменты кирпичной кладки стен (внизу слева) и фундамента (внизу справа), выходящие на дневную поверхность (ЗБС МГУ, 2019)

Измерения выполнены по многосегментной технологии [Большаков, Модин, 2015] на площадной расстановке из 192 электродов [Большаков и др., 2019а], размещенных по равномерной сети с шагом 2 м (**Рисунок 2**) и объединенных в восемь сегментов кос по 24 электрода. Попарное подключение сегментов кос [Большаков и др., 2019а] к сохраняющей свое положение 48-электродной электроразведочной станции «Омега-48» (ООО «Логис», www.logsys.ru) осуществлялось с использованием специально изготовленных удлинителей кос длиной 130 м (ООО «ГЕОДЕВАЙС», www.geodevice.ru) и дополнительных соединителей-переходников (ООО «НПЦ ГЕОСКАН», www.geoscan.su).

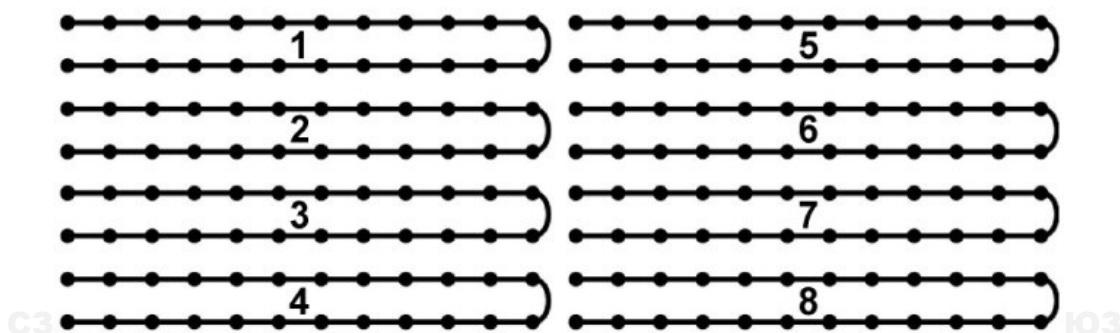


Рисунок 2. Схема расположения сегментов электроразведочной косы (черные линии) для выполнения измерений на восьмисегментной расстановке 192 электродов (черные кружки), расположенных в узлах равномерной сети. (1 - 8 – номера сегментов, начало координат – левый верхний угол)

Полный цикл опробования, проведенный на площадной восьмисегментной расстановке, включал несколько систем наблюдений, которые реализовывались для трехэлектродной и дипольной установок в профильном и межпрофильном вариантах для возможности проведения совместного анализа полевых данных и результатов инверсий. Выполненные опытно-методические работы были направлены на получение информации о преимуществах и недостатках нескольких площадных систем наблюдений при выработке критериев для построения оптимальной и рациональной площадной электротомографической методики получения трехмерных данных.

Самой простой и наиболее доступной технологией получения электротомографических данных на площади в настоящее время является двумерная методика измерений по системе параллельных профилей, позволяющая получать трехмерные данные четвертой категории («псевдотрехмерные

данные», «2D данные на площади») [Loke, 2018]. Основное преимущество этой технологии в том, что без смены аппаратуры и применения дополнительного оборудования обычные двумерные (поляризация среды только в одном направлении, – вдоль профиля) профильные измерения методом электротомографии выполняются последовательно, профиль за профилем.

Для построения объемных моделей в настоящее время используются, как правило, именно двумерные, псевдотрехмерные данные электротомографических измерений, выполненные вдоль нескольких профилей, расположенных на площади исследуемого участка. Удовлетворительное качество выполняемых построений объемных моделей обеспечивается высокой плотностью зондирований и активным использованием априорной геологической информации, как при проведении двумерной инверсии данных, так и при анализе результатов. Таким образом, распределение удельного электрического сопротивления в объеме изучаемой геологической среды получают без использования трехмерной инверсии данных, применяя при измерениях двумерную методику и профильную технологию размещения электродов. Двумерные данные, полученные таким способом («псевдотрехмерные»), в опубликованной классификации трехмерных данных [Loke, 2018] отнесены к четвертой категории.

Псевдотрехмерные измерения проведены авторами последовательно на восьми параллельных профилях длиной по 46 м. Профили были ориентированы вдоль длинной стороны участка (ось X, – ось пикетов) и располагались на расстоянии 2 м друг от друга. Координаты («имена») профилей по оси Y следующие (сверху вниз на *Рисунке 2*): 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 и 14 м. На каждом из восьми профилей с шагом 2 м выполнены электротомографические измерения комбинированной трехэлектродной установкой с одной измерительной линией минимальной длины (2 м) и всеми возможными действующими разностями. На *Рисунке 3* для каждого из профилей показаны положения нескольких измерительных линий (синим цветом, «через одну») при одном положении питающего электрода (кружок выделен красным цветом).

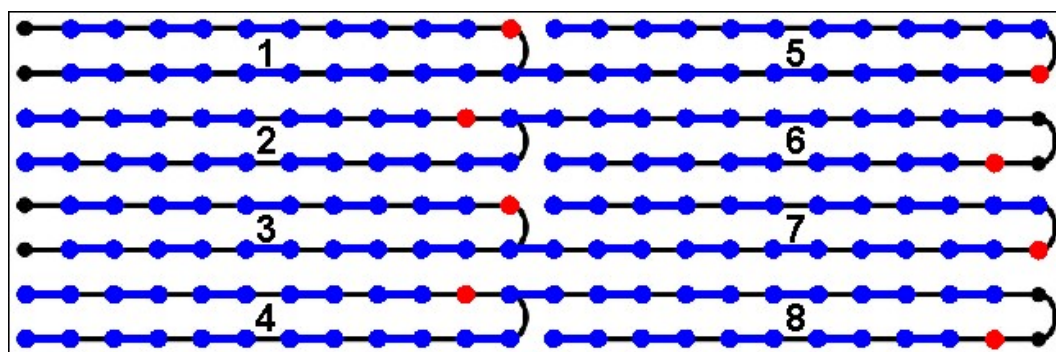


Рисунок 3. Схема расположения измерительных линий (синий цвет) и питающих электродов (красный цвет) трехэлектродной установки для получения двумерных данных вдоль восьми профилей

Таким образом, независимо друг от друга, вдоль каждого из восьми профилей длиной 46 м выполнены электротомографические измерения по двумерной методике со встречными трехэлектродными установками. Результаты этих измерений показаны на *Рисунке 4* в виде разрезов кажущегося сопротивления для четырехэлектродной установки, полученных осреднением первичных полевых разрезов кажущегося сопротивления для трехэлектродных установок. Результаты для двух («верхних» с *Рисунка 2*) профилей с координатами Y=0 и Y=2 м не представлены.

Визуальный анализ результатов псевдотрехмерных измерений показывает наличие в поле кажущегося сопротивления высокоомных (более 200-500 Ом-м, до 1000 Ом-м), по отношению к вмещающей среде (около 100 Ом-м) областей, геометрия которых изменяется от профиля к профилю. Аналогичная, – вдоль всех профилей, – проявленность наблюдается и для области низкого сопротивления (20-50 Ом-м) на ПК 12-22 м в нижней части разрезов (полуразносы более 8 м) кажущегося сопротивления, представленных на *Рисунке 4*.

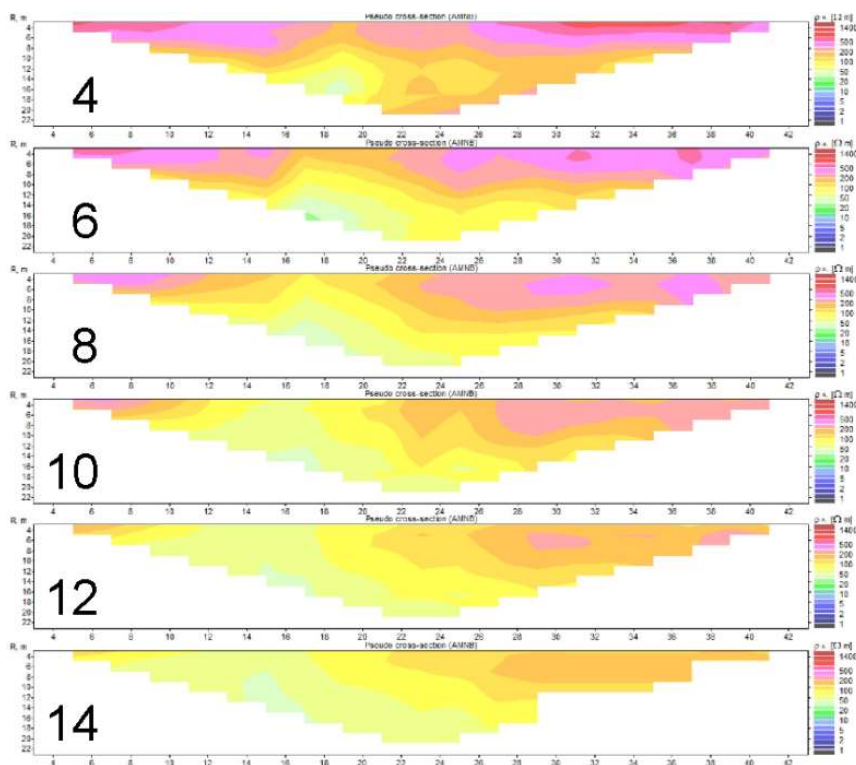


Рисунок 4. Разрезы кажущегося сопротивления для установки *АтнВ* вдоль профилей с координатами $Y=4$ (верхний), 6, 8, ..., 14 м(нижний), получены комбинированной трехэлектродной установкой

Результаты двумерной инверсии (программа ZondRes2D, автор А. Е. Каминский, zond-geo.com) данных профильных измерений со встречными трехэлектродными установками в виде разрезов удельного электрического сопротивления (УЭС) представлены для шести профилей на **Рисунке 5**.

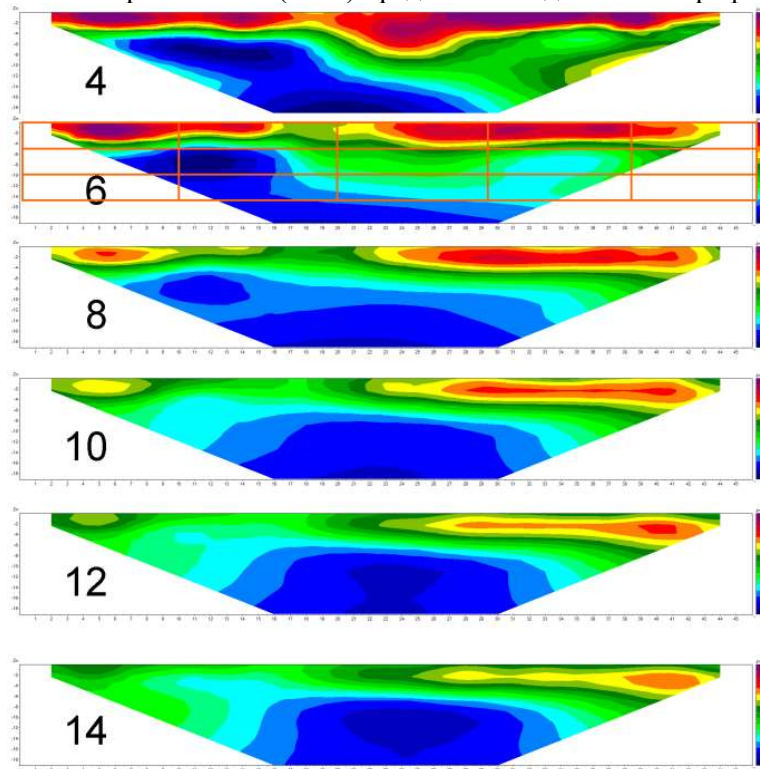


Рисунок 5. Разрезы удельного электрического сопротивления вдоль профилей с координатой $Y=4$ (верхний), 6, 8, ..., 14 м(нижний), полученные по результатам двумерной инверсии (алгоритм *Marquardt*) профильных данных (оранжевые линии масштаба: горизонтальные через 5 м, вертикальные через 10 м)

В целом, разрезы удельного электрического сопротивления, полученные по результатам двумерной инверсии двумерных данных (**Рисунок 5**) по алгоритму Маркварда [Marquardt, 1963] похожи на соответствующие разрезы кажущегося сопротивления (**Рисунок 4**). В приповерхностной части (глубины до 4 м) по результатам двумерной инверсии выявлен высокоомный слой с удельным электрическим сопротивлением более 400 Ом-м (для Y менее 10 м, УЭС более 500-700 Ом-м), который при значениях Y более 10 м сохраняется лишь на пикетах более 24 м. Во втором слое, с удельным сопротивлением 50-70 Ом-м, выявляется низкоомная область (УЭС менее 20 Ом-м), которая прослеживается на всех профилях (глубины более 8 м) и, дополнительно, для профилей со значениями Y менее 10 м также прослеживается низкоомная область (УЭС менее 20-15 Ом-м) с ПК 8 м по ПК 18 м (глубины до 6-8 м). Высокоомная область (УЭС 200-250 Ом-м), в которую «вырождается» приповерхностный слой высокого сопротивления на профилях со значениями Y более 8, проявляется на пикетах 3-8 м до глубины 3-4 м. Таким образом, для участка работ по результатам двумерной инверсии профильных данных метода электротомографии, получена двухслойная модель, осложненная присутствием высокоомных приповерхностных неоднородностей и неоднородностей пониженного сопротивления на глубинах более 6 м.

Псевдотрехмерные данные пригодны и для проведения трехмерной инверсии, но, как отмечается автором одной из программ трехмерной инверсии [Loke, 2018], предпочтительнее использовать результаты измерений по нескольким направлениям, то есть данные относящиеся к третьей (два направления), второй (более двух направлений) и первой (все возможные направления) категориям.

Результаты трехмерной инверсии псевдотрехмерных данных профильных измерений (со встречными трехэлектродными установками) по программе ZondRes3D (автор А. Е. Каминский, zondgeo.com) представлены на **Рисунке 6** в виде разрезов удельного электрического сопротивления совместно с результатами двумерной инверсии.

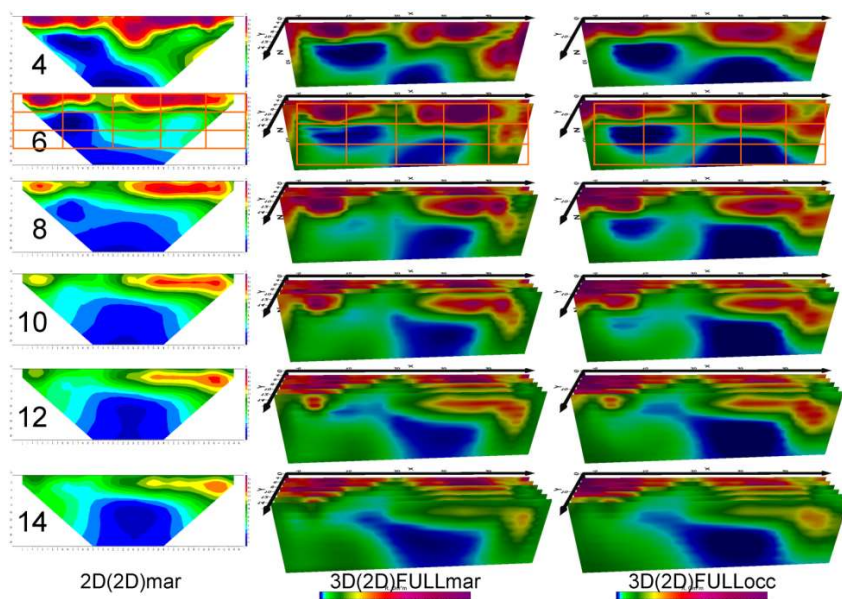


Рисунок 6. Разрезы удельного электрического сопротивления вдоль профилей с координатой $Y=4$ (верхний), 6, 8, ..., 14 м(нижний), полученные по результатам двумерной инверсии по алгоритму **Marquardt** профильных данных (слева) и трехмерной инверсии профильных данных по алгоритму **Marquardt** (в центре) и алгоритму **Occam** (справа) (оранжевые линии масштаба: горизонтальные через 5 м, вертикальные через 10 м)

Представленные на **Рисунке 6** (в центре и справа) в виде разрезов удельного электрического сопротивления (вдоль шести профилей) результаты трехмерной инверсии псевдотрехмерных данных по алгоритмам Маркварда [Marquardt, 1963] и Оккама [Constable et al., 1987], в целом, похожи и, лишь деталями, отличаются от совместно представленных результатов трехмерной инверсии псевдотрехмерных данных по алгоритму Маркварда (**Рисунок 6, слева**). Таким образом, модели полученные по результатам двумерной и трехмерной инверсий профильных данных метода электротомографии в целом совпадают, незначительно отличаясь лишь некоторыми несущественными деталями.

Для получения трехмерных электротомографических данных других категорий, более высоких, чем четвертая [Loke, 2018], выполнены межпрофильные измерения на площадной восьмисегментной

расстановке электродов [Большаков и др., 2019a] с площадными аналогами трехэлектродной и дипольной установок [Loke and Barker, 1996]. Питающие электроды (диполи) для трехэлектродной (дипольной) установки выбирались только из электродов на четных профилях ($Y=0, 4, 8, 12$ м) и четных пикетах ($X=0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44$ м). Поэтому, общее количество питающих электродов для площадной трехэлектродной установки составило 48 штук (в 4 раза меньше общего числа электродов в расстановке), что значительно сократило и количество измерений, и время, необходимое для их выполнения. Для измерений авторами использовались две системы размещения и ориентации попарно перпендикулярных приемных линий. Первая – «L-система», в которой попарно перпендикулярные измерительные диполи наименьшей длины ориентированы вдоль основных направлений сети наблюдений (**Рисунок 7**, слева). Вторая – «X-система», в которой попарно перпендикулярные измерительные диполи наименьшей длины ориентированы вдоль линий, составляющих с основными направлениями сети наблюдений угол в 45 градусов (**Рисунок 7**, справа).

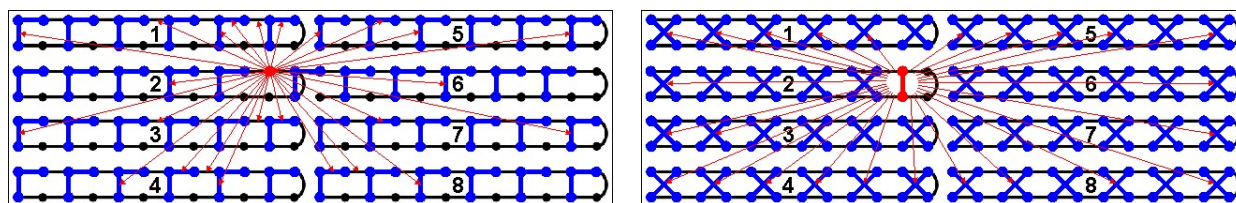


Рисунок 7. Схема расположения части измерительных линий (синий цвет) L системы относительно одного точечного (слева) и X системы относительно одного дипольного (справа) источников тока (красный цвет)

На **Рисунке 7** для двух систем измерений показана лишь некоторая часть приемных линий, чтобы они не сливались между собой. Таким образом, для каждого положения (48 шт.) питающего электрода (диполя) использовалось две системы измерительных электродов (L и X), а трехмерные данные, полученные на площадной расстановке с каждой из этих систем можно отнести ко второй категории [Loke, 2018].

Результаты трехмерной инверсии данных (программа ZondRes3D, автор А. Е. Каминский, zond-geo.com) площадных межпрофильных измерений трехэлектродной установкой представлены в виде разрезов УЭС для шести профилей на **Рисунке 8** совместно с результатами трехмерной инверсии данных профильных псевдотрехмерных данных и на **Рисунке 9** в виде объемных распределений удельного электрического сопротивления.

Совместный анализ представленных на **Рисунке 8** разрезов удельного электрического сопротивления, полученных в результате инверсии данных по алгоритму Оккама [Constable et al., 1987] показывает внешнее общее сходство всех трех объемных моделей. Вместе с тем, для глубин более 5 метров в центральной части разрезов (ПК 10-20 м), полученных по псевдотрехмерным данным (**Рисунок 8**, слева) и трехмерным данным по X-системе измерений (**Рисунок 8**, справа) выявляется и прослеживается на всех шести профилях высокоомная область с УЭС около 150 Ом-м на фоне удельных сопротивлений второго слоя модели менее 20 Ом-м. Интересно отметить, что на разрезах УЭС для трехмерных данных, полученных по L-системе измерений (**Рисунок 8**, в центре) указанная область не выявляется и не прослеживается ни на одном из шести разрезов. На аналогичных разрезах удельного электрического сопротивления для дипольной установки, не представленных в этом сообщении, указанная высокоомная область также не выявляется. Таким образом, на первый взгляд, мало значительные, мало существенные изменения в методике получения площадных трехмерных данных привели к достаточно существенным отличиям полученных по результатам трехмерных инверсий моделям. Важным является тот факт, что на результатах трехмерной инверсии двумерных (псевдотрехмерных) данных (для двух алгоритмов, см. **Рисунок 6**, в центре, справа) указанная область проявляется на всех шести профилях. В то время как, на результатах двумерной инверсии двумерных данных высокоомная область не выявляется (см. **Рисунок 6**, слева) ни на одном из шести профилей.

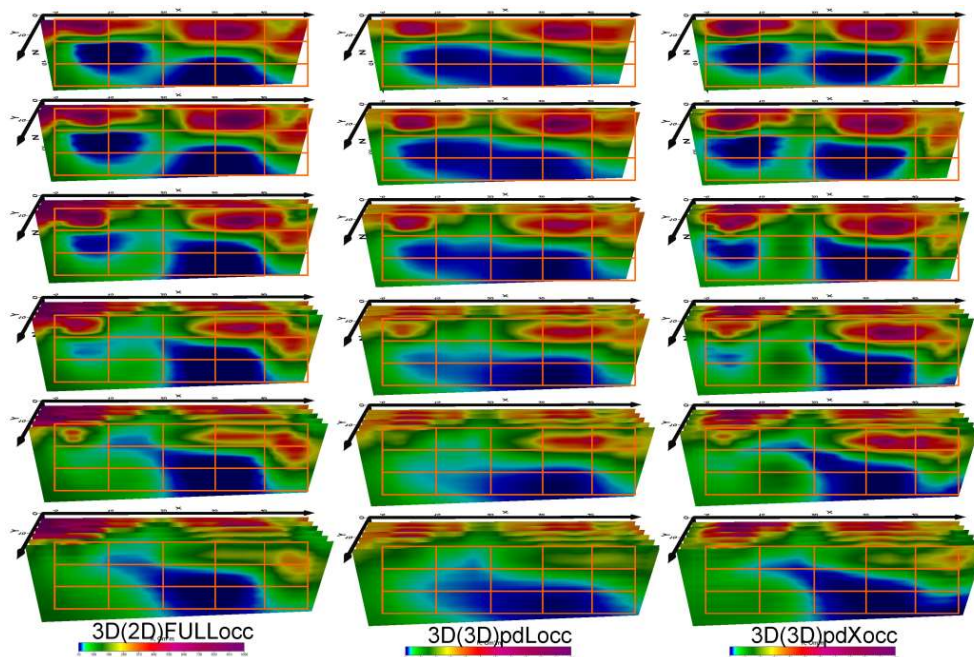


Рисунок 8. Разрезы удельного электрического сопротивления вдоль профилей с координатой $Y=4$ (верхний), 6, 8, ..., 14 м (нижний), полученные по результатам трехмерной инверсии (алгоритм **Оссат**) профильных (слева) и площадных данных трехэлектродной установки с «L» (в центре) и «X» (справа) ориентацией приемных линий (оранжевые линии масштаба: горизонтальные через 5 м, вертикальные через 10 м)

Объемные распределения удельного сопротивления, представленные на **Рисунке 9**, отражают наличие указанной высокоомной области и для результатов с L-ориентацией приемных линий трехэлектродной установки (**Рисунок 9, слева**) и для X-ориентации (**Рисунок 9, справа**). При таком представлении результатов заметны и другие отличия.

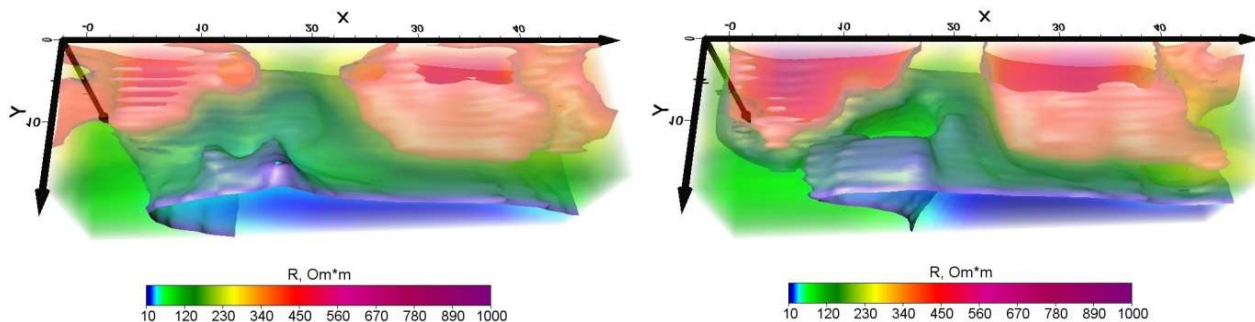


Рисунок 9. Объемное распределение удельного электрического сопротивления (изолинии 50 и 300 Ом·м), полученное по результатам трехмерной инверсии (алгоритм **Оссат**) площадных данных трехэлектродной установки с «L» (слева) и «X» (справа) ориентацией приемных линий

Действительно, проведенная в пространстве изолиния УЭС со значением 50 Ом·м, пусть и не так явно, как для результатов с X-ориентацией, но обозначает на глубинах более 5 м некоторое незначительное повышение УЭС на пикетах от ПК 10 до ПК 20 м и профилях со значениями Y изменяющимися от $Y=4$ м до $Y=12$ м (**Рисунок 9, слева**). Особенности цветовой раскраски и «освещения» представленных на **Рисунке 9** объемных распределений удельного сопротивления не позволяют определить абсолютные значения УЭС выявленной области. Однако, при таком представлении наблюдается обилие деталей пространственного положения проведенных в объеме изолиний 50 и 300 Ом·м. Изолинии со значением 300 Ом·м указывают на разнообразные геометрические особенности приповерхностных высокоомных объектов, присутствующих в моделях, которые в целом совпадают, а в частностях имеют настолько много мелких отличий, что для их описания необходимо значительное время. Таким образом, особенности строения, объемных моделей полученных по результатам трехмерной инверсии данных следует выявлять и изучать, анализируя не только традиционные, классические, разрезы и карты (слайсы) удельного сопротивления, но и ставшее в настоящее время доступным, объемное представление удельного электрического сопротивления.

Несмотря на полное отсутствие специализированного программного обеспечения, доступные универсальные прикладные программы для построения пространственных распределений физических полей и признаков, позволяют так настраивать цветовое заполнение, освещение, угол просмотра, увеличение, направление взгляда, чтобы максимально подчеркнуть наибольшее количество деталей доступных к обзору с каждого выбранного пользователем ракурса.

Выводы

Результаты совместного анализа объемных моделей, полученных по трехмерным данным различных категорий, показали удовлетворительное совпадение общих особенностей распределения удельного сопротивления. Опробованные на площадной многосегментной расстановке электродов системы расположения и ориентации приемных линий позволяют выявлять общие черты строения верхней части изучаемой геологической среды. Применение при измерениях разных площадных систем приемных линий позволяет дополнительно, по результатам инверсий трехмерных данных каждой системы в отдельности, выявлять частные особенности строения приповерхностных отложений.

Список литературы

1. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. [2019] Многосегментная технология измерений методом электротомографии // Тезисы докладов Научной конференции «Ломоносовские чтения - 2019», Секция «Геология», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019 года (16.04.19, <https://conf.msu.ru/rus/event/5604/>, 7 стр.).
2. Большаков Д.К., Ефремов К.Д., Модин И.Н. [2019а] Трехмерные измерения стандартной аппаратурой метода электротомографии на многосегментных площадных расстановках электродов. Тезисы докладов, на конференции «Инженерная геофизика – 2019», г. Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019. (10 стр.)
3. Большаков Д.К., Ефремов К.Д., Модин И.Н. [2022] Методика и технология получения трехмерных данных методом электротомографии // Тезисы докладов Научной конференции «ГеоЕвразия – 2022». Москва, Россия, 30 марта - 1 апреля 2022 года. (4 стр., в печати, www.gece.moscow).
4. Павлова А.М., Шевнин В.А., [2013] 3D-электротомография при исследованиях ледниковых отложений // Тезисы докладов на конференции «Инженерная геофизика – 2013», г. Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2013.
5. Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G. [1987] Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, pp. 289-300.
6. Loke M. H., [2018] Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. (Copyright 1996-2018) Part 8, pp. 137-138. Web: www.geotomosoft.com
7. Loke M. H. and Barker R. D., [1996] Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion, *Geophysical Prospecting*, 44, pp. 499-523.

И.И. Христофоров, И.В. Горохов, К.П. Данилов

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ПОДВОДНОГО ГАЗОПРОВОДА С ПОВЕРХНОСТИ РЕЧНОГО ЛЬДА.

Институт мерзлотоведения СО РАН

Тезисы не представлены

Д.С. Никитин, О.С. Самсонова

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГРУНТОВ ГУБЫ БЕЗЫМЯННОЙ АРХ. НОВАЯ ЗЕМЛЯ (О. ЮЖНЫЙ)

Геологический институт Российской Академии наук

Освоение арктического региона (строительство морских портов, железных дорог, газопроводов, освоение месторождений с возведением сопутствующих сооружений и др.) сопровождается большим объемом геологических изысканий с привлечением ученых разных направлений, что обусловливается прогрессирующим влиянием потепления климата и связанных с этим разнородных процессов в криолитозоне.

В работе рассматриваются результаты проведения комплексных геотермических работ на территории Павловского месторождения остров Южный архипелага Новая Земля, включивших геотемпературные измерения в скважинах с целью определения мощности многолетнемерзлых пород, измерения теплопроводности и коэффициента тепловой неоднородности пород по керну методом оптического сканирования, а также дан прогноз температурного режима грунтов на 2040 год.

В настоящее время в границах лицензионного участка для обеспечения строительства и эксплуатации месторождения проектируется портовый комплекс. Район проектирования находится в 2-18 км к западу от месторождения, в районе губы Безымянная (эстуарий р. Безымянная). (Рис. 1)



Рис. 1. Обзорная карта района исследований: 1 – Контур схемы расположения района исследований; 2 – Контур Павловского месторождения; 3 – Скважины с термометрическими

наблюдениями; 4 – Контур схемы расположения Павловского месторождения.

Геокриологические условия района исследований во многом определяются рельефом и речной сетью.

Развитие рельефа исследуемой территории можно проследить с миоцена, когда началась общая структурная перестройка шельфа Арктики. Сложные блоковые движения оформляющегося орогена приводят к расчленению сформировавшегося к этому времени пенеплена и увеличению эрозионного вреза. К плиоцену происходит обособление морфоструктуры Новой Земли в границах близких к современным. [1-3]

Оледенение Новой Земли возрастает с юго-запада на северо-восток. Разрез криолитозоны архипелага представлен в основном палеозойскими скальными и полускальными породами, сильнодислоцированными и смятыми в крутые складки с падением на крыльях от 25 до 80°. Ярус скальных мерзлых и морозных пород является основным в криолитозоне. Ярус пород с криопэгами в виде маломощных субвертикальных линз развит на побережьях; он отсутствует под хребтами и горными вершинами. [4]

По итогам прогнозного расчета построены распределения среднегодовых температур грунтов (Рис. 2). Полученные данные позволяют проводить исследования, связанные с изменениями геокриологических условий в результате оттаивания мерзлых пород. Так к 2040 году при экстремальном сценарии глобального потепления кровля мерзлоты опустится в среднем на 1,5 м, только условия понижения или сохранения существующей среднегодовой температуры воздуха не позволят допустить полную деградацию мерзлоты.

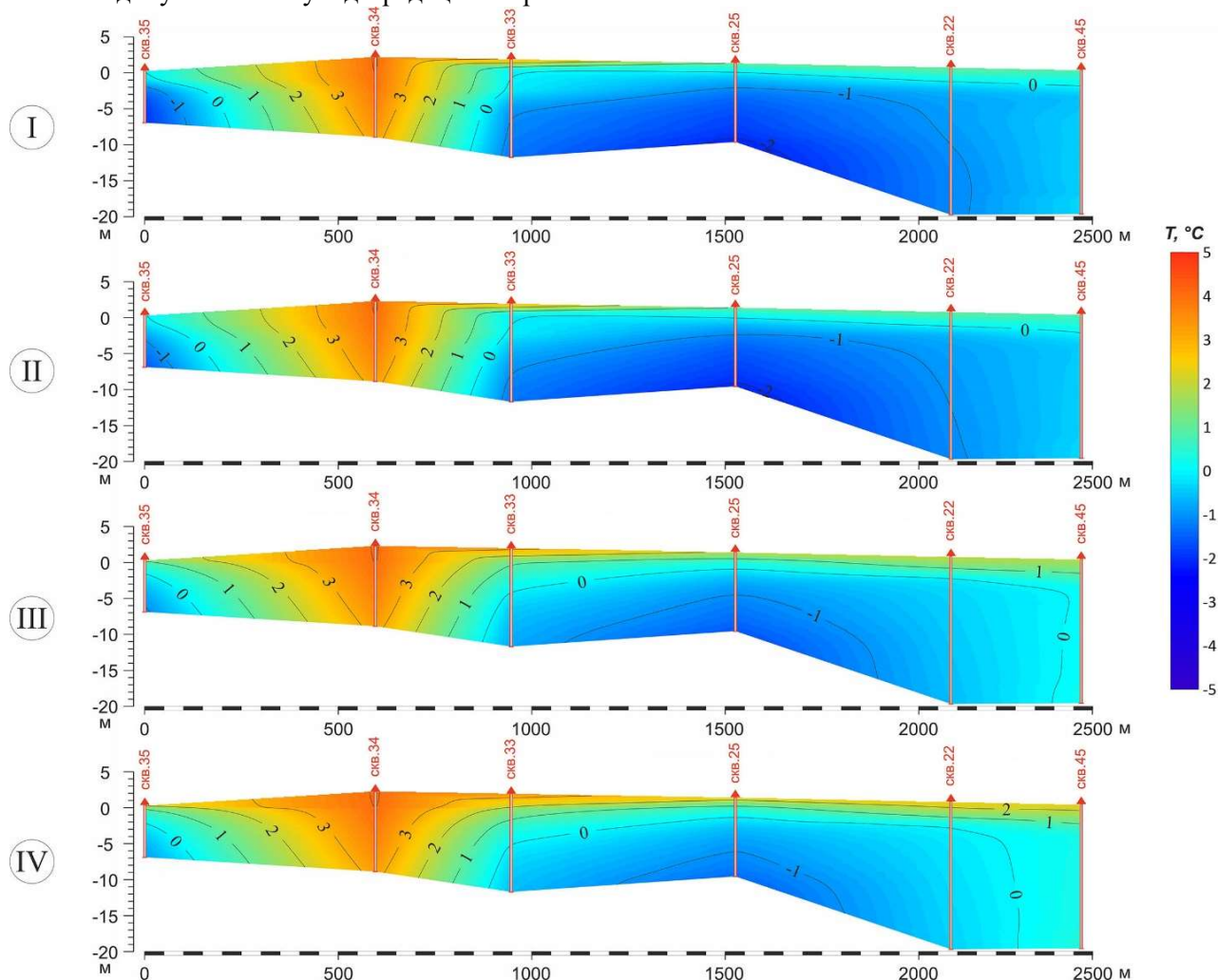


Рис. 2. Распределение среднегодовой температуры грунта по профилю

I – на 2022 г.; II – на 2040 год по I сценарию; III – 2040 г. по II сценарию; IV – 2040 г. по III сценарию

В условиях интенсивно меняющегося климата сложно дать точную оценку геокриологических последствий, так как в разных районах Земного шара характер вечной

мерзлоты имеет неравную инерционность в отношении климата. Наш участок исследований относится к районам с высокими темпами климатических изменений, на которые, соответственно, чувствительно реагирует состояние вечной мерзлоты. По результатам исследования можно установить следующие выводы:

- при экстремальном изменении климата температура пород к 2040 году может повыситься на 2,23 °С;
- к концу расчетного времени увеличение глубины сезонного протаивания может достигать 1,5 м;
- до 2040 года кровля мерзлоты может деградировать в среднем на 1,5 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00054 А

Список литературы

1. Красножен А.С. История новейшего развития южной части Новой Земли //Геология Южного острова Новой Земли. Л., ПГО «Севморгеология», 1982. С.6-23.
2. Павлов Л.Г., Бурский А.З., Ильин В.Ф. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые южной части архипелага Новая Земля (Отчет о групповой геологической съемке м-ба 1:200000). АКГГЭ ПГО Севморгеология, Ломоносов, 1981; 438 с.
3. Павлов Л.Г., Ильин В.Ф. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые центральной части архипелага Новая Земля (Отчет о групповой геологической съемке м-ба 1:200000). ПМГРЭ, Ломоносов, 1986. 438 с.
4. Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Шакуро С.В. Геокриологические исследования губы Безымянная архипелага Новая Земля (остров Южный) шельфа // Мониторинг. Наука и технологии. 2021. №2 (48). С. 6-22.

Д.В. Копылов, С.Ю. Янин

СТРОЕНИЕ БУГРА ПУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ БЕСКОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ НА ТЕРРИТОРИИ ТУНДРЫ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ

ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Введение

Одним из самых распространенных инженерно-геологических процессов на территории криолитозоны является криогенное пучение грунтов и развитие бугров пучения (Арабский и др., 2018). Кроме постепенного выталкивания из пучинистых грунтов фундаментов сооружений и их деформации, бугры пучения способны разрушаться с резким выбросом ледоминеральных фрагментов грунтов и газа (Андреев, 1936; Богоявленский и др., 2019). К примеру, в 2013 году, на месте бугра пучения (Оленченко и др., 2015) в непосредственной близости от Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения и газопровода «Бованенково-Ухта» образовалась воронка газового выброса. Разброс кусков ледоминерального грунта, размером от 0.2 до 2.0 м, зафиксирован в радиусе более 160 м от кратера. Данное геологическое новообразование под названием «Ямальский кратер» привлекло к себе внимание ученых и недропользователей, так как является потенциально опасным явлением для нефтегазовой инфраструктуры и населения. Криогенное пучение – инженерно-геологический процесс, возникающий в результате многократных циклов промерзания-оттаивания грунтов деятельного слоя. Оно проявляется в естественных условиях в виде сезонных и многолетних бугров пучения. По генезису бугры пучения подразделяются на инъекционный и миграционный (сегрегационный) типы. Инъекционные бугры пучения, известные под терминами булгуньяхи у народов северной Якутии, по терминологии Н.И. Толстухина – гидролакколиты (Толстухин, 1932), а в международной литературе – пинго, образуются в результате инъекции влаги под действием гидростатического давления из замкнутых объемов межмерзлотных таликов при расширении мерзлых грунтов в процессе

промерзания. Миграционные бугры пучения, в международной литературе – пальза, приурочены к торфяникам и образуются в результате миграции влаги из водонасыщенных грунтов к фронту промерзания, который является границей между талыми и мерзлыми грунтами (Васильчук, 2008). Пальза без торфяного покрова – литальза, ледоминеральные бугры пучения в дисперстных грунтах без перекрывающего сверху слоя торфа (Pissart, 2011). Часто встречаются случаи, когда все эти процессы присутствуют в образовании бугра и такой тип принято называть инъекционно-сегрегационно-миграционный либо смешанный (Васильчук, 2014). В последние годы в связи с освоением нефтегазовых месторождений западной Арктики ведется активное строительство промышленной и гражданской инфраструктуры. Трубопроводы прокладываются как в надземном (на эстакаде), так и в подземном (в траншее) варианте, в зоне действия опасных инженерно-геологических процессов, в непосредственной близости от бугров пучения. Для проектирования инженерной защиты сооружений и предупреждения деформации и разрушения нефтегазовой инфраструктуры необходимо всестороннее геолого-геофизическое изучение многолетних бугров пучения. В данной работе приводятся результаты геофизических исследований многолетнего бугра пучения, расположенного в непосредственной близости от автомобильной дороги и трубопровода, с целью определения его внутреннего строения и установления его генезиса.

Объект и территория исследования

Территория, где расположен исследуемый многолетний бугор пучения, представляет собой плоско-волнистую прибрежно-морскую и озерно-аллювиальную заболоченную и заозеренную равнину со слаборасчлененным и слабодренированным рельефом между реками правая Янгъяха и Пяндымыяха. В составе гидрологической сети главным элементом выступают озера. Преобладают малые и средние по размерам озера, с площадью акватории до 1 км². Наиболее характерные глубины – 0.8 – 2.0 м. Речная сеть относится к бассейну р. Таз и включает в себя притоки 2 – 4 порядков. Большая часть водотоков относится к категории малых, имеют незначительную длину и малые глубины. По геоэкологическим условиям район относится к Северо-Пур-Тазовской области сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). ММГ развиты на всех геоморфологических уровнях, а несквозные талики небольшой мощности существуют только под водоемами – руслами рек и акваториями крупных озер. Толщи многолетнемерзлых грунтов имеют непрерывный разрез по вертикали от кровли до подошвы. Среднегодовые температуры ММГ изменяются от минус 5.0 °С до минус 1.5 – 2.0 °С. Глубина сезонного протаивания изменяется от 0.3 до 2.0 м, в зависимости от состава грунтов и характера растительного покрова. В тектоническом отношении исследуемая территория контролируется крупным куполовидным поднятием в пределах Русского вала, который по подошве чехла напоминает брахиантиклиналь со вторым куполом (Русско-Часельское поднятие) в южной части. Вдоль западного крыла вала, где расположен исследуемый бугор пучения, предполагается крупный разлом типа сбросо-сдвига (Юрибейский), отделяющий ортоплатформенный чехол от орогенного прогиба герцинид. Вертикальная амплитуда разлома по поверхности фундамента превышает 3000 м, в осадочном чехле – около 300 м. Характерно, что разлом, являющийся достаточно крупным в палеозойских толщах, никак не выражен в гравитационном и магнитном полях. Инженерно-геологический разрез исследуемого участка представлен современными биогенными и аллювиально-морскими верхнеледниковыми отложениями, песком мелким твердомерзлым массивной криотекстуры, супесью твердомерзлой слоистой криотекстуры, суглинком твердомерзлым слоистой криотекстуры и торфом среднеразложившимся слоисто-сетчатой криотекстуры. Мощность торфа, на участке вблизи бугра пучения достигает 0.2 – 2.2 м. ММГ участка слаболдыстые, средняя лдыстость за счет ледяных включений составляет 0.04 д.ед. Под торфом среднеразложившимся пластичномерзлым встречается лед мощностью 0.7-1.0 м.

Результаты и обсуждение

Рекогносцировочное обследование исследуемой территории показало то, что изучаемый многолетний бугор пучения расположен в 17 км к западу от базы промысла Русского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). В 600-х м к югу от бугра проходит действующая автомобильная дорога и межпромысловый трубопровод на эстакаде. На рисунке 1 представлены космоснимки исследуемого бугра пучения и его размеры.

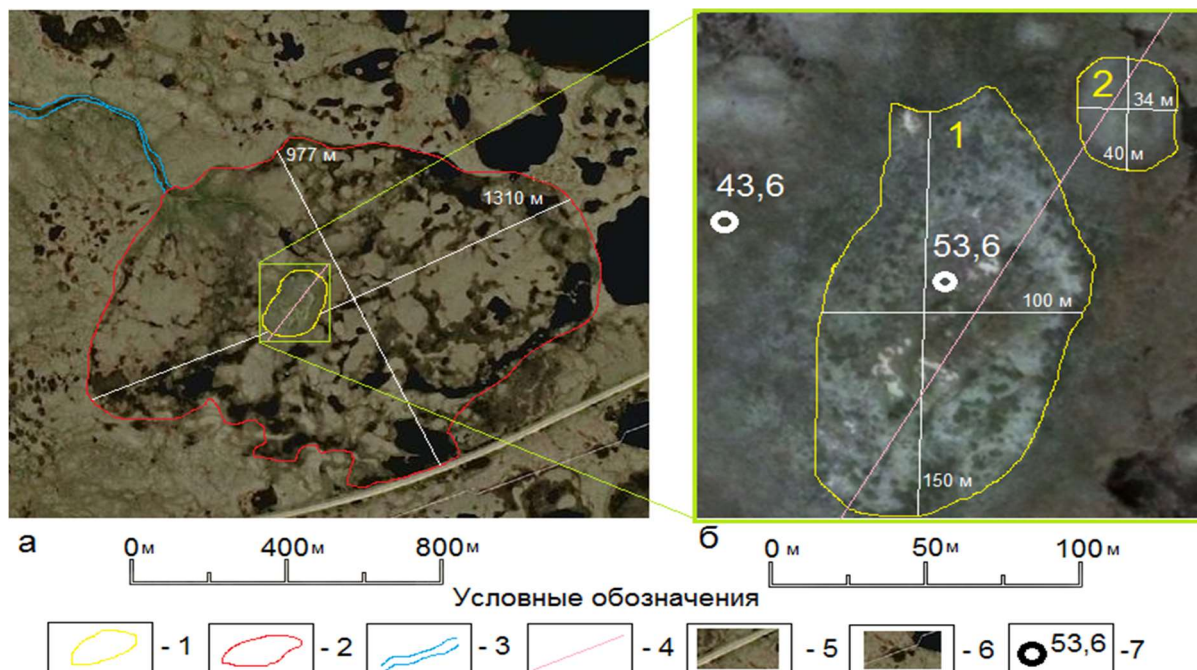


Рисунок 1. Космоснимки бугра пучения разного масштаба (а, б). 1 – контур бугров пучения, 2 – контур палеоозера, 3 – временный водоток, 4 – электроразведочный профиль, 5 – автодорога, 6 – эстакада трубопровода, 7 – абсолютная отметка дневной поверхности.

По характерной геоморфологической обстановке заметно, что бугор располагается в центральной части палеоозера овальной формы, берега которого выделены на рисунке 1 красной линией. Длина вытянутой части палеоозера составляет 1.31 км и в поперечной его части 0.97 км. Осушение палеоозера происходит через временный водоток, который впадает в р. Правая Янгъяха (на рисунке 1 выделен голубой линией). На расстоянии 1.8 км к западу от бугра протекает р. Правая Янгъяха, которая при слиянии с р. Левая Янгъяха образует р. Янгъяха, относящаяся к бассейну р. Таз. Сам многолетний бугор пучения представляет собой холм овальной формы с двумя вершинами (№1 и №2 на рис. 1б), вытянутый в субмеридиональном направлении. Высота бугра №1 в самой высокой точке около 10 м, размер основания вытянутой части – 150 м, размер основания в поперечнике – 100 м. Склоны в поперечной части довольно крутые, в вытянутой – более пологие. Характерная для многолетних бугров пучения среднего Ямала трещиноватость поверхности не обнаружена (Андреев, 1936). Юго-восточнее в 3 км от изучаемого бугра пучения расположен деградирующий многолетний бугор пучения с явно выявленными глубокими трещинами рассекающими тело бугра. На космоснимке (рис. 1б) в северо-восточном направлении от вершины основного бугра пучения №1 по цветовой палитре выделяется еще один бугор №2 меньше по размерам по сравнению с основным. Высота его около 3 м, размер основания вытянутой части – 40 м, размер основания в поперечнике – 34 м. Геофизические исследования были выполнены методом бесконтактной электроразведки (Копылов, Садуртдинов, 2020). Электроразведка хорошо зарекомендовала себя при изучении криогенных объектов (Yoshikawa et al., 2006; Kunz, Kneisel, 2021) в связи с высокой контрастностью этих объектов и вмещающими породами по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). Работы выполнялись в зимнее время года, в конце ноября, при наличии сезонно-мерзлого слоя (СМС) и снежного покрова мощностью до 0.4 м в понижениях и до 0.1 м на вершинах. Электроразведочные измерения проводились с помощью дипольно-осевой установки MNAB, переносимой по прямолинейному профилю, который проходил через вершины бугров. Шаг измерений по профилю – 5 м. Применялась электроразведочная аппаратура «БИКС» с рабочей частотой 16.6 кГц, разработанная в ОАО «СКБ СП». Обработка электроразведочных данных выполнялась с помощью двумерной инверсии в программе ZondRes2D, в результате чего был получен геоэлектрический разрез (рис. 2), отображающий структурные особенности исследуемого многолетнего бугра пучения.

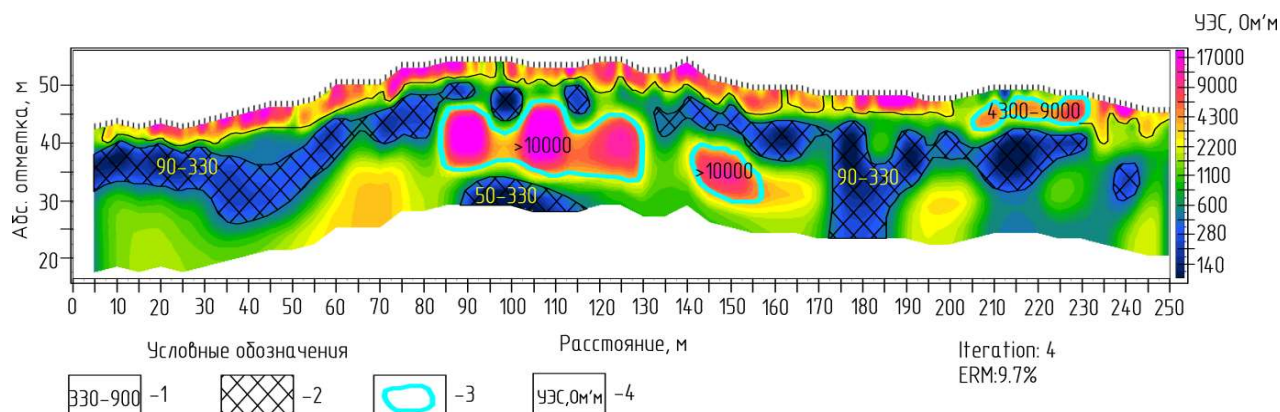


Рисунок 2. Геоэлектрический разрез бугра пучения с элементами интерпретации. 1 – значения удельного электрического сопротивления в Ом·м, 2 – талые области, 3 – ледоминеральное ядро, 4 – удельное электрическое сопротивление в Ом·м.

Для определения граничных значений УЭС с целью дальнейшей геологической интерпретации проанализированы архивные материалы геофизических исследований в составе инженерно-геологических изысканий, выполненные в непосредственной близости от бугра пучения при обустройстве Русского НГКМ. На геоэлектрическом разрезе области с относительно низкими значениями УЭС в 90-330 Ом·м соответствуют талой супеси, а области с УЭС 1000 Ом·м и более относятся к мерзлым грунтам различной степени льдистости и льдам. Верхняя часть разреза высокоомная, представлена мерзлым льдистым торфом и мерзлой супесью, мощностью до 3 м. В центральной части профиля, в интервале 85 – 130 м и 140 – 155 м выделяются высокоомные аномалии с УЭС до 17000 Ом·м мощностью около 7 м. Они интерпретируются как ледоминеральное ядро многолетнего бугра пучения №1. Под ядром уверенно прослеживается аномальная область с низкими значениями УЭС от 50 до 330 Ом·м которая, по мнению авторов, представлена талыми водонасыщенными (возможно газонасыщенными) грунтами. В правой части разреза в интервале профиля 205 – 230 м выделяется аномалия повышенного сопротивления с УЭС до 9000 Ом·м мощностью до 3 м, которая характеризуется ледоминеральным ядром малого бугра №2. Существенная разница в УЭС двух ледоминеральных ядер бугров объясняется тем что, судя по размеру, бугор пучения №2 моложе и прослоев льда (лед – диэлектрик) в его ядре намного меньше. Под ледоминеральным бугром №2 так же наблюдается аномалия низкого сопротивления с УЭС 90-330 Ом·м, которая предположительно может являться областью талых водонасыщенных (возможно газонасыщенных) грунтов. По мнению авторов, генезис исследуемого многолетнего бугра пучения инъекционный. Бугор располагается практически в центральной части спущенного озера (палеоозера). Обводненные грунты межмерзлотного (ранее подозерного) талика находясь в замкнутой системе, были под большим гидростатическим давлением в результате промерзания периферийной талой части. В результате чего происходило выдавливание вышележащих многолетнемерзлых грунтов с образованием ледоминерального ядра. Такой тип бугра пучения – гидролакколит-булгуннях может представлять опасность для инфраструктуры и населения, так как в межмерзлотном талике под ядром возможно накопление мигрирующих газов и когда статическое давление превысит предельные прочностные характеристики вышележащей толщи, может произойти пневматический выброс льда и грунта на дневную поверхность. Для уточнения и заверки аномальных областей на геоэлектрическом разрезе необходимо проводить комплекс инженерно-геокриологических изысканий.

Выводы

В результате выполненных исследований установлено, что у многолетнего бугра пучения, расположенного практически в центре палеоозера, на глубине с 6 м залегает ледоминеральное ядро мощностью около 7 м. Под ядром на глубине около 20 м определено наличие области талых водонасыщенных (возможно газонасыщенных) грунтов. В непосредственной близости от основного бугра пучения развивается достаточно молодой многолетний бугор пучения со своим ледоминеральным ядром мощностью до 3 м, что может говорить об активном их развитии. Предположительно бугор пучения образовался в результате роста ледоминерального ядра при промерзании подозерного талика, который был обнаружен. Показано, что электроразведка может эффективно применяться для изучения бугров пучения с целью обнаружения потенциально опасных участков.

Библиография

1. Андреев В.И. Гидролакколиты (булгунняхы) в Западно-Сибирских тундрах // Известия

Государственного Географического общества, 1936. Т. 68. Выпуск 2. с. 186–210.

2. Арабский А. К., Арно О. Б., Богоявленский В. И. и др. Геоэколого-техногенные аспекты и их роль при освоении газовых месторождений в районе Ямбурга // Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология-2018». Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 4 (23). 10 с.

3. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика, 2019. № 4 (36). с. 52–68.

4. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Чиждова Ю. Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / Под ред. Ю. К. Васильчука. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 571 с.

5. Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А., Васильчук А. К., Йошикава К., Подборный Е.Е., Чиждова Ю.Н.. Изотопный состав ледяного ядра позднеголоценового булгуньяха на месторождении Песцовое в долине реки Евояха на юге Тазовского полуострова // Криосфера Земли, 2014. Т. 18. № 4. с. 47–58.

6. Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р. Изучение талика под малым водотоком методом бесконтактной электроразведки // Криосфера Земли, 2020. т. XXIV. № 6. с. 45–54.

7. Толстихин Н.И. Подземные воды Забайкалья и их гидролакколиты // Труды Комиссии по изучению вечной мерзлоты, 1932. Т. 1. с. 29–50.

8. Kunz J, Kneisel C. Three-dimensional investigation of an open- and a closed-system Pingo in northwestern Canada // Permafrost and Periglacial Process, 2021. p. 1–17.

9. Pissart A. Pingos, palsas and lithalsas: Comparison with the Martian mounds // Zeitschrift fur Geomorphologie, 2011. Vol. 55. № 4. p. 463–473.

10. Yoshikawa K., C. Leuschen, A. Ikeda, K. Harada, P. Gogineni, P. Hoekstra, L. Hinzman, Y. Sawada, N. Matsuoka Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice) // Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006. 111. E06S19.

Особенности поиска бивней мамонта в водоемах криолитозоны с помощью метода георадиолокации
И.И. Христофоров, К.П. Данилов, И.И. Горохов (Якутский научный центр СО РАН, Институт мерзлотоведения СО РАН)

И.И. Христофоров, К.П. Данилов, И.И. Горохов

ОСОБЕННОСТИ ПОИСКА БИВНЕЙ МАМОНТА В ВОДОЕМАХ КРИОЛИТОЗОНЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Якутский научный центр СО РАН, Институт
мерзлотоведения СО РАН

Тезисы не представлены

Д.С. Смирнов, О.В. Казанов, И.Г. Манылов,
Г.С. Мелихова, С.Н. Ванфуба¹

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕЛЕАКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ПРИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ФГБУ «ВИМС», 1- ООО «Геоплюс»

Телеакустический каротаж, как метод геофизических исследований в скважинах, был применен ФГБУ «ВИМС» для изучения геомеханических условий на нескольких золоторудных месторождениях (Сухой Лог, Нежданинское, Олимпиадинское, Ведуга, Вернинский и Наталкинское) и в перспективе рассматривается как альтернатива традиционному методу отбора ориентированного керна. За период исследований телеакустический каротаж выполнен более чем в 100 скважинах в объеме более 30 000 пог. м.

1. Задачи исследований телеакустического каротажа

Проведение геомеханических исследований на золоторудных месторождениях является одной из основных проблем на всех стадиях проектирования горных работ и эксплуатации.

Конструкция бортов глубоких карьеров с одной стороны должна обеспечивать безопасность ведения горных работ, с другой стороны - максимальное извлечение руды при минимальном объеме вскрышных работ.

Для решения перечисленных задач, важным фактором является обоснование безопасных устойчивых углов откосов уступов и бортов карьера, которые зависят как от физико-механических свойств вмещающих пород, так и в значительной степени от трещиноватости массива. Это требует специальных знаний о геолого-структурном строении месторождения, которое может быть достаточно сложным, особенно вблизи рудных тел, где структурное строение часто изменчиво.

В настоящее время изучение структурно-геологических особенностей золоторудных месторождений осуществляется в основном с помощью бурения специальных геотехнических скважин с ориентированным отбором керна, которое позволяет получить информацию о трещиноватости массива пород, параметрах залегания геологических структур по извлеченному керну и не исключает технических ошибок, связанных с ориентацией керна при его извлечении.

ФГБУ «ВИМС» предлагает применять телеакустический каротаж скважин в числе геофизических методов исследований скважин, направленных на получение исходных данных о геомеханических условиях и структурно-геологических особенностях в самом массиве пород, что исключает ошибки документации по ориентированному керну, повышает достоверность результатов.

2. Аппаратура для выполнения телеакустического каротажа

В состав оборудования для проведения метода телеакустического каротажа входят: каротажная лебедка Mount Sopris MXC-1000, каротажный регистратор Scout и акустический скважинный телевьювер ABI-40-GR (2G).

Каротажная лебедка Mount Sopris MXC-1000

Лебедки MXC представляют собой каротажные грузоподъемные устройства, позволяющие опускать геофизические зонды или другие скважинные приборы на заданную глубину.

Каротажный регистратор SCOUT

Каротажный регистратор SCOUT (рис. 2) – современная электронная схмотехника, позволяющая максимально использовать методы управления программными средствами. Аппаратное обеспечение состоит из самых современных электронных компонентов со встроенными системами, управляемыми посредством специально разработанной программы **LOGGER SUITE** с интерфейсом ОС Windows.

Акустический скважинный телевьювер ABI-40-GR (2G)

Запись метода проводится зондом ABI-40-GR(2G) с установленными центраторами, (Рис.1) .

Зонд ABI-40-GR представляет собой акустический телевьювер последнего поколения. Зонд

содержит 3-х осевой магнитометр и 3-х осевой акселерометр для ориентировки изображения относительно магнитного севера и предоставления данных о пространственном положении ствола скважины. Зная время пробега и скорость акустической волны, становится возможным получение данных о геометрии скважины.

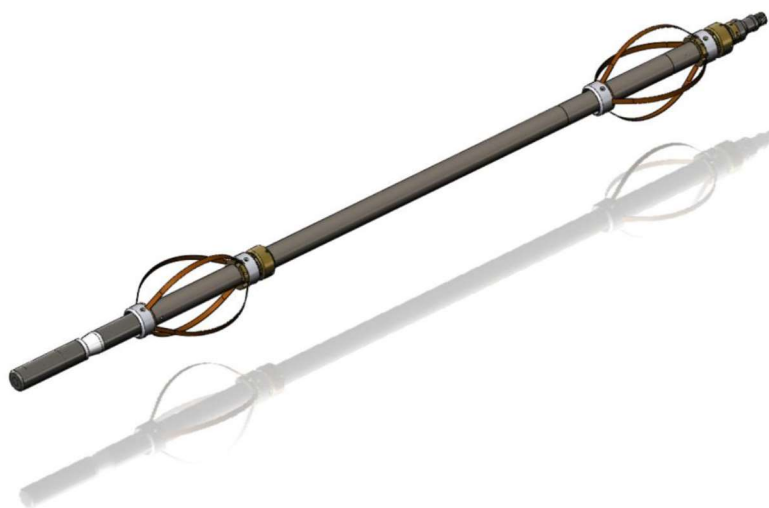


Рис. 1. Система зонда ABI-40-GR(2G) с установленными центраторами

Скважинные акустические сканирующие устройства формируют изображение стенки скважины, передавая ультразвуковые импульсы от неподвижного излучателя с вращающейся отражающей поверхностью, и регистрируя амплитуду/ время пробега сигналов/, отраженных от граничной поверхности между скважинным флюидом и геологической формацией/ стенка скважины/. Система ABI-40-GR обладает способностью регистрировать множественный отраженный сигнал. Это достигается благодаря цифровой регистрации всего пакета отраженных акустических волн. Оперативный анализ акустических данных производится с помощью процессора. Сложные алгоритмы процессора позволяют системе обнаружить отражение от акустического окна, а также разделить и классифицировать все последующие отраженные сигналы.

3. Обработка результатов измерений

Вся обработка и интерпретация данных проводится в программном обеспечении WellCAD. Обработка данных включает в себя привязку по глубине, фильтрацию, централизацию, расчет скорости акустической волны и радиуса скважины, нормализацию амплитуды. Привязка данных по глубине осуществляется по данным ГК.

Процессы фильтрации, централизации применяются к данным времени пробега акустической волны. Фильтрация призвана устранять аномальные значения в массивных данных, уменьшать выбросы и импульсные помехи. Программная централизация изображения призвана компенсировать не идеальную централизацию прибора в наклонных скважинах. При этом централизация не применяется к данным амплитуды.

Одним из наиболее важных параметров необходимых для преобразования данных времени прохождения акустической волны в данные кавернометрии является проводимость скважинной жидкости, в которой акустический сигнал проходит. Данные о проводимости скважинной жидкости рассчитываются.

К данным амплитуды применяется процесс нормализации. Целью нормализации является улучшение контрастности изображения, используя метод нормализации гистограммы. Суть процесса состоит в построении гистограммы данных и разделении данных на несколько классов для отображения данных (рис. 2 и 3).

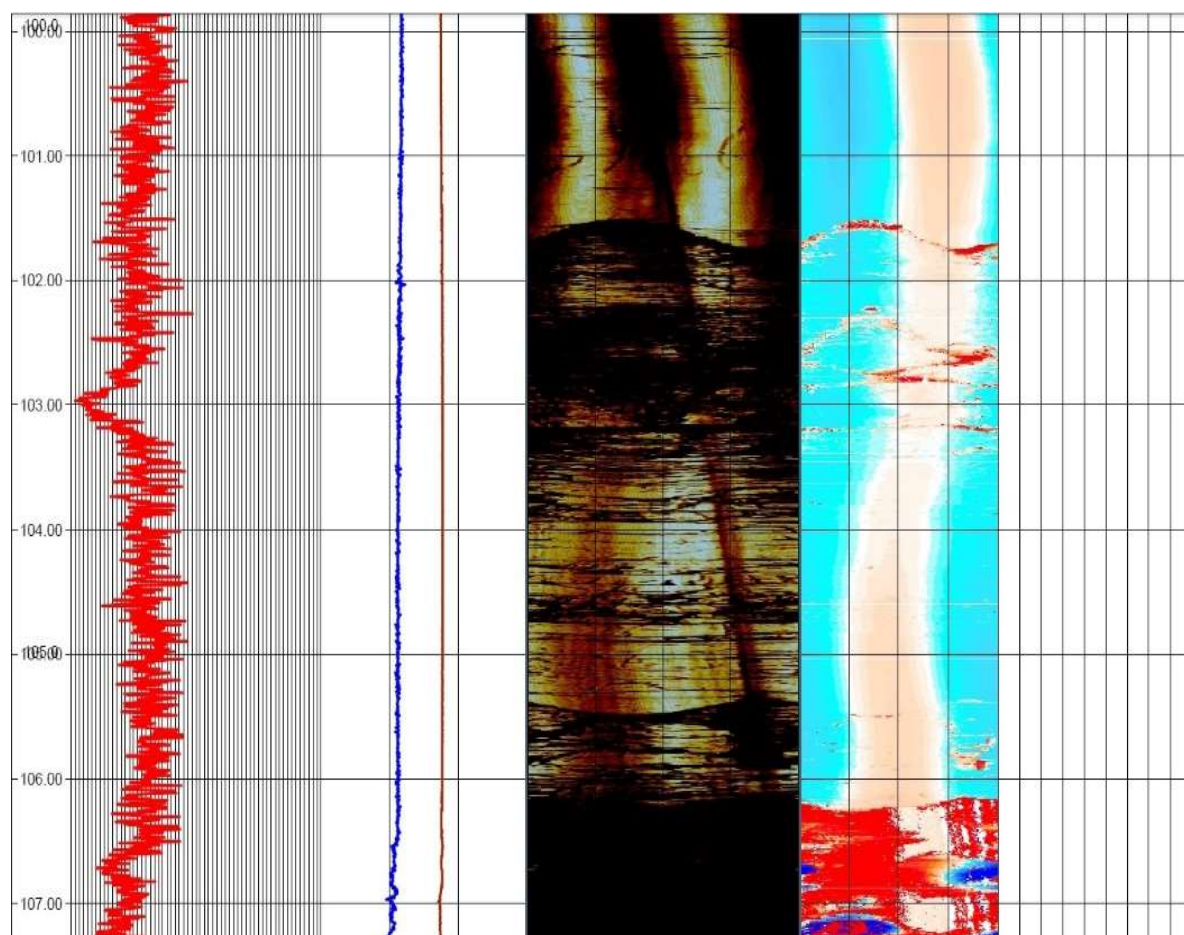


Рис. 2. Первичные (необработанные) данные по скважине

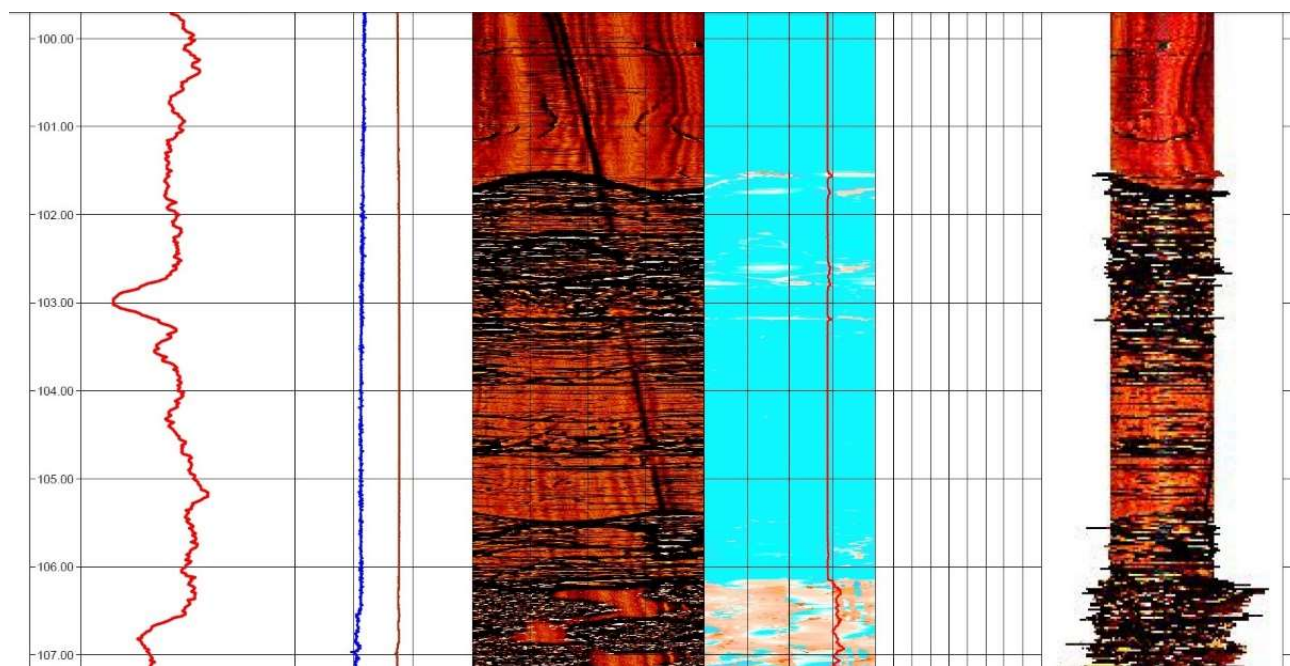


Рис. 3. Обработанные данные в программе WellCad

В итоге, на выходе имеются обработанные данные, которые существенно отличаются от первичных данных и подлежат интерпретации.

4. Интерпретация данных каротажа в программе WellCAD

Основной задачей интерпретации данных является выделение нарушений и их классификация. Литология и структуры на стенках буровой скважины просматриваются непосредственно на изображениях ATV. Литологические и структурные элементы отображаются синусоидальными кривыми в интерактивном режиме, а фактическая ориентация рассчитывается при помощи программного обеспечения.

В процессе выделения нарушений ведется автоматический учет данных инклинометрии, кавернометрии, а также вводится поправка за магнитное склонение. Данные об угле и азимуте структурных неоднородностей получаются истинными.

Для получения достоверных геотехнических данных необходимо сопоставлять данные ATV с данными геотехнического документирования керна для точного определения типов различных нарушений. Процесс интерпретации данных схож с геотехническим описанием керна. Стоит отметить, что телеакустический каротаж позволяет более точно описывать сильнотрещиноватые зоны, где потери керна и сильная разрушенность пород препятствуют точному геотехническому описанию при отборе ориентированного керна.

Трещины отмечаются в виде синусоида с пониженной амплитудой. При этом, как правило, диаметр скважины неизменен. Литологический контакт выделяется по смене «характера» амплитуды. Зона интенсивной трещиноватости (Joint Zone) также как и трещины, отмечаются пониженной амплитудой, но при этом отличаются значительной мощностью. Зоны дробления отличаются от зон интенсивной трещиноватости еще большей мощностью и большими аномалиями по амплитуде.

5. Предоставление итоговых материалов

В конечном документе должны быть отражены следующие данные по скважине (рис. 4-5):

- 1) 3D-проекция скважины с учетом данных кавернометрии и вынесенными направлениями структур;
- 2) изображение нормализованной амплитуды;
- 3) выделенные структуры;
- 4) среднее значение диаметра скважины, рассчитанное по данным изображения радиуса скважины;
- 5) изображение с данными о радиусе скважины;
- 6) направление нарушений (Tadpole (от англ. «головастик»), изображенное графически с помощью окружности, (головы) и линии, (хвоста). Позиция головы слева направо показывает угол падения структуры. Позиция хвоста показывает азимутальное направление структуры;
- 7) кривая количества структур на метр. Рассчитывается в программе WellCAD;
- 8) параметр RQD. Рассчитывается в программе WellCAD;
- 9) стереограмма нарушений в выбранных интервалах глубин и статистика по ним.

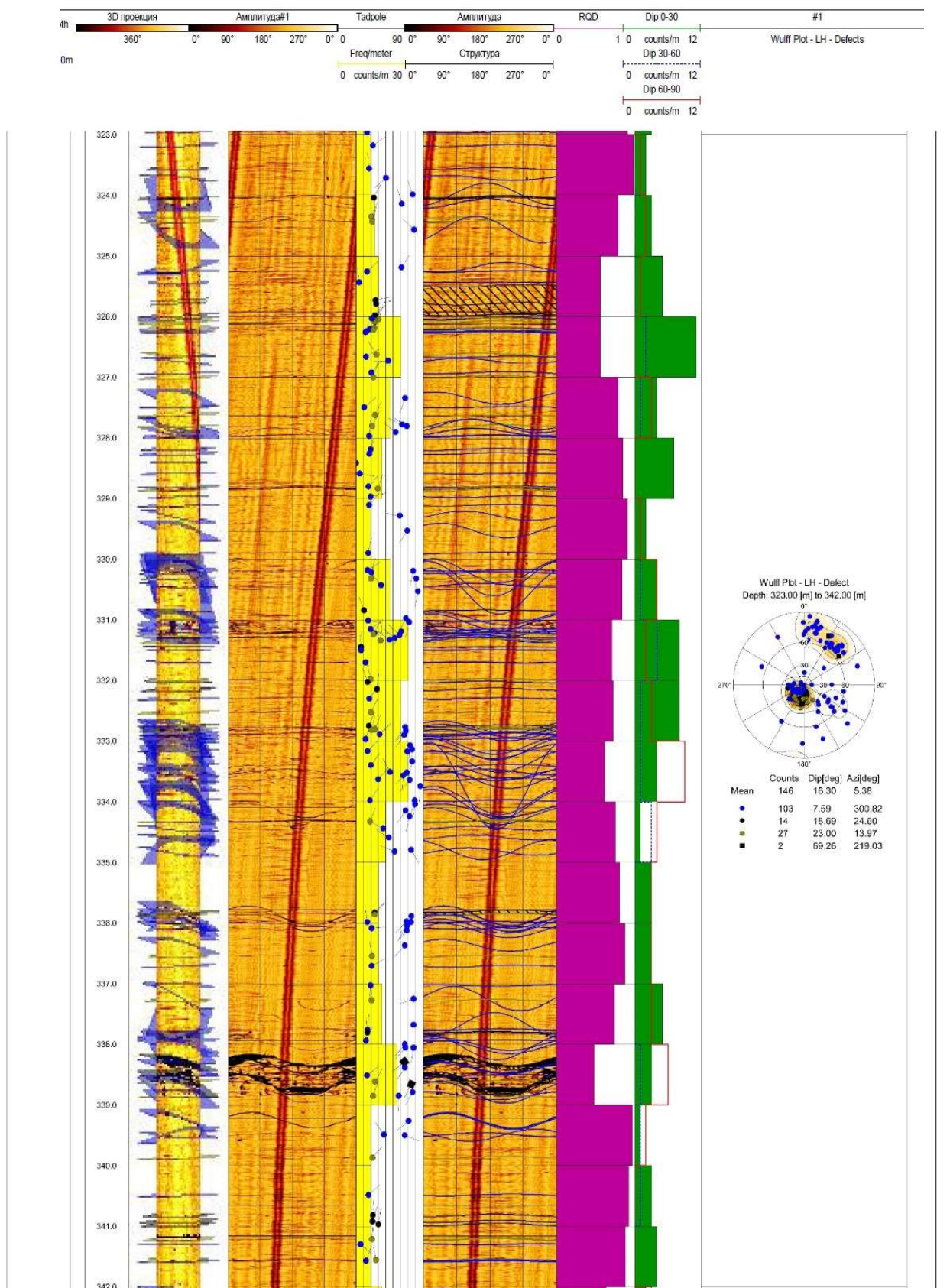


Рис. 4. Пример интерпретации данных ATV

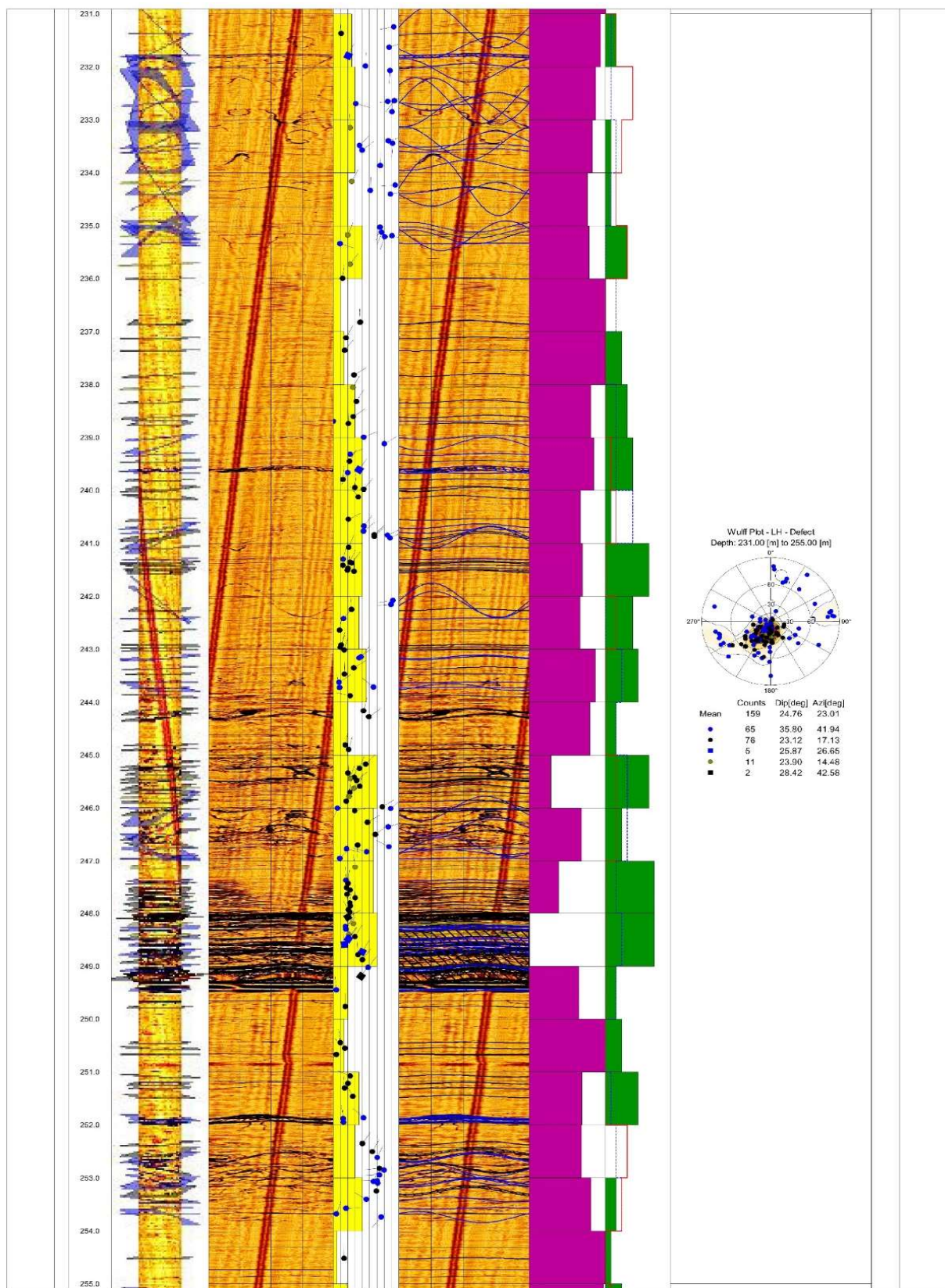


Рис. 5. Пример интерпретации данных ATV

6. Выводы и рекомендации

По результатам работ можно уверенно говорить о методе телеакустического каротажа, как об альтернативе традиционному методу отбора ориентированного керна, и рекомендовать его к применению на всех стадиях геологического изучения, а также разработки месторождений.

Преимущества метода состоят в следующем:

- 1) получение данных о геомеханических и структурно-геологических особенностях в самом массиве исключает технические ошибки при отборе ориентированного керна, связанные с потерей ориентировки, появлением техногенной трещиноватости керна в процессе бурения и его извлечения, особенно в трещиноватых и рассланцованных породах;
- 2) запись на скважине всех параметров ведется в автоматическом режиме, все расчеты выполняются программой, что повышает достоверность результатов. В задачи интерпретатора входит только выделение нарушений и их классификация;
- 3) возможность получать данные о залегании нарушений, отбор ориентированных образцов которых затруднен (зоны дробления);
- 4) сокращает сроки обработки, по сравнению с отбором и последующей документацией ориентированного керна;
- 5) возможность выполнения телеакустического каротажа не только в специальных геотехнических, но и в разведочных и вертикальных скважинах;
- 6) позволяет получать оперативную информацию о состоянии массива пород, иметь стереограммы трещиноватости как по отдельным интервалам, так и в целом всему стволу;
- 7) данные каротажных диаграмм экспортируются в другие программы и текстовые файлы.

В то же время существует ряд ограничений метода:

- 1) обязательное наличие жидкости в исследуемом интервале. А также отсутствие твердых или газообразных включений в жидкости;
- 2) из-за применения магнитных датчиков для определения ориентировки прибора невозможность использования в сильномагнитных породах;
- 3) при ориентации структур, пересекающих скважину под малым углом, возникает проблема невидимых зон, которая характерна для всех методов ориентирования.

Список использованной литературы:

Farrin De Frederick, Ta Nquyen и пр. Geotechnical data from optical and acoustic televiewer surveys.
Robert Garfield (2010). Borehole geophysical logging. Ragged mountain project Charlottesville, Virginia.
Acoustic televiewer geophysical logging and structural analysis of the rock massif of gold mine Altyntau, Kokshetau.

Ю.А. Строчков

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ВИБРАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ РЫХЛЫХ ГРУНТОВ

ФГБУ "Росгеолфонд"

Тезисы не представлены

РЕЗУЛЬТАТЫ ДОЛГОСРОЧНОГО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ В ПЕРИОД 2009-2022 ГГ.

(ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс")

Большинство работ в рамках тематики взаимосвязи естественного электромагнитного излучения горных пород (ЕЭМИ) и изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) (геодинамики) в подземных выработках посвящено измерениям ЕЭМИ в угольных шахтах, выработках рудников и на карьерах. Основа этих работ – контроль и прогноз горных ударов, катастрофических сдвижений массивов. Работ по регистрации ЕЭМИ в транспортных тоннелях сравнительно мало, но они звучат достаточно убедительно и позволяют полагаться на результаты регистрации ЕЭМИ при оценке изменения НДС системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив» при высоком уровне техногенных помех, и даже создавать системы непрерывного контроля ЕЭМИ – по аналогии с системами ЕЭМИ-мониторинга в угольных шахтах [1, 2].

Вопросы учета вариаций сигналов ЕЭМИ различных уровней от суточных до сезонных и годовых очень важны для разрабатываемых систем геодинамического мониторинга. Так как четкая фиксация таких вариаций позволяет понимать режим существования вмещающего массива и подземного объекта в нем. А по аномальным отклонениям от установившегося режима можно делать выводы об аномальных изменениях НДС, приводящих к геодинамическим явлениям. Однако, для того, чтобы делать прогнозы, необходимо задавать критерии таких отклонений, что в свою очередь возможно только при сверхдолгосрочных наблюдениях по системе мониторинга, исчисляющихся десятилетиями.

Примерам регистрации вариаций ЕЭМИ и связи их девиаций с крупными геодинамическими событиями посвящен «Каталог импульсных предвестников землетрясений» [3], содержащий результаты наблюдений ЕЭМИ в сейсмоактивных регионах Земного шара и результаты спутниковых наблюдений при пролете над районами землетрясений. Основу «Каталога...» составляют публикации советских и зарубежных авторов. Данные разбиты по регионам бывшего СССР: Карпаты, Кавказ, Средняя Азия, Казахстан, Камчатка, и странам: Япония, Китай, Болгария, США, Франция (Кергеленские острова). В «Каталоге...» приводится словесное описание аномалий ЕЭМИ, предшествующих сейсмическим событиям, а также графики и регистрограммы интенсивности ЕЭМИ, приведены некоторые данные по особенностям используемой аппаратуры, условиям регистрации ЕЭМИ перед сейсмособытиями, а также некоторые характеристики самих землетрясений.

Аналогичные данные получены в целом и нами при исследовании ЕЭМИ при изысканиях (до начала строительства горных тоннелей в массивах горных пород в Юго-Западной части Северного Кавказа), в процессе строительства, а также на этапе продолжающейся ныне эксплуатации этих тоннелей. С 2009 по 2013 год регистрация ЕЭМИ в выработанном пространстве тоннелей, а также на поверхности над ними велась в ручном режиме (переносными прибором регистрации). С декабря 2013 года по настоящее время получены данные о ходе вариаций ЕЭМИ при регистрации в режиме непрерывного автоматизированного мониторинга. В период 2013 – 2022 выполнены наблюдения ЕЭМИ при подготовке и реализации землетрясений с магнитудами $M = 4.3-4.7$ как в ручном режиме, так и в режиме долгосрочного мониторинга (измерения до и после землетрясения от нескольких часов, до нескольких месяцев).

Также в первом приближении получены некоторые взаимосвязи ЕЭМИ горных пород с НДС постоянных обделок транспортных тоннелей при совместных долгосрочных наблюдениях этих параметров.

Аппаратура и визуализация ЕЭМИ

Регистрация параметров ЕЭМИ производилась при помощи аппаратуры типа «Ангел» – это собственно аппаратура «Ангел», производства ВНИМИ (1998 г.), а также ее модификация ANGEL-M (2015 г.), аппаратура ERA-EMI и собственные разработки НИО «ЛМГТ» – аппаратура EMI-PM, EMI-1K и EMI-3K (изготовление НПП «ЭРА-Макс», г. Санкт-Петербург). Частотный диапазон 1-500 кГц.

Углубленная интерпретация распределения параметров нестационарных геофизических полей, связанных с разрушением горных пород для решения задач контроля и прогнозирования состояния массивов горных пород и конструкций капитальных выработок выполняется средствами визуализации в частотной области данных ЕЭМИ.

Масштабные уровни регистрации ЕЭМИ

Многочисленными лабораторными исследованиями было показано, что ЕЭМИ связано с развитием процессов микро трещинообразования и возникает в процессе разрушения материала. Эта особенность аномалий ЕЭМИ аналогична как на уровне лабораторных испытаний, так и для крупномасштабных исследований, включая взрывы и землетрясения. Нами также проводились лабораторные испытания, результаты которых более подробно изложены в [4].

Аналогичные сигналы нами получены и при натурных исследованиях в различных горных выработках. При натурных экспериментах в отличие от измерений на образцах – многочисленные сигналы от деформирующихся неоднородностей в горной породе сливаются в общий интегральный фон, дифференцируемый при визуализации амплитудно-частотных характеристик. По увеличению амплитудного уровня на характерных для материала частотах определяются интервалы сооружения, в области которых в породе и/или конструкциях весьма вероятно протекают интенсивные геодинамические процессы. Здесь критически важен учет техногенных помех.

Другим, более грубым способом обработки результатов регистрации ЕЭМИ является осреднение каждого сигнала и экстракция амплитудного параметра «А» – средней амплитуды импульсов зарегистрированных в заданный промежуток времени (10-80 сек) в полосе частот 30-50 кГц (центральной полосе для регистрирующей аппаратуры).

Амплитудный параметр «А» рассчитывается, в выбранном интервале записи, как среднее арифметическое по абсолютным (выпрямленным) значениям отсчетов или их квадратов. Затем с учетом усиления пересчитывается в микровольты.

Таким образом, решается вопрос оперативности передачи мониторинговой информации по телекоммуникационным сетям, хотя и с потерей большей части информации – объем памяти, занимаемой файлом при осреднении, снижается более чем в 1000 раз.

Однако задача регистрации значимых аномалий ЕЭМИ при такой схеме осреднения все же решается. Примером служит поведение амплитудного параметра «А» при реализации сейсмических событий.

В работе [5] предприняты попытки поиска прогнозных критериев сейсмособытий по данным автоматизированной системы комплексного геотехнического мониторинга в транспортных тоннелях Сочи – подробно рассмотрен случай регистрации ЕЭМИ при

достаточно мощном землетрясении ($m_b = 4,7$) 30 мая 2012 года.

Аналогичный случай реакции амплитудного параметра «А» на землетрясение, показан на рис. 1. Показаны ночные и дневные интервалы измерений ЕЭМИ по одной из замерных станций автоматизированной системы комплексного геотехнического мониторинга. В период с 3:57 по 4:01 1.09.2020 отмечен аномальный спад значений параметра «А» в момент реализации землетрясения с $m_b = 4,3$ на удалении от места регистрации до 100 км в 3:59 по местному времени. В дневное время колебания параметра связаны с движением электричек. Измерения ведутся 1 раз в 4 минуты.

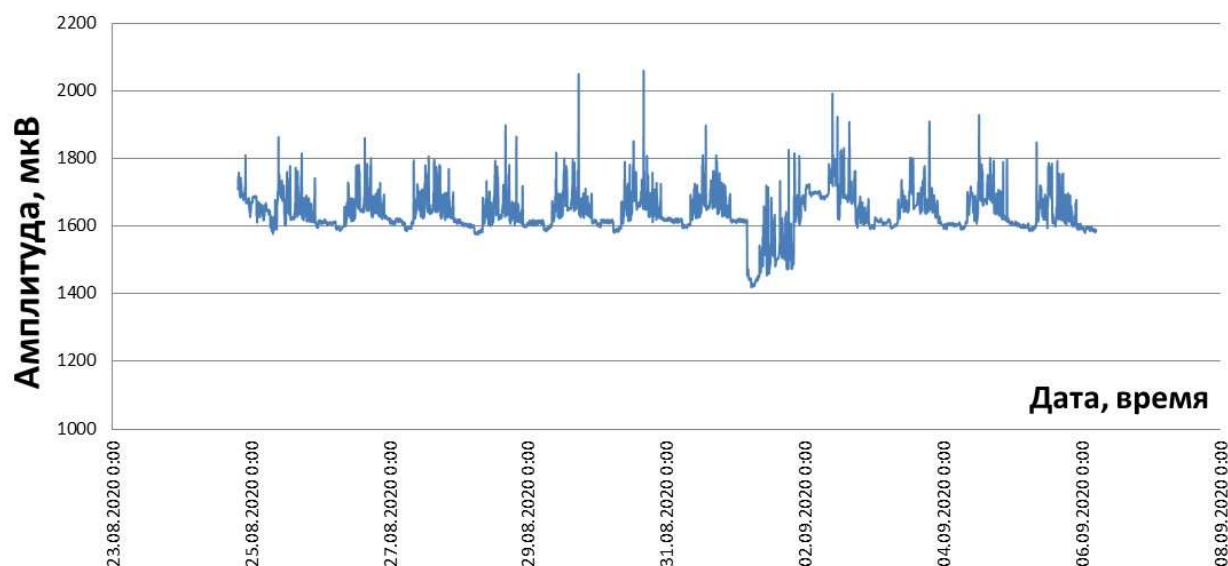


Рисунок 1. Реакция амплитудного параметра «А» на землетрясение 1.09.2020 (измерения ЕЭМИ по автоматизированной системе геотехнического мониторинга, амплитудный параметр «А»)

Вопрос стабильной регистрации ЕЭМИ при подготовке и реализации землетрясений еще конечно далеко не решен: например, не понятно, почему иногда сейсмособытия отражаются в поле ЕЭМИ, а иногда нет; почему могут быть зарегистрированы некоторые дальние землетрясения, а события в ближней зоне могут никак не отражаться при регистрации ЕЭМИ и др. В целом нестабильность фиксации сейсмособытий при регистрации ЕЭМИ отмечается всеми исследователями, работающими в данном направлении и здесь вопросов значительно больше чем ответов.

Результаты долгосрочной регистрации ЕЭМИ, НДС и температуры воздуха

Температурные колебания значений по датчикам НДС за весь период находятся в пределах 1-4 МПа с четко выраженной сезонностью. Прослеживается безусловная прямая зависимость регистрируемых данных по датчикам НДС от температуры воздуха (и соответственно температуры тоннельной обделки). Это объясняется процессами сезонного сжатия и растяжения струн в измерительных струнных тензодатчиках.

В начале эксплуатации тоннелей напряжения в монолитной железобетонной обделке развиваются интенсивнее. По линиям тренда для датчиков НДС можно сделать вывод о плавном увеличении напряжений в обделке с последующей стабилизацией в течение 1- 4 года после начала эксплуатации.

В начале эксплуатации тоннель и вмещающий массив приходят в равновесие. Накопленных электрических зарядов на бортах микротрещин, микродефектов, микронеоднородностей, трещиноватости больше и первое время происходит их активная компенсация.

Сезонные колебания ЕЭМИ идентичны в течение всего периода наблюдений, но

отличаются по интенсивности в начале измерений (с 2013 по 2017 г). Далее с декабря 2017 года по настоящее время наблюдается стабилизированный ход ЕЭМИ с выдержанными по интенсивности и частоте минимумами и максимумами.

В начале измерений минимумы ЕЭМИ достаточно четкие, с 2017 года минимумы растянуты на несколько месяцев.

Минимумы ЕЭМИ наблюдаются:

- в январе 2014, январе 2015, январе 2016 гг.;
- с декабря 2016 – января 2017 по июнь 2017 г.;
- с января 2018 по май 2018 г.;
- с ноября 2018 по июнь 2019 г.;
- с января 2020 по июнь 2020 г.

То есть минимумы ЕЭМИ в начале измерений достаточно четко совпадают с минимумами температур, после трех лет эксплуатации минимумы ЕЭМИ растягиваются с минимума температур до начала лета.

Наблюдаются локальные и основные максимумы

Максимумы ЕЭМИ наблюдаются:

- в марте-апреле 2014 г. – локальный;
- в августе 2014 г. – основной;
- в феврале-апреле 2015 г. – локальный;
- в августе 2015 – основной;
- в мае-июне 2016 г. – локальный;
- в июле-августе 2016 г. – основной;
- в январе 2017 г. – локальный;
- в августе 2017, августе 2018, августе 2019, августе 2020.

Локальные максимумы ЕЭМИ связываются с резким перепадом температур, основные максимумы ЕЭМИ – с максимальными температурами.

Учитывая особенности расположения стационарных датчиков ЕЭМИ в системе «обделка тоннеля – вмещающий горный массив» можно предположить, что решающее значение в формировании сезонных вариаций оказывает изменение температурного режима, на фоне которого происходит периодическое смыкание и размыкание существующих в горных породах микродефектов и микротрещиноватости.

Из основ механики горных пород [6] известно, что напряженное состояние пород вокруг капитальных и подготовительных выработок определяется несколькими факторами. Первую группу факторов составляют пространственно-геометрические параметры рассматриваемых выработок. Ко второй группе относятся деформационные характеристики пород в непосредственной близости от контура выработки, поскольку именно эта часть массива воспринимает дополнительные нагрузки при образовании выработок.

Третья группа факторов охватывает особенности естественного поля напряжений в нетронutom массиве, т.е. до проведения выработок. Наконец, четвертую группу факторов составляют характеристики воздействий на породы вокруг выработки в процессе ее проходки и дальнейшей эксплуатации. Наибольшее значение среди факторов этой группы имеют динамические нагрузки, а также изменение свойств пород под влиянием движения воды и воздуха и изменения температурного режима.

По данным долгосрочных наблюдений в рассматриваемых тоннелях можно исключить влияние каких-либо аномальных изменений напряженного состояния горных пород вокруг тоннелей на данные ЕЭМИ – данные мониторинга НДС показывают плавный тренд с выходом на последующую стабилизацию по результатам долгосрочных наблюдений.

Для материала тоннельной обделки – бетона – лабораторными экспериментами [7] также показаны изменения характеристик ЕЭМИ после воздействия повышенных температур. Эти эксперименты по регистрации ЕЭМИ от образцов бетона показывают, что для образцов после нагревания до разных температур формы сигналов ЕЭМИ похожи по форме, но

различаются по интенсивности. Влияние температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние обделок тоннелей представлено в [8], здесь дается механизм изменения раскрытия трещин, четко коррелирующий с изменением температуры воздуха в тоннеле, при понижении температуры – трещины раскрываются, при повышении – закрываются.

Наблюдаемая связь ЕЭМИ с температурой не прямая, а опосредованная через изменение характеристик прилегающих к выработке горных пород – а именно через процессы их сжатия и растяжения, ведущих к смыканию и размыканию существующих в них микродефектов и микротрещиноватости. Схематично такой механизм показан на рисунке 2.

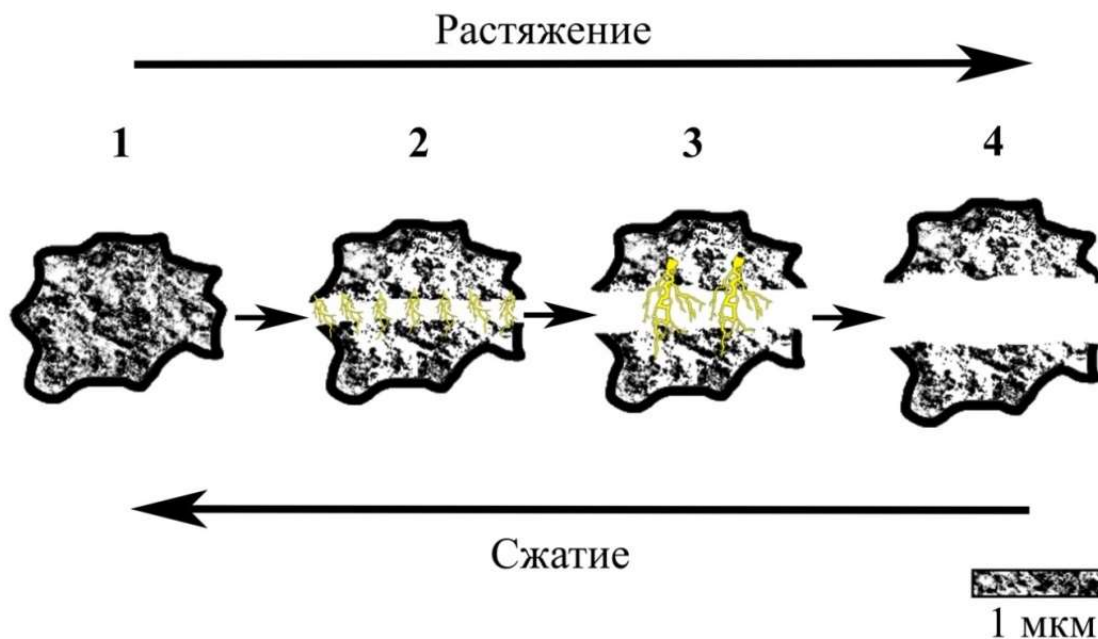


Рисунок 2. Схематическое изображение возникновения ЕЭМИ при сжатии и расширении микродефектов в трещинах горного массива вокруг тоннеля и в материалах конструкций

Так, в стабильном сжатом состоянии фиксируются минимумы импульсов ЕЭМИ (1), при растяжении массива и материала обделки происходит разделение зарядов на бортах микродефектов (2) и происходит нарастание ЕЭМИ (3), полное разделение бортов микродефектов приводит к прекращению интенсивного ЕЭМИ (4). Данный процесс протекает в обратную сторону при сжатии микродефектов и микротрещиноватости в массиве горных пород. Периоды сжатия и растяжения тесно связаны с температурными колебаниями, в связи с этим возникает сезонность ЕЭМИ.

Выводы

Результаты долгосрочной регистрации ЕЭМИ по системе автоматизированного геотехнического мониторинга отражают циклические изменения свойств прилегающего к тоннелям горного массива в тесной взаимосвязи с температурным режимом. На различных участках выявлено, что связь эта не прямая и не постоянная – она может зависеть от структурного состава вмещающих горных пород, материалов и конструкций обделок железнодорожных тоннелей, различных механизмов смыкания и размыкания микродефектов для конкретного вмещающего массива и др.

Для более уверенных выводов необходимо продолжение анализа данных по автоматизированной системе геотехнического мониторинга тоннелей.

Необходимо более подробно изучить вопросы возникновения и развития цикличности и сезонности в данных ЕЭМИ, в том числе и в связи их с наземными измерениями по

региональной сети.

Провести детальную обработку мониторинговых данных методами математической статистики. Выявить количественные взаимосвязи параметров ЕЭМИ и НДС.

Проследить реакции ЕЭМИ на землетрясения на различных участках.

Открытым также остается вопрос о влиянии и учете техногенных помех. Очень часто полезный сигнал невозможно отличить от случайной импульсной (не регулярной помехи). Однако настоящая работа как раз дает возможность на больших рядах данных увидеть, что, несмотря на большое количество техногенных помех в действующих транспортных (железнодорожных) электрифицированных тоннелях удастся регистрировать ЕЭМИ системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив».

Важным аспектом является и подтверждение возможности контроля современной динамики горных пород и конструкций тоннелей, выявление стабильной цикличности соответствующей нормальному функционированию систем «обделка тоннеля – вмещающий горный массив». Это особенно важно, учитывая прогнозный характер ЕЭМИ.

Необходимо дополнительно заметить, что представленные результаты получены по осредненным данным. Спектрограммы сигналов ЕЭМИ предоставляют более полную информацию по каждому измерению, ярко отражающую структуру излучения, а, следовательно, и динамику геомеханического процесса в массиве. Сейчас данные спектрограмм используются нами при изучении процессов деформации образцов различных материалов и при однократных измерениях в тоннелях, но не в режиме полноценного непрерывного мониторинга. Эти работы продолжаются, и в дальнейшем будет оцениваться ЕЭМИ, возникающее на последующих этапах жизни опытных подземных сооружений.

Список литературы

1. Wang, Enyuan, Xue-qiu He, Xiaofei Liu and Wenquan Xu. “Comprehensive monitoring technique based on electromagnetic radiation and its applications to mine pressure.” *Safety Science* 50 (2012): 885-893.
2. Xuelong L., Enyuan W., Zhonghui L., Zhentang L., Dazhao S., Liming Q. Rock Burst Monitoring by Integrated Microseismic and Electromagnetic Radiation Methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, November 2016, Volume 49, Issue 11, pp 4393–4406.
3. Каталог импульсных электромагнитных предвестников землетрясений / АН СССР, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта; [Составители Н. Н. Никифорова и др.]. - М. : Наука, 1991. - 126,[2] с. : ил.; 20 см..
4. Romanevich K., Basov A. Assessment of mutual influence of underground constructions on electromagnetic radiation emitted by fractured rock. Paper proceedings ITA - AITES WORLD TUNNEL CONGRESS, Dubai International Convention & Exhibition Centre, UAE, 21 - 26 April 2018, pp. 3575 – 3581.
5. [Kataev S.G.](#), [Lebedev M.O.](#), [Romanevich K.V.](#), [Kuleshov V.K.](#), [Shlyayev S.A.](#) Search for predictive criteria for seismic events according to the automatic system complex geotechnical monitoring in Sochi transport tunnels. [15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2019, Gelendzhik 2019](#), 2019, pp. 571–581. (In Russian).
6. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьн Э.В. Основы механики горных пород. Л. «Недра», 1977. 503 с.
7. Dexing, L., Enyuan, W., Xiangguo, K., Shuai, Z., Yanhui, K., Xiaoran, W., Dongming, W., & Quanlin, L. (2018). Mechanical properties and electromagnetic radiation characteristics of concrete specimens after exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials* 188 (2018), p. 381-390.
8. Трунев В.Г. Влияние температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние обделок тоннелей БАМа : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.15 / Ленингр. ин-т инж. железнодорож. транспорта. – Ленинград, 1990. – 170 с. : ил.

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ ТРАССЫ «АДЛЕР-КРАСНАЯ ПОЛЯНА»

(ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс")

В настоящее время оценка технического состояния транспортных тоннелей осуществляется на основании инструкций и методических рекомендаций [1]. Состав работ по надзору включает визуальные осмотры и геодезическо-маркшейдерские наблюдения состояния конструкций тоннелей с заданной периодичностью, не позволяющие ответить на вопрос о причинно-следственной связи выявленных нарушений с происходящими процессами в работе системы «обделка - вмещающий массив», вызванных техногенными или природными процессами. Такую информацию можно получить только при наличии контрольно-измерительной аппаратуры в теле самой обделки [2]. Опыт строительства транспортных тоннелей показывает, что идеальной схемой для контроля напряженно-деформированного состояния обделки, является оснащение обделки контрольно-измерительной аппаратуры в составе горно-экологического мониторинга при строительстве тоннелей [3].

Реализация горно-экологического мониторинга при строительстве транспортных тоннелей трассы Адлер – Красная Поляна являлась несомненно сложной и уникальной задачей, по результатам которой осуществлялась корректировка проектных решений. Основным объемом работ приходился на выполнение инструментальных геомеханических, геофизических, сейсмологических, гидрогеологических, геодезическо-маркшейдерских и экологических наблюдений. Исследования велись как по временным профилям и точкам наблюдений в горных выработках и на поверхности, так и по системе устанавливаемых по мере проходки тоннелей постоянных датчиков разного типа, которые монтировались с учетом геологических особенностей трассы (литологические разности, тектонические нарушения, разломы). Безусловно наиболее сложные участки, выявленные по трассе тоннелей при строительстве, являются потенциально опасными и при эксплуатации. Но как контролировать такие участки при эксплуатации, можно ли полагаться только на визуальные осмотры? Ведь и практики передачи информации от строительной организации в эксплуатирующую организацию о «сложных» участках строительства нет [2].

Для обеспечения безопасной эксплуатации тоннелей специалистами ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» была разработана и внедрена система геотехнического мониторинга (ГТМ) на основе непрерывного контроля важных параметров системы «обделка-вмещающий массив». Сбор информации происходит в режиме реального времени с возможностью прогнозирования технического состояния основных конструкций тоннелей, что подразумевает оперативный контроль за негативными (техногенными и природными) воздействиями на сооружения и определение качественных и количественных показателей их влияния на конструкции, а также онлайн оценку геодинамической активности системы «обделка-вмещающий массив» для прогнозирования изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) пород вблизи подземных выработок на всем их протяжении. Для этого к моменту окончания строительства была установлена и запущена в эксплуатацию вся контрольно-измерительная аппаратура, выполнена синхронизация всех установленных в конструкции датчиков, налажена регистрация измеряемых параметров в автоматическом режиме и разработан программный комплекс способный решать поставленные задачи с дальнейшей передачей информации диспетчеру на пульт управления [4,5].

Система ГТМ на всех тоннельных участках трассы Адлер – Красная Поляна входит в состав АСУ ТП и состоит из:

- оценки устойчивости системы «обделка – вмещающий массив» методом ЕЭМИ;
- контроля НДС обделок с помощью тензометров;
- контроля состояния системы «обделка – вмещающий массив» по данным регистрации сейсмических колебаний с помощью сети сейсмостанций.

В период эксплуатации в зонах активных разломов аварии могут происходить под влиянием накопления остаточных (трендовых) деформаций или импульсных короткопериодных движений различной частоты и интенсивности, в том числе от местных землетрясений, взрывов и часто повторяющихся нагрузках типа вибрационных от транспорта.

В связи с этим важным условием обеспечения геодинамической безопасности транспортного тоннеля является своевременное выявление и определение уровня деформационного воздействия на

данный объект, и сравнение этого воздействия с нормативным (пороговым) значением его деформационной устойчивости.

По комплексу данных приведенных выше исследований устанавливаются и отслеживаются накопления остаточных деформаций в обделках тоннелей за счет:

1) Сезонных и суточных изменений напряжений (годовые колебания температуры в обделке тоннеля в среднем составляли $+5^{\circ}\text{C}$). На рисунке 1 в качестве примера приведен график временных изменений напряжений за период наблюдений 13.05.2013 г. по 23.03.2022 г., на котором четко прослеживаются сезонные изменения напряжений и тренд (за последние 5 лет порядка 0,5 МПа/год);



Рисунок 1. Изменения напряжений на наружном контуре обделки железнодорожного тоннеля №1 на ПК 169+41 трассы Адлер – Красная Поляна за время эксплуатации.

2) Короткопериодных природных (землетрясения, оползни и т.п.) и техногенных воздействий (взрывы, вибрации при движении транспорта и др.).

Если первое явление в настоящее время хорошо знакомо, то исследования о влиянии вибрационных нагрузок от транспорта и их негативное воздействие на состояние конструкций обделок тоннелей практически не изучено и не изложено в научно-технической литературе [6].

Вибрационная нагрузка от проезда поездов возбуждает колебания в обделке и прилегающей к ней массе грунта. В условиях, когда на контакте обделки с грунтом существует полость или разуплотнение грунта значительных размеров, то в этом месте элемент обделки при возбуждении в нем колебаний будет испытывать свободные колебания, как в мембране и такие колебания будут затухать быстрее, чем в случае, когда обделка плотно соприкасается с массивом грунта. В практике акустического контроля границы «обделка-грунт» такое поведение колебаний связывают с явлением резонанса [7]. Резонанс - это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, которое наступает при совпадении частоты собственных колебаний наблюдаемой системы с частотой колебаний вынуждающей силы.

Известно, что вибрационный контроль широко применяется для диагностики состояния различных машин, механизмов [7] и может быть эффективным методом оценки качества обделок тоннелей. Ускорения, регистрируемые акселерометрами в тоннелях, позволяют оценить сейсмические воздействия от землетрясений и вибрационные нагрузки от поездов. Вибрационный контроль состояния обделки тоннеля с использованием обработки акселерограмм вибраций методами спектрального анализа позволяет выявить частотный и амплитудный состав колебаний, а графическое изображение вибрационного сигнала в виде спектрограмм можно использовать для контроля изменений НДС в системе «обделка – массив горных пород».

По данным исследований [8] было установлено, что хороший контакт обделки с грунтом характеризуется малой начальной амплитудой колебаний и быстрым их затуханием. При плохом контакте амплитуды в начале колебаний имеют высокие значения и колебания затухают заметно дольше. На рисунке 2 показан пример колебаний в обделках при хорошем и плохом контакте обделки с грунтом.

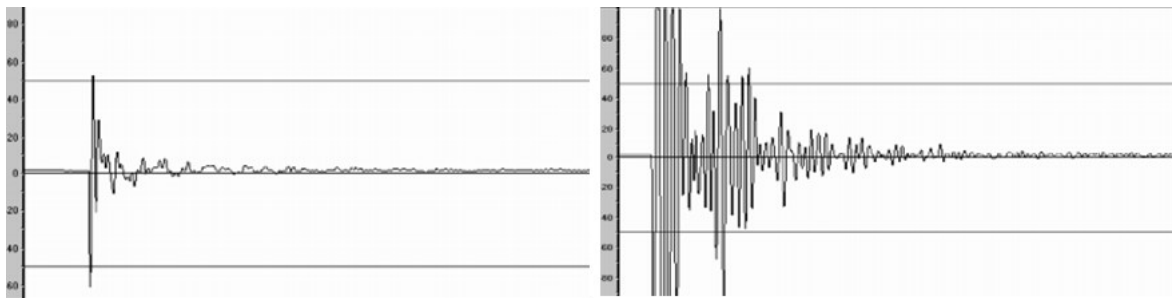


Рисунок 2. Пример записей колебаний в обделках при хорошем (левый график) и плохом контакте (правый график) обделки с грунтом [8].

Вибрационные нагрузки на секционный тип обделки тоннеля № 3 трассы «Адлер – Красная Поляна» изучались в пунктах автоматической регистрации виброускорений, расположенных в зонах тектонических нарушений на ПК 239+74 (разлом мощностью 8 м) и ПК 240+29 (разлом мощностью 218 м) с 2014 по 2022 гг. Поезда электричек практически были одного и того же состава и с примерно одинаковой скоростью движения.

Для примера на рисунке 3 приведена Z компонента акселерограммы (ускорения колебаний в обделке в вертикальном направлении) и её спектр на ПК 239+74. По записям акселерограмм определялись длительность колебаний и максимальные амплитуды. На графиках спектров оценивались частоты соответствующие их максимальным уровням.

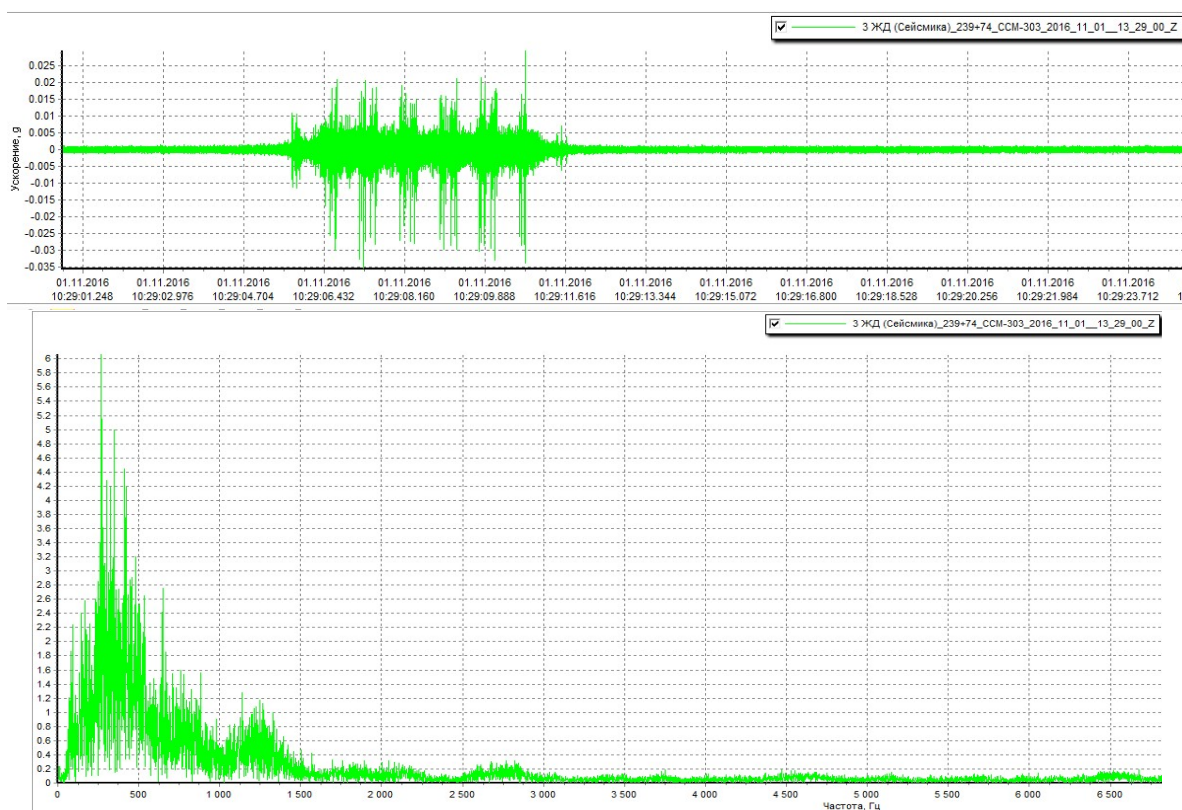


Рисунок 3. Акселерограмма Z компоненты и график спектра сигнала (нижняя часть) при прохождении поезда на ПК 239+74 (3 железнодорожный тоннель)

Наиболее сложная форма спектров отмечается по горизонтальным компонентам колебаний X и Y. По компонентам X на спектрах, полученных по записям акселерограмм на ПК 239+74 в разломе мощностью 8 м, за период наблюдений содержится большее число гармоник, чем по тем же компонентам на ПК 240+29 в разломе мощностью 218 м. Данный результат может быть связан с особенностями проявлений резонанса вибраций в секциях обделки на разломах разной мощности.

Более простой вид имеют спектры колебаний по компонентам Z (рисунок 3) большей частью с четко выраженным максимумом в десятки и сотни Гц. Из результатов следует, что по данной компоненте частоты максимумов спектров в целом выше на разломе меньшей протяженности.

На основании АЧХ характеристик изученных акселерограмм за весь период наблюдений на указанных пикетах и результатов работ [8, 9] можно сделать следующие предварительные выводы:

- максимум на спектрах по компоненте Z на ПК 239+74 (пункт регистрации в обделке на разломе мощностью 8 м) приходится на частоты порядка и 300 Гц и более, что характеризует хорошие условия контакта обделки с грунтом. На ПК 240+29 (в обделке на разломе мощностью 218 м) максимум на спектрах большей частью смещен в сторону низких частот 50-60 Гц и тогда получается, что условия контакта обделки с массивом здесь плохие;

- форма акселерограммы также зависит от качества контакта обделки с породой: при хорошем контакте на акселерограмме колебания имеют резкие вступления и быстро затухают. При плохом контакте амплитуда колебаний до 0.2g и более, запись содержит характерные цуги (пачки) сопоставимые с количеством вагонов с длительным затуханием;

- при вибрационном возбуждении колебаний в обделке тоннеля возникает широкий спектр частот от десятков до нескольких тысяч герц и это является преимуществом при обнаружении и выделении неоднородностей (дефектов разных размеров) в системе «обделка – массив горных пород», которые определяются по резонансному отклику на вибрации. Важно, что данная система «обделка – массив» по-разному реагирует на воздействия, в зависимости от того насколько высоко ее напряженно-деформированное состояние и какие размеры дефектов в ней имеются;

- большее значение при анализе спектров имеет амплитуда первой гармоники;

- амплитуды гармоник уменьшаются с увеличением их числа;

- большое количество гармоник на спектре указывает на присутствие многих повреждений в обделке;

- увеличение числа боковых полос на спектрах долговременных наблюдений свидетельствует о развитии повреждений в обделке;

- одним из признаков наличия значительных повреждений в конструкциях является присутствие в спектре виброускорений со значениями больше $1g = 9.8 \text{ м/с}^2$.

В заключении можно сказать, что в геотехническом мониторинге с точки зрения эксплуатации особую роль играет прогноз состояния системы «обделка тоннеля - вмещающий массив» на основе автоматически формируемой базы данных. Отсутствие заинтересованности организаций, эксплуатирующих тоннели, в такой системе объясняет их недальновидностью, ведь обработка результатов колоссальной по объемам базы данных важна не только для научного прогресса, она имеет большую практическую ценность для безопасной эксплуатации искусственных сооружений.

Список литературы

1. ОДМ 218.3.003-2010 «Методические рекомендации по содержанию автодорожных тоннелей».
2. Лебедев М.О., Безродный К.П., Шляев С.А. Геотехнический мониторинг как основа прогнозирования технического состояния обделки при эксплуатации транспортных тоннелей. Путь и путевое хозяйство. 2019г. №7, с. 20-25.
3. Безродный К.П., Гендлер С.Г., Исаев Ю.С., Лебедев М.О., Иофис М.А. О методическом руководстве по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. Труды международной научно-технической конференции «Основные направления развития инновационных технологий при строительстве тоннелей и освоении подземного пространства крупных мегаполисов. Москва, 2010г. - с. 18-20.
4. Безродный К.П., Культин И.В., Лебедев М.О. Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) в железнодорожных тоннелях Олимпийской трассы. Наука и транспорт, 2009. № 1, 24-26.
5. Безродный К.П., Лебедев М.О., Горно-экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей Северного Кавказа. 2014. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Выпуск 5 (24).
6. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. /С.Н. Власов, Л.В. Маковский, В.Е. Меркин при участии А.Э. Куплиса, В.Ф. Сарбеева, В.В. Торгаелова. – М.: ТИМР, 2000, с. 198.
7. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – М.: Стандартиформ, 2010.
8. Вознесенский А.И., Набатов В.В., Симонов Н.Н., Ромащенко В.А. Опыт акустического контроля границы «обделка-грунт» тоннелей метрополитена. //Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011, №9, с. 201-207.
9. Басов А.Д., Романевич К.В., Андрианов С.В., Шляев С.А. Натурные исследования естественного электромагнитного излучения при вибрационных нагрузках. //Геотехника, т. XII, №3, 2020, с. 70-83.

И.А. Попов¹, Е.В. Балков², Г.Л. Панин², Ю.Г. Карин²

ИСПЫТАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИЛЫ МНОГОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ, ИСПОЛЪЗУЕМОГО ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ КОС ДЛЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

1- ООО «КБ Электрометрии», 2-ИНГГ СО РАН

Введение

В настоящее время метод электротомографии прочно утвердился как эффективный и высокоразрешающий метод исследования приповерхностного пространства до глубин в первые десятки и сотни метров. С одной стороны, целый ряд российских аппаратных разработок позволяет эффективно исследовать первые сто метров грунта при использовании достаточно тонких и легких электроразведочных кос с площадью сечения токопроводящей жилы 0.1-0.2 мм². С другой - появляются аппаратные реализации с большим числом подключаемых электродов (более 100), измерительных каналов и высокой мощностью источника, что потенциально создает возможности для использования больших токов (более 2 А), больших разносов, а значит и увеличения глубинности исследований. В этой связи возникает вопрос о максимальных токах, допустимых при использовании стандартного многожильного электроразведочного кабеля. В данной работе представлены результаты лабораторных испытаний токопроводящей жилы заводского многожильного геофизического кабеля, используемого при производства электроразведочных кос для аппаратуры линейки Скала (Балков и др., 2012), Омега-48 и др. для определения зависимости температуры токопроводящей жилы от пропускаемого по ней электрического тока. Через токопроводящую жилу пропускался электрический ток, контролировалась температура токопроводящей жилы в процессе эксперимента. Температура в кабеле при пропускании токов более 2 А при неизменной комнатной температуре и отсутствии внешних воздействий стабилизируется в течение 10-20 минут.

Материалы и оборудование

Использован отрезок кабеля КЭРм 24x0.16 длиной 40 см. Для проведения эксперимента использовалась одна токопроводящая жила (ТПЖ) площадью сечения 0.16 мм², состоящая из 9 медных проводников диаметром 0.15 мм. В качестве источника использован лабораторный блок питания QJE ps3030. В качестве нагрузки использована электронная нагрузка АКТАКОМ АТН-8036. Для контроля температуры в надрез на оболочке кабеля помещена термопара.

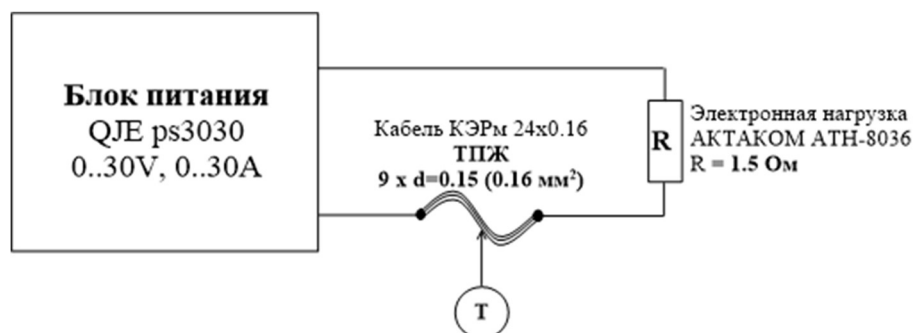


Рисунок 1. Схема подключения токопроводящей жилы к экспериментальной установке.

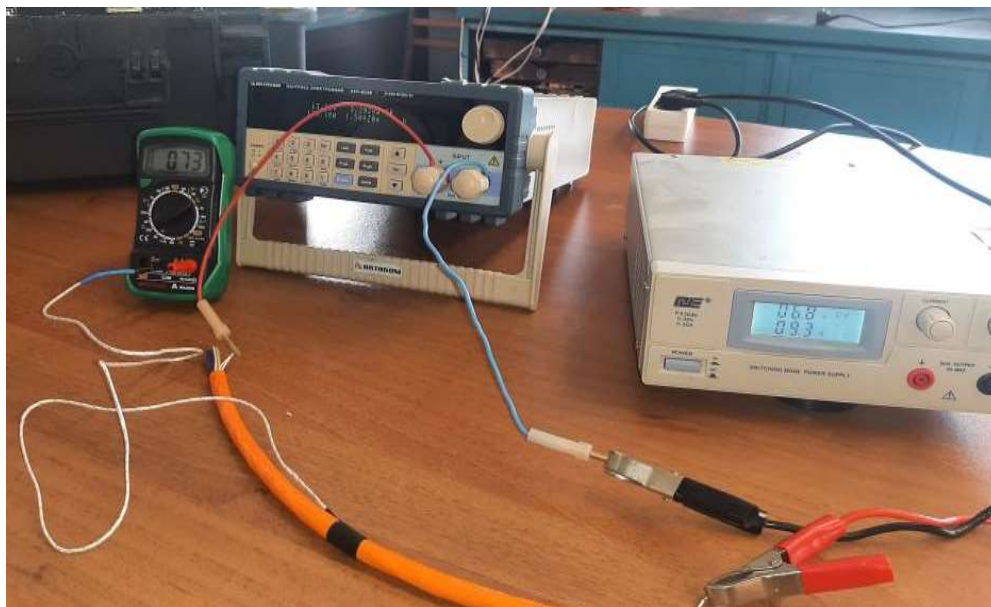


Рисунок 2. Экспериментальная установка.

Производитель кабеля регламентирует рабочий диапазон температур внешней среды ($-20+50^{\circ}\text{C}$). При этой температуре сохраняются гибкость и сопротивление к разрыву как внешней оболочки, так и изоляции внутренних токопроводящих жил. Материал изоляции ТПЖ указан как композиция полипропилена марки ЭКПП-02. Полипропилен имеет температуру плавления: $164-175^{\circ}\text{C}$, температуру размягчения 140°C . Ток плавления медной проволоки диаметром 0.15 мм , используемой в исследуемом кабеле, составляет примерно 4.5 А . Соответственно ток плавления ТПЖ, состоящей из 9 таких проводников можно полагать равным $40,5\text{ А}$. Однако, температура в 140°C токопроводящей жилы может быть достигнута при эксплуатации косы с токами более 2 А , в результате может быть повреждена изоляция токопроводящих жил и произойдет короткое замыкание источника тока. Для оценки температурного режима ТПЖ в процессе эксплуатации с токами более 2 А был проведен лабораторный эксперимент.

Описание эксперимента

Комнатная температура во время эксперимента составляла около 25°C . Сопротивление электронной нагрузки установлено на уровне 1.5 Ом . Ток установлен на трех уровнях ($5, 7, 9\text{ А}$) при напряжении ($7.5, 10.5, 13.5\text{ В}$), мощность составила ($38, 74, 120\text{ Вт}$). В процессе эксперимента ток поддерживался постоянным в течении 30 минут, также проводилась регистрация времени и температуры. На рисунках 3 - 5 приведены зарегистрированные данные о температуре в кабеле.



Рисунок 3. Зависимость температуры от времени при токе в 5 А .

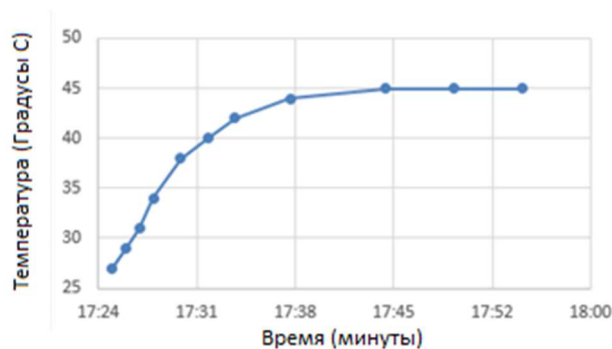


Рисунок 4. Зависимость температуры от времени при токе в 7 А.

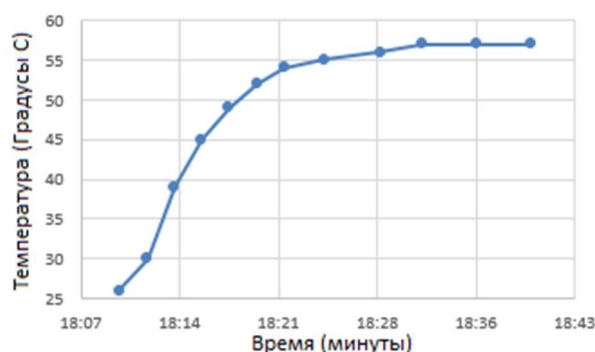


Рисунок 5. Зависимость температуры от времени при токе в 9 А.

Из рисунков 3-5 видно, что температура в кабеле при пропускании токов более 2 А при неизменной комнатной температуре и отсутствии внешних воздействий стабилизируется в течение 10-20 минут. Очевидно, что условия теплового режима эксплуатации кабеля могут существенно влиять на его нагрев. Температура окружающей среды (зима, лето, жаркий климат), тип окружающей среды и характер контакта с ней (воздух, земля, вода), наличие таких факторов как прямые солнечные лучи или ветер могут изменять режим теплоотвода с поверхности оболочки кабеля. Учесть все возможные ситуации не представляется возможным. Однако основываясь на полученных результатах, можно предположить следующее: использование тока на уровне 5А повышает температуру кабеля на 10° С, 7А на 20° С, 9А – примерно на 30° С, что не является критичным. Полученные данные можно использовать для оценки максимального тока при эксплуатации электроразведочных кос в конкретных полевых условиях, ориентируясь на то, что предельная температура ТПЖ не должна быть близка к 140° С.

Выводы

Из результатов представленного исследования можно сделать вывод, что параметры жил в кабеле, рассматриваемых в эксперименте подходят для изготовления кос для электротомографической аппаратуры, так как допустимые токи в аппаратуре не производят нагрев выше допустимых эксплуатационных характеристик этого кабеля.

Библиография

1. Балков Е. В. и др. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения //Геофизика. – 2012. – №. 6. – С. 54-63.

References

1. Balkov E. V. i dr. Jelektrotomografija: apparatura, metodika i opyt primenenija //Geofizika. – 2012. – №. 6. – S. 54-63.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОДВОДНОЙ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ. ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ.

(НПЦ «ГЕОТЕХ»)

Тезисы не представлены

А.В. Лехнович, Г.Л. Панин

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ОДНОЧАСТОТНОГО ПРИБОРА ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАЛОГЛУБИННЫХ ПРОФИЛИРОВАНИЙ

ИНГГ СО РАН

Введение

Широкое распространение в инженерной геофизике получили наземные малоглубинные частотные зондирования и профилирования, в виду высокой скорости измерений, компактности аппаратуры и простоты эксплуатации. Они часто применяются при поиске подземных коммуникаций, врезок в трубопроводы, определение минерализации почвы, археологических исследованиях и многом другом. Компактные устройства для индукционных исследований представлены как зарубежными (GEM-2, DUALEM, CDM-Explorer, EM-31, EM-34-3, EM-38, EMP-400, CMD (Won et al., 1996)), так и отечественными («Геовизер» (Карин, 2018), Nemfis (Манштейн, 2008)) приборами.

У некоторых из вышеперечисленных устройств (EM-34-3, «Геовизер», Nemfis) в приемных частях вся обработка является аналоговой, что влечет за собой определенные проблемы. Одна из основных – невозможность изменять параметры фильтрации сигнала и изменение коэффициента усилителя без внесения дополнительных изменений в электрической схеме, что в свою очередь усложняет устройство и делает его дороже. Также, для перехода от профилирований к геометрическому зондированию необходима многоканальная аппаратура. Для того чтобы решить эти проблемы был разработан макет аппаратуры с цифровой обработкой сигналов и программируемым коэффициентом усиления.

Структура прибора

Каркас прибора, т.е. конфигурация генераторного и приемного вертикального диполя взята от аппаратуры «Геовизер».

Блок-схема одного приемного канала устройства представлена на рисунке 1. Сигнал с приемной катушки (вертикального магнитного диполя) поступает на усилитель с изменяющимся коэффициентом усиления, который может меняться в диапазоне от 1 до 32768 с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), подключенного к программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) Spartan-3AN. После, усиленный сигнал подается на аналого-цифровой преобразователь с разрядностью 12bit и частотой дискретизации от 62.5кГц до 8000кГц. Дискретный сигнал считывается с помощью ПЛИС, где производится последующая цифровая обработка сигнала. Также, к ПЛИС подключена линия синхронизации приемных каналов, имеющих аналогичную структуру. Максимальное число подключаемых каналов – 256. В настоящий момент в макете аппаратуры используется два канала - приемный и токовый. Прямоугольный генерируемый в ПЛИС сигнал подается на драйверы Mosfet-транзисторов. Последние питают генераторную петлю (вертикальный магнитный диполь) по полумостовой схеме. Микросхема STM32f405 управляет ПЛИС по

специальному протоколу. Передача данных осуществляется по UART-протоколу с помощью Bluetooth-модуля со скоростью 128000br. Управление прибором осуществляется с помощью мобильного устройства с операционной системой Android по Bluetooth.

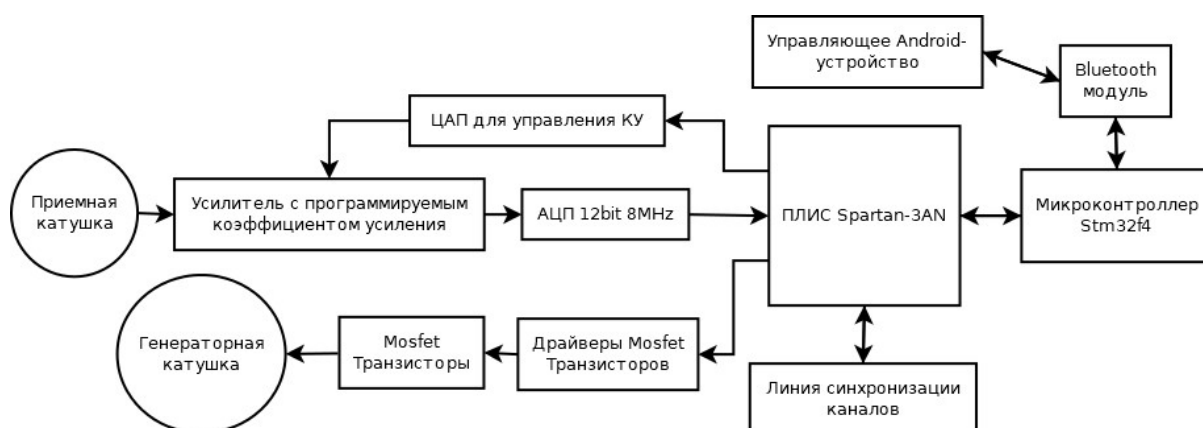


Рисунок 1. Блок-схема одного приемного канала макета устройства.

Цифровая обработка

После АЦП цифровой сигнал поступает на входной фильтр с импульсной характеристикой типа $(\sin(x)/x)^n$, где $n = 0 \dots 4$ – степень фильтра, регулируемая программно. Если выбран режим чтения осциллограммы, то отфильтрованный сигнал передается на микроконтроллер последовательностью отсчетов в количестве 4096. В случае, если выбран обычный режим измерений, сигнал с входного фильтра перемножается с двумя синусоидальными сигналами, фазы которых отличаются друг от друга на 90 градусов (смещение фазы относительно генератора регулируется программно в диапазоне от 0 до 360 градусов с шагом 0.044 градуса). После, перемноженный сигнал проходит через фильтр нижних частот второго порядка (ФНЧ). Ширина полосы пропускания выходного фильтра может меняться в диапазоне от 16Гц до 0.0078125Гц. Процедура перемножения сигнала с двумя синусоидальными компонентами, сдвинутыми по фазе на 90 градусов и их дальнейшая фильтрация называется синхронным детектированием [Лайонс, 2006], в результате которого выделяется две компоненты – синфазная (фаза опорного сигнала совпадает с фазой генератора) и квадратурная. Из этих компонент простыми преобразованиями можно получить модуль сигнала S (1) и фазу сигнала φ (2).

$$S = \frac{1}{2R} \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg(I/Q) \quad (2)$$

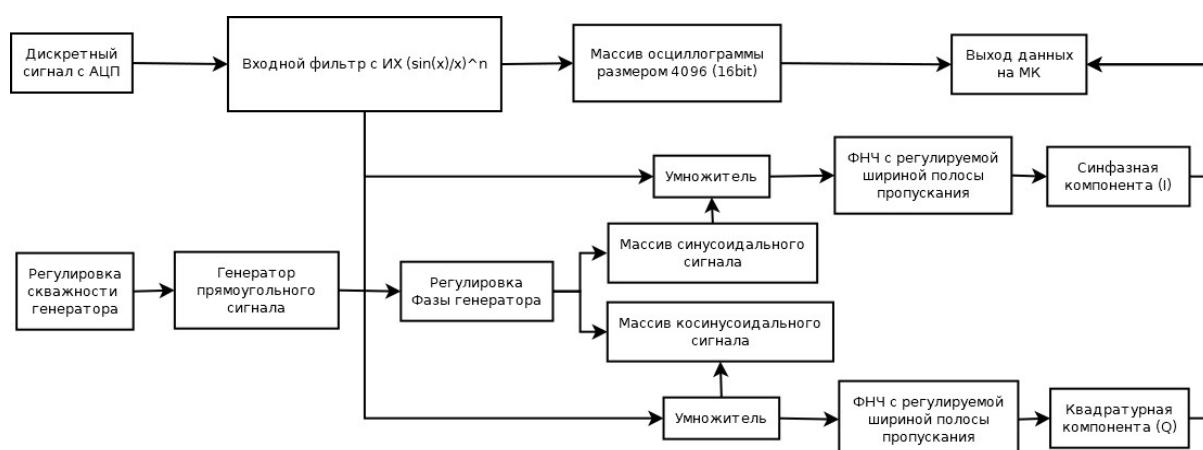


Рисунок 2. Блок-схема цифровой обработки приемного сигнала в ПЛИС

Примеры

После сборки макета в немагнитном павильоне ИНГГ СО РАН были выполнены сравнительные измерения с аппаратурой «Геовизер». Эксперимент заключался в следующем. Макет прибора подвешивался в немагнитном павильоне на высоте 1.2 м, после чего, под прибором, вдоль оси симметрии макета проносилась пластина с высокой электропроводностью из алюминия, размером 0.2х0.3х0.002м. Коэффициент усиления на макете прибора менялся в диапазоне от 31 до 3968. При коэффициенте усиления 992 макет прибора показал соизмеримые по соотношению сигнал/шум показания с аппаратурой «Геовизер» (рисунок 3).

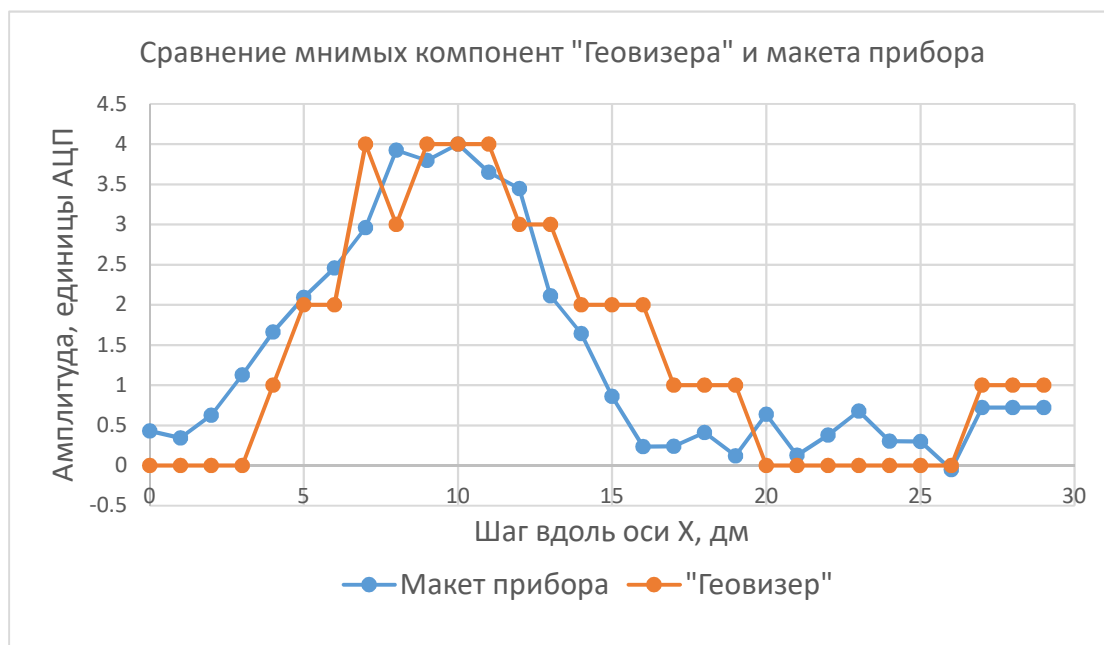


Рисунок 3. Сравнение мнимых компонент «Геовизера» и макета прибора с коэффициентом усиления 992.

Также, были проведены эксперименты на зависимость соотношения сигнал/шум от ширины полосы пропускания выходного ФНЧ, которые показали, что соотношение сигнал/шум увеличивается, при сужении полосы пропускания выходного фильтра (рисунок 4).

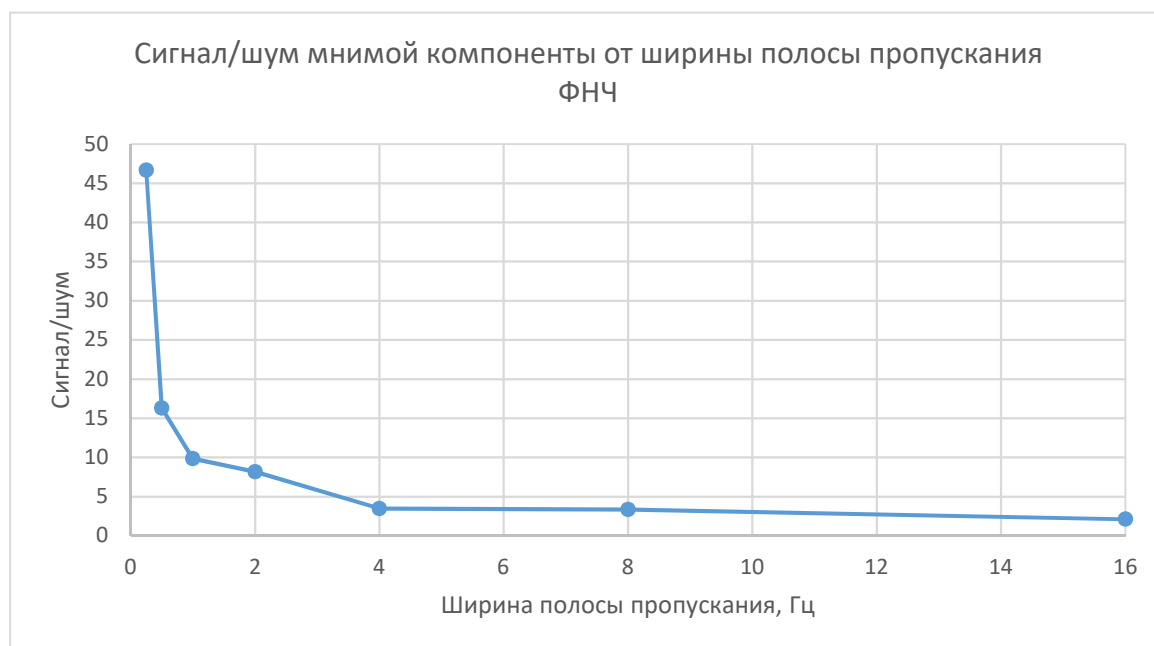


Рисунок 4. Зависимость соотношения сигнал/шум от ширины полосы пропускания выходного фильтра низких частот для мнимой компоненты.

Выводы

Таким образом, программная регулировка коэффициента усиления входного усилителя может позволить увеличить чувствительность аппаратуры в том случае, если уровень приемного сигнала не выходит за пределы динамического диапазона приемной части аппаратуры. Программная регулировка ширины полосы пропускания выходного фильтра низкой частоты также позволяет снизить соотношение сигнал-шум. Добавление нескольких приемных каналов в новой схеме аппаратуры открывает возможность перехода от профилирований к зондированиям, а также возможность проведения профилирования на нескольких каналах одновременно.

Благодарности

Разработка аппаратных и методических решений для электромагнитного профилирования ведется в ИНГТ СО РАН в рамках проекта № FWZZ-2022-0025.

Библиография

1. Карин Ю.Г., Балков Е.В., Фадеев Д.И., Манштейн А.К., Панин Г.Л., Алымов А.О., Романов Д.Б. Электромагнитное профилирование компактной аппаратурой: новый подход и результаты применения // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16. № 4. С. 68-78.
2. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов // ООО "Бином-пресс", Москва. 2006. С. 656
3. Манштейн А.К., Панин Г. Л., Тикунов С. Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования «ЭМС» // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 6. С. 571 — 579.
4. Won I. J., Keiswetter D. A., Fields G. R. A., Sutton L. C. [1996]. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor. Environmental and Engineering Geophysics, 2(1), 129–138.

References

5. Karin YU.G., Balkov E.V., Fadeev D.I., Manshtejn A.K., Panin G.L., Alymov A.O., Romanov D.B. [2018]. Electromagnetic profiling with compact equipment: a new approach and results of application. Vestnik NGU. Series: Information Technology, 16(4), 68-78.
1. Lyons R. Digital signal processing [2006]. Binom-press LLC, Moscow, 656
2. Manshtejn A.K., Panin G.L., Tikunov S.Yu. [2008]. Apparatura chastotnogo ehlektromagnitnogo zondirovaniya “Nemfis”. Geologiya i geofizika, 6, 571–579.
3. Won I. J., Keiswetter D. A., Fields G. R. A., Sutton L. C. [1996]. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor. Environmental and Engineering Geophysics, 2(1), 129–138.

С.В. Гудков

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СЕЙСМОМЕТРОВ И ГЕОФОНОВ С АВТОНОМНЫМИ РЕГИСТРАТОРАМИ GEOSPACE ДЛЯ ЗАДАЧ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И СМР

ООО «Геоснейс»

Тезисы не представлены

И.Н.Модин¹, В.А.Шевченко¹, А.Д.Скобелев¹,
А.Д.Приходько¹, Е.Ю. Гиренко²

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОИСКА ФУНДАМЕНТА ДРЕВНЕГРЕЧЕСКОЙ БАЗИЛИКИ НА БОРИСОГЛЕБСКОМ ГРЯЗЕВОМ ВУЛКАНЕ

МГУ имени М.В. Ломоносова

Введение

На Борисоглебском грязевом вулкане (п-ов Тамань) с целью поиска оснований древнегреческих сооружений проведены геофизические исследования методами электрической томографии, магниторазведки и сейсморазведки (**Рисунок 1**). Работы были выполнены в конце июня 2021 г. геофизическим отрядом лаборатории малоглубинной геофизики кафедры геофизики Геологического факультета МГУ.

Сеть наблюдений состояла из серии профилей, которые располагались на расстоянии 1 метр друг от друга. Шаг между точками наблюдения составлял 1 м (**Рисунок 2**).

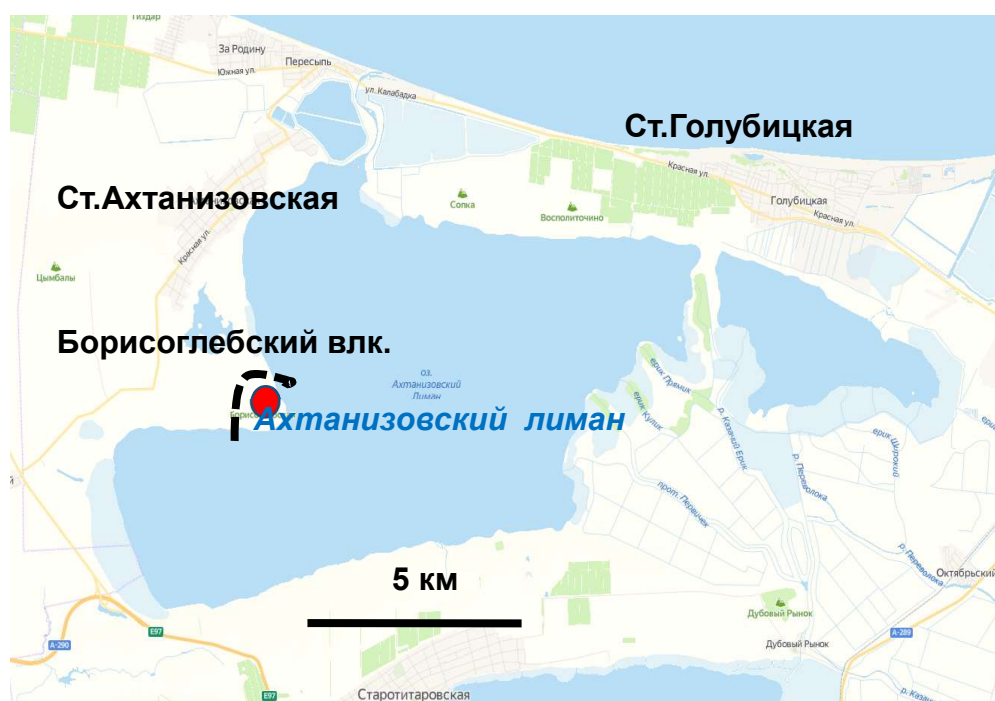


Рисунок 1. Положение участка работ на п-ове Тамань.

Топографическая привязка пунктов наблюдений выполнялась непосредственно при проведении полевых работ с помощью GPS приемника типа RTK. Точность привязки составила ± 10 см. Участок работ привязан относительно пикетов, закрепленных предыдущими геофизиками-исследователями, выполнявшими георадарную съемку.

Методика геофизических работ

Основной объем работ выполняется с помощью электротомографии (Бобачев и др., 2006). Наблюдения методом электрической томографии выполнены с помощью электроразведочной станции Омега-48 (ООО «Логис», г. Раменское). При измерениях на профилях использовались две 24-х электродных косы с шагом между электродами 1 метр.

Длина одной расстановки при шаге между электродами 1 м составила 47 метров. Перекрытия отдельных расстановок в сводных профилях составляло 50%. Наблюдения выполнены симметричной четырехэлектродной и комбинированной трехэлектродной установкой $Amn+mnB$.

Измерения выполнялись с напряжением на выходе генератора 100-300 В. Сила тока в питающей линии достигала значений от 20-50 до 700-800 мА. Форма тока генератора – разнополярные прямоугольные импульсы с паузами, длительность импульсов и пауз между ними 200 мс. Регистрация сигналов в приемных линиях выполнялась с 4 накоплениями.

На каждой расстановке проводился контроль переходных сопротивлений. Условия заземления электродов в подавляющем большинстве случаев были благоприятными за счет вмещающих глин и переходные сопротивления не превышали 3 кОм. Средняя относительная погрешность измерений составила 1.5-2%. Благодаря выбранной методике, гарантированная глубинность измерений составила 10-15 м.

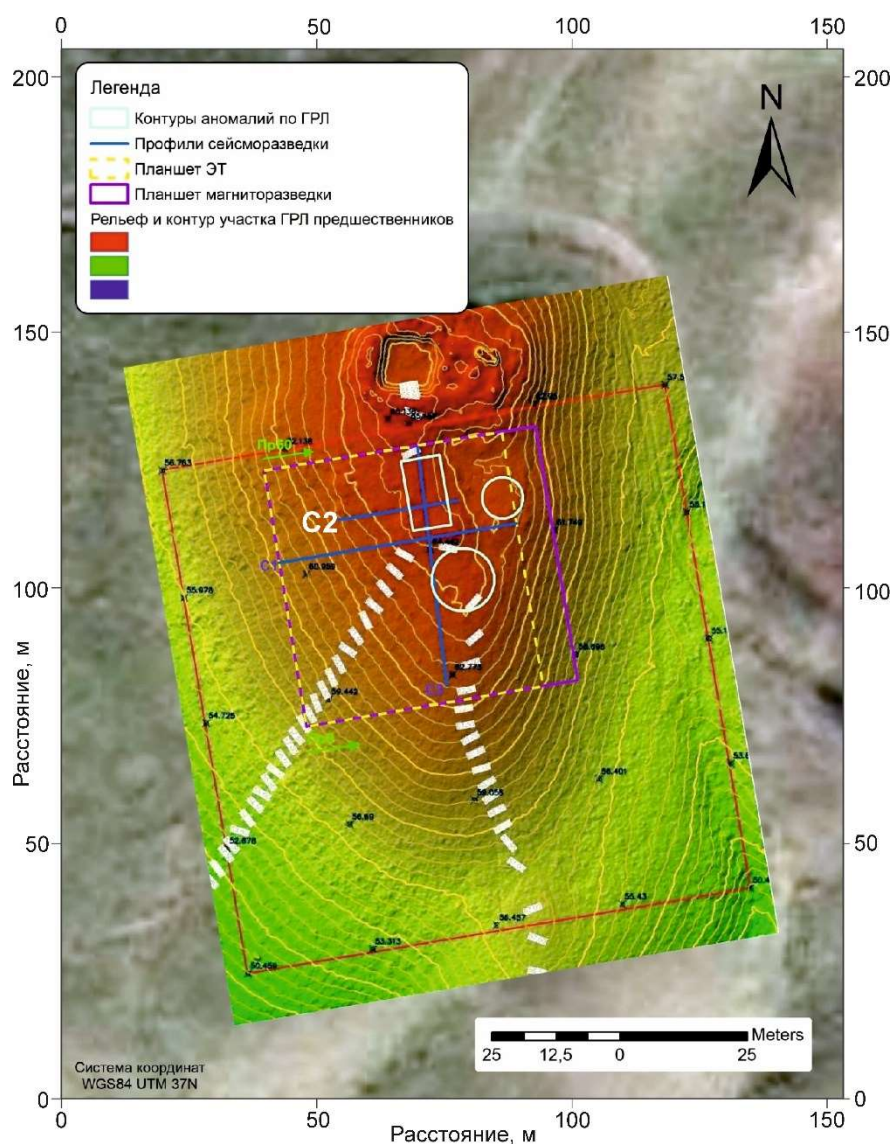


Рисунок 2. Схема участка геофизических работ (C2 – сейсморазведочный профиль 2).

Для сейсморазведки методом преломленных волн (МПВ) использовалась 48-канальная цифровая сейсморазведочная станция ЭЛЛИСС-3 и две сейсморазведочные косы с шагом между разъемами 2 м на 24 канала каждая. Перед началом измерений на каждой раскладке сейсморазведочных кос производился контроль качества подключения геофонов и определялся уровень шума.

Были выполнены сейсморазведочные работы методом преломленных волн (МПВ). Для

этого была выбрана следующая методика (Ермаков,и др.,2016):

1. Пункты приема (ПП) располагаются каждые два метра.
2. Количество ПП на одной косе 24.
3. Измерения производились на двух типах волн: продольных (Р-волны) и поперечных(S-волны).Р-волны возбуждаются путем вертикального удара кувалдой весом 4.5 кг по деревянному стержню (**Рисунок 3**). На каждом ПВ производится от 10 до 20 ударов (накоплений) в зависимости от зашумленности (ветер, дождь и т.п.).

S-волны возбуждались путем горизонтального удара кувалдой по наклонному стержню. На каждом ПВ производится от 7 до 15 ударов с одной стороны и от 7 до 15 ударов с другой стороны балки. По двум профилям длиной 94 м общая длина одной расстановки составляла также 94 метра.

Наблюдения производились вдоль длинных профилей с шагом по пунктам возбуждения 2 м. По профилю длиной 47 м расстояние между геофонами составило 1 м. Минимальное удаление источник-приемник составляет 2 м, максимальный 47 м, что обеспечивает максимальную глубину исследования около 10-12.5 м. Параметры регистрации сейсмических волн: шаг дискретизации 0.5 мс, длина записи составила 512 мс.

Привязка сейсморазведочных профилей осуществлялась по пикетажу профилей, пройденных электроразведкой.

Методика обработки и интерпретации данных сейсморазведки МПВ происходила в несколько этапов: 1. предварительная обработка полевых сейсмических записей; 2. оцифровка первых вступлений преломленных волн и создание систем наблюденных годографов; 3. вычисление сейсмических разрезов.



Рисунок 3. Рабочий момент сейсморазведочных исследований: возбуждение продольных волн с помощью кувалды и деревянного стержня.

Результаты исследований

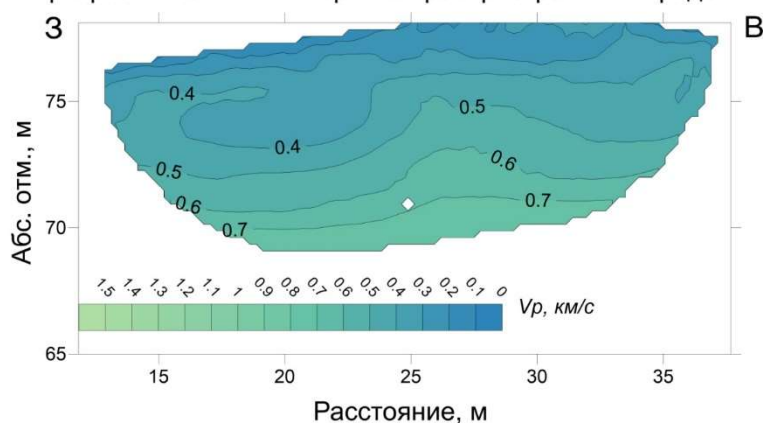
Анализ полученных разрезов скоростей продольных и поперечных волн (Пийп, 1991) указывает на наличие трех зон, которые различаются по физико-механическим свойствам (**Рисунок 4**). Первая зона располагается от пк 17 до пк 21, вторая зона от пк 21 до пк 28 и третья зона от пк 28 пк 34.

Повышенными упругими свойствами обладают две крайние зоны, в которых скорость поперечных волн сравнительно высокая, а скорость продольных волн небольшая (рис.4). В середине профиля наблюдений наблюдается обратная картина – скорости продольных волн возрастают, а скорость поперечных уменьшается. Если сопоставить этот результат с магнитной аномалией, то как раз средняя зона по сейсморазведке попадает на максимум магнитного поля, а две крайние боковые зоны на минимумы магнитного поля (см.рис.6). Примерно такая же

картина наблюдается по срезу геоэлектрического разреза на глубине 159 см. Можно сделать вывод, что все три поля – магнитное, упругих свойств и электрических свойств в плане совпадают друг с другом. Таким образом в центре участка расположена аномальная зона, вытянутая в меридиональном направлении. Для этой аномалии высокие значения электрических сопротивлений соответствуют повышенным значениям магнитного поля (**Рисунок 6**), повышенным скоростям продольных волн и пониженным скоростям поперечных волн. На основании сочетания таких свойств можно предположить, что основание храма могло быть выполнено не из известняка, а, например, из обожженного глинистого материала или это следы обгоревшей черепицы.

2 профиль

Глубинный разрез в изолиниях скоростей распространения продольных волн V_p



Глубинный разрез в изолиниях скоростей распространения поперечных волн V_s

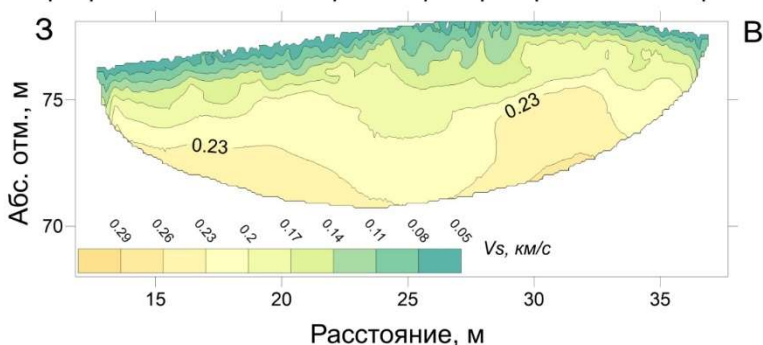


Рисунок 4. Результаты сейсмических работ по профилю 2.

Магниторазведочные наблюдения выполнялись вдоль профилей с шагом 5 м. Привязка точек наблюдения осуществлялась при помощи GPS-приёмников типа RTK, что обеспечило очень высокую точность привязки точек наблюдения. При этом оператор предварительно расставлял по краям планшета колышки, обозначающие края профилей, а сам старался идти со средним шагом 1 м и не отклоняться от профиля наблюдений. Такая методика обеспечила высокую производительность и инструментальную точность съемки. Работы на выполнены с помощью двух портативных протонных магнитометров Минимаг (см. **Рисунок 5**). При этом один из них использовался как автономная магнитовариационная станция, второй магнитометр – для осуществления рядовой профильной съемки. Общее число точек наблюдения рядовых измерений составило 2600. Точность наблюдений по результатам расчетов составила около ± 0.5 нТл.

Аномальное магнитное поле представлено на **Рисунке 6**. На карте аномалий ΔT_a весь планшет съемки четко разделяется на два участка, которые расположены в северной и южной частях планшета. Граница между ними проходит примерно посередине. Южная часть участка характеризуется малоамплитудными бесформенными аномалиями, которые в плане не

образуют четко выраженных структур. Северная часть, напротив, имеет систему аномалий, которые расположены под прямым углом друг к другу и, весьма вероятно, являются отражением строительных конструкций. Можно отметить, что размеры прямоугольника 1, расположенного в средней части северного участка, соответствуют 10 м с севера на юг и ровно 15 м с запада на восток. Такие соотношения очень близки к пропорциям храмов, которые историки называют простиль, а широтная ориентация является наиболее типичной для классических сооружений (Поляков, 2004) (слово «ориентация» произошло от французского словосочетания «направление на восток»). Это всего лишь рабочая версия, которая обязательно должна быть проверена раскопками.



Рисунок 5. Рабочий момент магнитной съемки: оператор один производит измерения, за спиной у оператора RTK - приёмник.

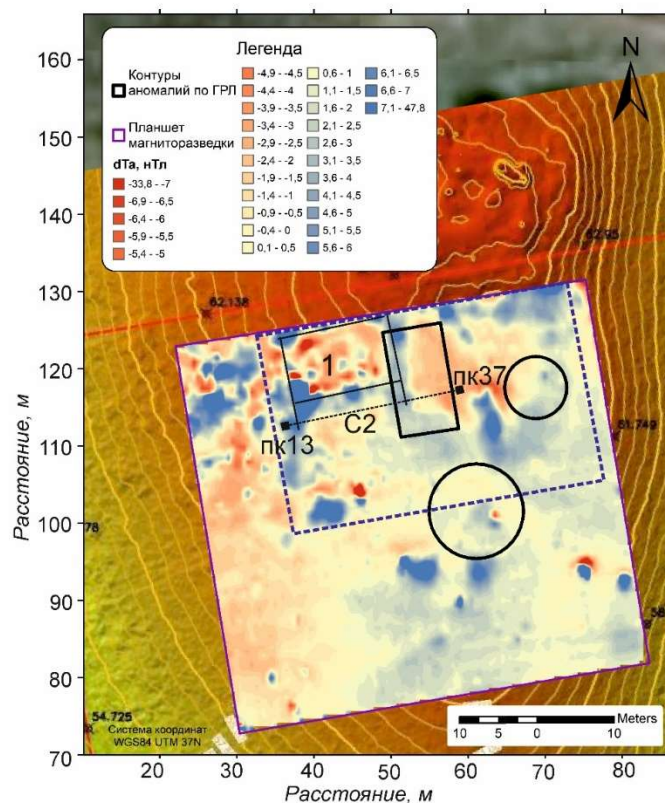


Рисунок 6. Аномальное магнитное поле на участке работ (красным цветом показаны отрицательные аномалии магнитного поля, а синим цветом - положительные).

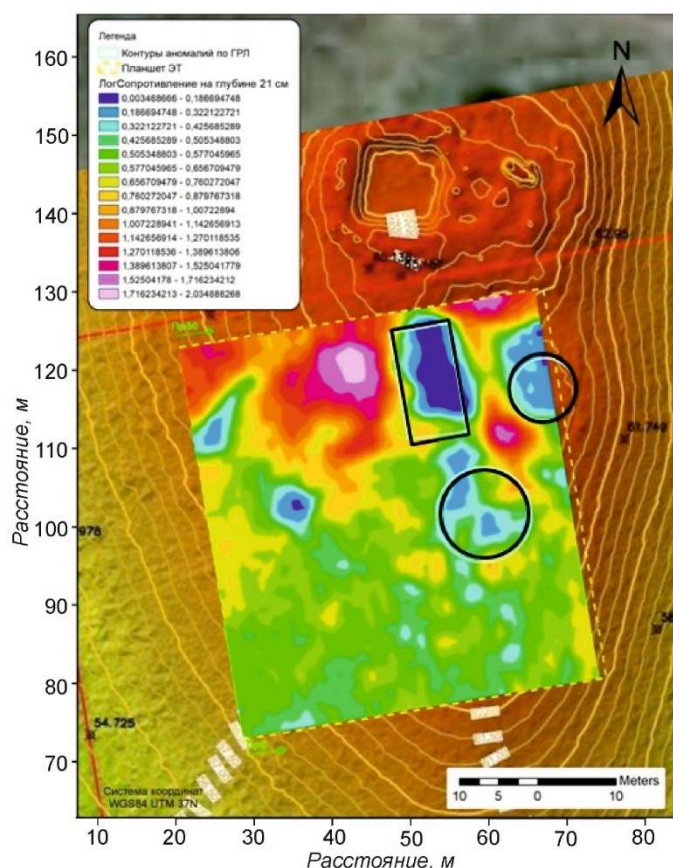


Рисунок 7. Сопоставление среза геоэлектрического разреза на глубине 21 см с результатами предшествующей георадиолокационной съёмки.

В результате обработки и интерпретации данных электротомографии (Loke, 2009) были построены карты срезов на десяти глубинах. Из всех данных были выбраны три наиболее информативные глубины: 46 см (поверхностный слой), 95 см (средний, наиболее вероятный слой заглубления фундаментов) и 159 см как слой максимально возможного заглубления фундаментов основания стен. Все три структурных плана на разных глубинах отличаются друг от друга. Срез на глубине 21 см лучше всего соответствует данным георадиолокации (**Рисунок 7**). Для простоты сравнения с результатами георадиолокации мы поместили аномалии ГРЛ на срезы геоэлектрического разреза, полученного по результатам электротомографии. Особое внимание было обращено на высокоомные аномалии, так как грязевой вулкан выбрасывает из себя в основном проводящие глины. Фоновые значения сопротивлений вмещающих грунтов типичны для геологических построек такого типа и составляют 1.5 – 2 Ом·м. На участке работ выявлены аномалии высокого сопротивления, которые достигают 30 Ом·м, что более чем на порядок превосходит значения фона. Прямоугольник, выделенный по результатам георадиолокационной съемки, хорошо соответствует проводящим аномалиям удельного сопротивления (особенно на глубине 95 см). Круговые аномалии плохо соответствуют данным электротомографии. Срезы геоэлектрического разреза на глубине 46 см указывают на то, что возможный источник аномального поля располагается западнее «георадарного прямоугольника». На глубинах 46 и 95 см размеры объекта действительно не очень большие и меньше, чем требуемый размер фундамента храма. Однако структура аномалий имеет правильную прямоугольную форму. А на глубине 159 см структура аномалий меняется и ширина аномалий становится около 20 м, а длина с юга на север около 30 м. На глубине 213 см прослеживается прямоугольник длиной порядка 25-30 м с юга на север и шириной около 15 м с запада на восток.

Аномалии электрического поля хорошо ложатся на магнитное поле. Магнитное поле над известняками должно быть меньше магнитного поля над глинами (известняки практически немагнитны и не обладают избыточной намагниченностью). Однако в данном случае

линейные объекты типа стен однозначно выделяются положительными аномалиями. Только археологические раскопки могут ответить на этот непростой вопрос. При этом высокие значения аномального магнитного поля отличаются от низких значений поля примерно на 70-80 нТл. Может быть, фундаменты сооружения были сделаны не из известняка, т.к. известняк на Таманском полуострове мог быть только экспортным материалом, или фундамент был выполнен из обожжённого материала, или фундамент обжигался во время его изготовления.

Изометричные аномалии, выделенные по результатам георадиолокации, которые на **Рисунке 6** показаны в виде двух черных кругов, практически никак не отражаются в магнитном поле. Прямоугольная аномалия определенным образом соответствует магнитной аномалии. Можно отметить еще несколько аномалий, которые с некоторой долей вероятности складываются в определенную прямоугольную конструкцию, которая по направлениям соответствуют направлениям осей аномалий георадиолокации. Результаты магниторазведки являются наиболее обнадеживающими. Комплекс линейных взаимоперпендикулярных аномалий, напоминающих сложную прямоугольную структуру, является наиболее перспективным для раскопок. Общий размер участка, который необходимо проверить раскопками, выделен на рис.6 темно-синим пунктиром и составляет 25 x40 м.

Выводы

Выполненные геофизические исследования указывают на наличие аномальных зон в северной части участка работ.

1. На наш взгляд раскоп, который был выполнен несколько лет назад расположен севернее относительно искомых объектов примерно на 15 метров.

2. Южная часть участка свободна от аномалий и наш взгляд не представляет интереса для проведения археологических раскопок.

3. Структура геофизических полей в северной части участка является достаточно сложной. Но основные аномалии магниторазведки и электроразведки удовлетворительно сопоставляются друг с другом. Результаты сейсмических работ по профилю 2 показали также удовлетворительное сходство с потенциальными полями.

Благодарности

Авторы выражают благодарность археологу Института Археологии РАН Г.А. Ломтадзе за оказанную инициативу, информационную поддержку и разрешение проведения работ на памятнике, а также фирме ООО «НПЦ Геоскан» за предоставленные геофизические приборы и оборудование, заместителю директора «НПЦ Геоскан» С.А. Акуленко за техническую помощь в организации экспедиции.

Библиография

- Бобачев, А. А., Горбунов, А.А., Модин, И.Н., Шевнин, В.А. (2006) Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. *Приборы и системы разведочной геофизики*. N02, 14-17.
- Ермаков, А.П., Владов, М.Л., Шмурак, Д.В. (2016) Опыт применения сейсморазведки для оценки карстовой опасности. *Инженерные изыскания*. №5-6. С. 52-59.
- Пийп, В.Б. (1991) Локальная реконструкция сейсмического разреза по данным преломленных волн на основе однородных функций. *Физика Земли*. №10
- Поляков, Е.Н. (2004) Об ориентации культовых построек древнего мира // Архитектура и градостроительство, *Вестник ТГАСУ*, №1, с.10-29.
- Loke, M.H. (2009) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, 144 p.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В КРИОЛИТОЗОНЕ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТА.

1-ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН, 2- ФИЦКИА УрО РАН

В России до 65 % территории располагаются в криолитозоне. Наиболее широко она распространена в Восточной Сибири и Забайкалье. Это сложные грунтовые условия земляного полотна железной дороги для осуществления грузоперевозок. Например, уже почти 25 % земляного полотна Дальневосточной железной дороги признано с дефектами. С увеличением объемов грузопотоков и скорости поездов требуется дополнительное обеспечение безопасности, в том числе необходим непрерывный мониторинг состояния грунтов. Существующие технологии обследования грунтов не всегда в состоянии решить данную задачу по ряду причин – недостаточная чувствительность аппаратных средств наблюдений и способов обработки данных.

Анализ работ, посвященных проблемам динамической неустойчивости грунтов, в том числе при транспортной нагрузке, показал, что диагностика на транспорте нацелена преимущественно на выявления деформаций, вызывающих полные отказы земляного полотна. «Слабые» вариации деформационных параметров среды практически не исследуются; при проведении обследований основное внимание приковано к верхней части разреза пути до 5 м; свойства грунтов в волновом поле изучалось преимущественно при высокочастотных вибромеханических воздействиях, но пока недостаточно данных о поведении грунтов при низкочастотных (ниже 0,5 Гц) нагрузках.

Мы используем новый подход для решения существующих проблем – использование современной цифровой сейсмологической аппаратуры с расширенным частотным диапазоном в сторону низких частот. В качестве источника зондирующих грунт сигналов – движущийся транспорт, при обработке записей – фильтрацию, измерение амплитуд виброскорости и статистики для ансамбля поездов для получения устойчивых оценок. А также разработку и верификацию численных и аналитических моделей взаимодействия в системе железнодорожный экипаж–геологическая среда для основных негативных природно-техногенных процессов, характерных для территорий Крайнего Севера и Сибири.

Нами рассматривается отклик среды на низкочастотные воздействия от поезда, определяемый упругими свойствами основания пути. Использование широкополосной сейсмической аппаратуры дало возможность наблюдать, как динамические нагрузки от подвижных составов влияют на земляное полотно в полосе частот ниже 0.1 Гц. Анализ записей показал, что отклик среды (грунта земляного полотна) присутствует и наблюдаются не только по вертикали (Z компонента), но и в поперечном (Y-компонента) и продольном (X-компонента) направлениях относительно насыпи.

Эксперимент проводился на участке Северной Железной Дороге весной в период оттаивания. Широкополосный трехкомпонентный сейсмометр (велосиметр) Trillium Compact 120s был установлен в 5 м от пути, непрерывная запись велась более 50 дней с апреля по июнь 2019 года в период сезонного оттаивания грунтов. Были зарегистрированы колебания от 1600 поездов, что позволило получить статистически значимые оценки

Для описания особенностей записи вертикальной компоненты предлагается модель Буссинеска. Это задача деформирования насыпи для однородного полупространства с поездом в виде движущейся силы, создающей смещения в заданной точке грунта. Исходя из характерных размеров, скорости нарастания нагрузки и скорости распространения упругих волн, хорошим приближением можно считать процесс, проходящий через множество равновесных состояний. Данный подход для деформирования грунтов движущимся поездом был предложен д.ф.-м.н. И.П. Добровольским.

На рисунке 1 приведены теоретические и экспериментальные записи вертикальной компоненты виброскорости, которые были получены на расстоянии 5 м от пути. При обработке

реальных записей использовался полосовой фильтр 0.01-0.1 Гц для исключения высокочастотной составляющей. При теоретическом расчете виброскоростей принимался средний вес поезда и табличный модуль деформации сдвига, не учитывалась интерференция колебаний затухание колебаний при прохождении вагонов. Абсолютные величин расчетных и реальных значений амплитуд виброскорости для первого максимума волновой формы достаточно хорошо количественно совпадают. Таким образом, данная модель хорошо описывает особенности волновых форм записей от поездов для вертикальной компоненты (Z). Так как амплитуда обратно пропорциональна модулю сдвига [1] и для реальных сейсмограмм достаточно просто измеряется, этот параметр (амплитуда вертикальной компоненты A_z) был принят нами для мониторинга состояния грунта земельного полотна.

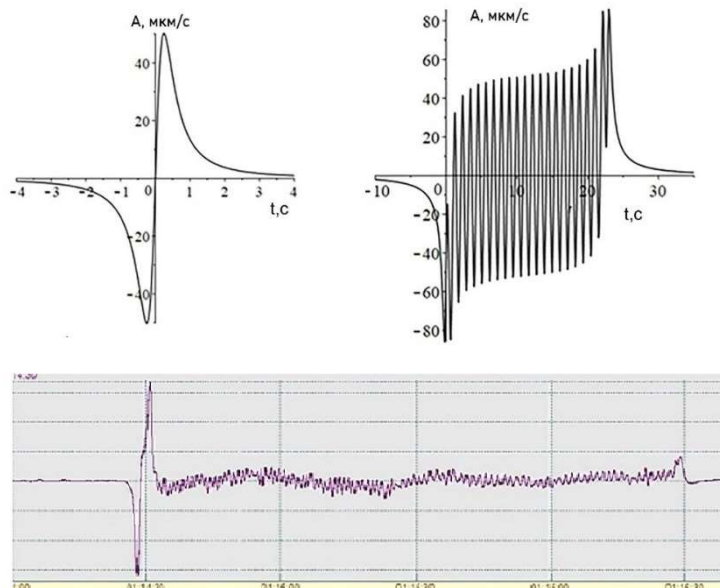


Рисунок 1 – Записи в 5 м от пути виброскорости на компоненте Z при прохождении поезда - теоретический расчет: а – для единичной тележки, б – для двух тележек, в – экспериментальная запись при фильтрации 0.01-0.1 Гц.

Анализ записей для горизонтальных компонент показал, что для всех типов поездов после их прохождения на НЧ-волновых формах всегда наблюдаются максимум амплитуд колебаний на компоненте Y (A_Y) и минимум на компоненте X (A_X) (рисунки 2).

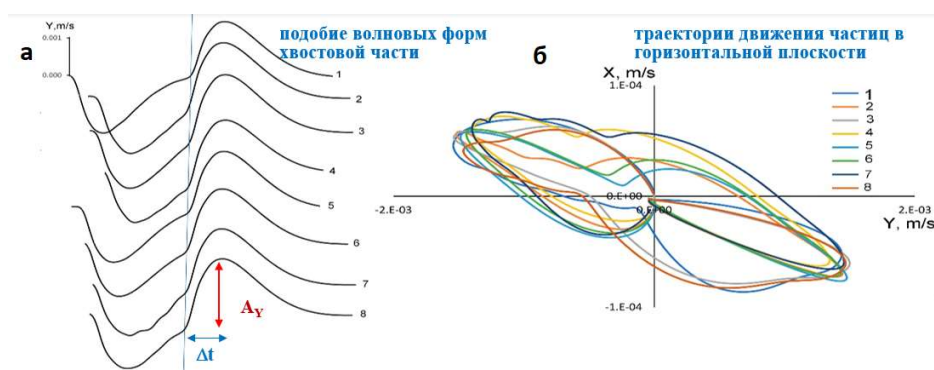


Рисунок 2 – Параметры НЧ колебаний при прохождении поезда: а – волновые формы хвостовой части совмещение по концу прохождения, Y-компонента, б - траектории движения в горизонтальной плоскости

Часть записи после прохождения поезда («хвост») достаточно проста по форме и подобна для разных ж/д составов (рисунок 2). По существу, это есть процесс возвращения среды в исходное состояние после снятия воздействия. Для анализа были приняты следующие параметры, описывающие хвостовую часть: максимальная (A_Y) и минимальная (A_X) амплитуды после прохождения поезда, Δt – время от пересечения нулевой линии до максимума A_Y . Гистограммы

значений для параметра Δt основная часть данных лежит в интервале 20–27 с (рисунок 3). Просмотр волновых форм показал, что параметр A_y , по-видимому, связан с характеристиками состава (длиной, нагрузкой на ось). Распределение амплитуд A_y показывает три максимума 0.00005, 0.0004 и 0.0014 м/с, последний – наиболее интенсивный. Зависимость амплитуд от веса поезда выявляет диаграмма разброса значений A_y и A_x для всего набора данных и для трех подборок, включающих значения для максимумов и точек в пределах стандартных отклонений (рисунок 3). Соотношения амплитуд для точек первого (легкие поезда) и третьего (тяжелые поезда) максимума подобны, т. е. вес поезда, как и ожидалось, определяет амплитуду колебаний. Для исключения влияния веса поезда была выполнена своеобразная «нормировка» полученных значений. Была принята оценка R , исходя из отношений амплитуд на горизонтальных компонентах:

$$R = |A_y/A_x|.$$

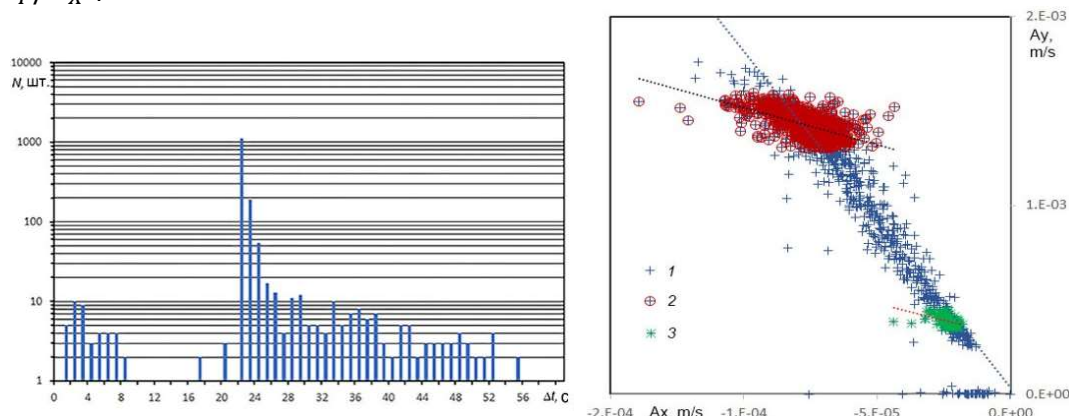


Рисунок 3 – Гистограммы значений параметра Δt (а); диаграмма разброса амплитуд горизонтальных компонент с линией тренда для каждого набора данных: 1 – весь набор данных; для максимумов: 2 - $A_y = 0.4 \cdot 10^{-3}$ м/с, 3 - $A_y = 1.4 \cdot 10^{-3}$ м/с (б).

Для описания наблюдаемых эффектов вдоль и поперек пути, а именно смещение грунта после прохождения поезда в горизонтальном направлении на обводненных участках предлагается модель Эльзассера. Она рассматривает упругий слой на вязком полупространстве и описывает пространственно-временное распределение напряжения в среде, включающей насыпь и подстилающий грунт после воздействия нагрузки, в нашем случае - поезда. Напряжения распространяются вдоль контакта насыпь-грунт в горизонтальном направлении от ж/д пути по диффузионным законам. Схема приведена на рисунке 4.

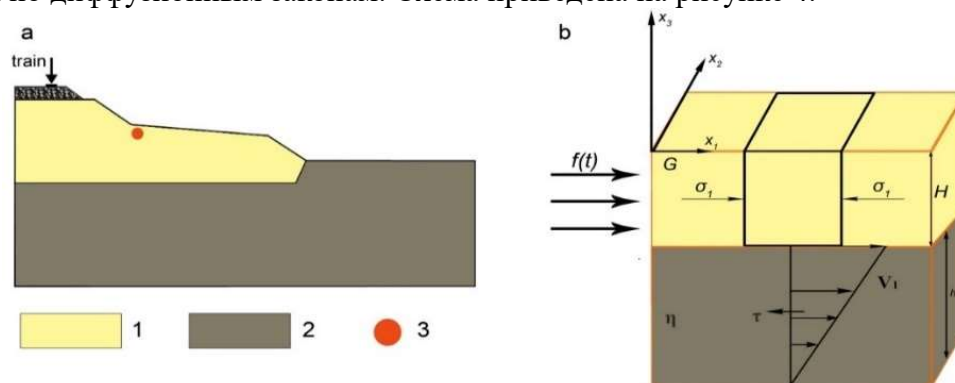


Рисунок 4 - Модель передачи возмущений, создаваемых поездом в земляном полотне в горизонтальном направлении: а - схематический разрез, б - геометрия системы земляное полотно и возмущение НДС, 1 - земляное полотно, 2 - грунт (валунный суглинок), 3 - сейсмический датчик

Решение задачи для существенно более масштабного объекта – движения литосферы по астеносфере было предложено в работах Мухаметдиева, Грачева и Юнги, мы приспособили

это решения для земляного полотна и его основания.

Результаты расчетов амплитуд возмущений дал набор профилей амплитуд деформирования на разных расстояниях от пути в зависимости от времени после прохождения поезда (Рис. 3). На расстоянии 5 м в нашем эксперименте мы практически попадаем на максимум воздействия при $\Delta t \sim 20$ с.

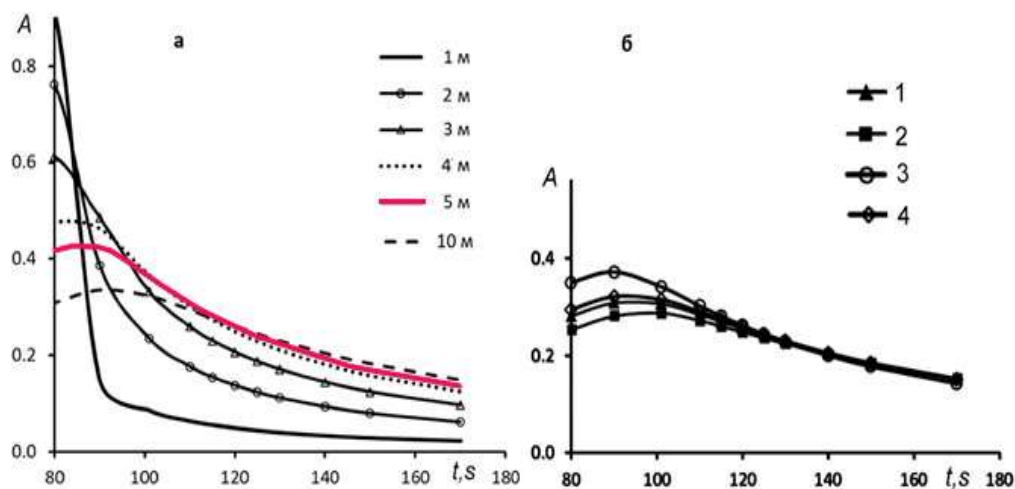


Рисунок 3 – Набор профилей амплитуд в зависимости от времени после прохождения поезда (после 80 с), регистрируемых: а) - на разных расстояниях от пути; б) – в зависимости от упруго-вязких параметров: 1- $\mu = 2 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 2 \cdot 10^9$ Па*с, 2 - $\mu = 1.8 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 2 \cdot 10^9$ Па*с, 3 - $\mu = 2 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 1.5 \cdot 10^9$ Па*с, 4 - $\mu = 2 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 1.8 \cdot 10^9$ Па*с

Значение амплитуд и положение максимума кривых зависят от модуля сдвига верхнего слоя и вязкости нижнего. Моделирование показывает, что мы можем наблюдать вариации упругих параметров 10 % и даже меньше. Важно отметить, что изменения параметров в 10% - величина недоступные «прямым» измерениям в условиях естественного залегания.

В результате автоматизированной обработки записей колебаний от проходящих поездов были выявлены параметры R , Δt (интервал $20 \text{ с} < \Delta t < 27 \text{ с}$), A_z при фильтрации ниже 0.1 Гц, а также параметр N_y для высокочастотной части сигналов [2], которые могут стать основными параметрами для сейсмического мониторинга состояния грунтов железнодорожного пути. В работе [3] представлен временной ход оценок R , Δt , A_z , N_y в сравнении с кривой среднесуточной температуры с апреля по июнь 2019 г., показывающий, что все найденные нами параметры чувствительны к изменениям температуры.

Таким образом, путем теоретических расчетов и натурного моделирования получено доказательство эффективности использования для мониторинга состояния грунтов земляного полотна ж/д пути в процессе эксплуатации следующих параметров: амплитуды первых вступлений на записи виброскорости A_z , отношений амплитуд на горизонтальных компонентах R , времени от пересечения нулевой линии до максимума $A_y - \Delta t$.

Список литературы

1. Антоновская Г.Н., Добровольский И.П., Капустян Н.К., Орлова И.П. Определение in situ упругих свойств нижнего строения железнодорожного пути при сейсмометрических наблюдениях // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 1. С. 44-55.
2. И.П. Орлова, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина Возможности сейсмического оборудования для мониторинга основания железнодорожных путей в районах со сложными грунтовыми условиями. // Вестник геонаук. 2020. № 4 (304). С. 33–39. DOI: 10.19110/geov.2020.4.5
3. N. K. Kapustian, G. N. Antonovskay, I.P. Orlova Soil State Testing Using Heavy Vehicle Vibrations // Energies 2022, 15(3), 830; <https://doi.org/10.3390/en15030830>

ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ НА ОПОРНОМ РАЗРЕЗЕ СИНИХ ГЛИН

ООО «НПЦ Геоскан», 2-МГУ имени М.В. Ломоносова

Введение

Полевые инженерно-геофизические электроразведочные исследования в карьере синих глин в с. Никольском Тосненского района Ленинградской области выполнены 14-15 марта 2020 года. Были выполнены работы методом электротомографии на юго-восточном борту карьера (рис. 1)

Целью работ послужила необходимость уточнения геологического разреза на территории карьера, а также получение опорных геоэлектрических свойств пород, слагающих разрабатываемую толщу глин и вскрышных пород. Поскольку здесь наблюдается аномально высокое положение кровли «синих» глин [5] вскрытых карьером, представляется очень удобным изучение их геоэлектрических свойств.



Рисунок 1. Вид на юго-восточный борт карьера синих глин в г.Никольское

Характеристика участка исследований. В административном отношении исследуемый участок находится в непосредственной близости г. Никольское Тосненского района Ленинградской области (рис.2).

В геоморфологическом плане участок работ находится южной части Приневской низменности в 1км от Балтийско-Ладожского Глинта, на правом берегу р.Тосна и приурочен к флювиогляциальной равнине. Участок свободен от техногенных пород, грунт преимущественно обнажен, растительность представлена только в самой южной части участка. На бермах карьера есть грунтовые дороги. Рельеф участка изменяется от -16м (нижний отметка карьера) до 21м (нетронутая хозяйственной деятельностью примыкающая к карьеру территория).

Приневская низина представляют собой, в основном, заболоченную, плоско-волнистую террасированную равнину, относительные превышения которой обычно не более 5 м. На этом фоне в низинах встречаются участки холмистого и грядового рельефа, на 10-20 м, возвышающиеся над окружающей местностью [4].

Осадочный чехол в районе исследований начал формироваться примерно 600 млн. лет назад в конце вендского периода. Примерно 500 млн. лет назад в раннем кембрии на огромных территориях этой местности сформировалась мощная толща синих глин, вследствие максимальной трансгрессии моря. В палеозое вся эта территория была покрыта морем.

Осадочные отложения того времени преимущественно глины, известняки и песчаники покрывают толщей свыше 200 метров кристаллический фундамент, состоящий из гранитов, гнейсов и диабазов. Согласно государственной геологической карте (ГГК-200, Лист О-36-I), раннекембрийские отложения (E_{2sn}) перекрываются отложениями четвертичного периода. Мощность толщи синих глин изменяется в окрестностях карьера от 40 до 100 м. Глина окрашена в голубовато-серый или зеленовато-серый цвета, тонкогоризонтальнослоистая. В толще синих глин присутствуют алевроитовые прослои. Характерным для синих глин является присутствие рассеянных кристаллов и друз пирита и марказита.

Основной особенностью осадочного чехла является пологое моноклиналиное залегание слагающих ее образований, со слабым падением их к югу и юго-востоку, а также развитие структурно-денудационных форм дочетвертичного рельефа. (рис.3а)) [4].

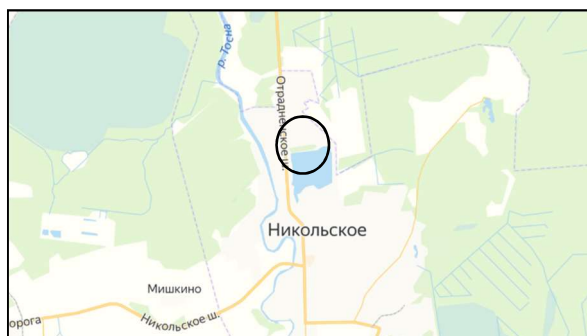


Рисунок 2. Общая схема района работ. Кругом показано положение исследуемого участка

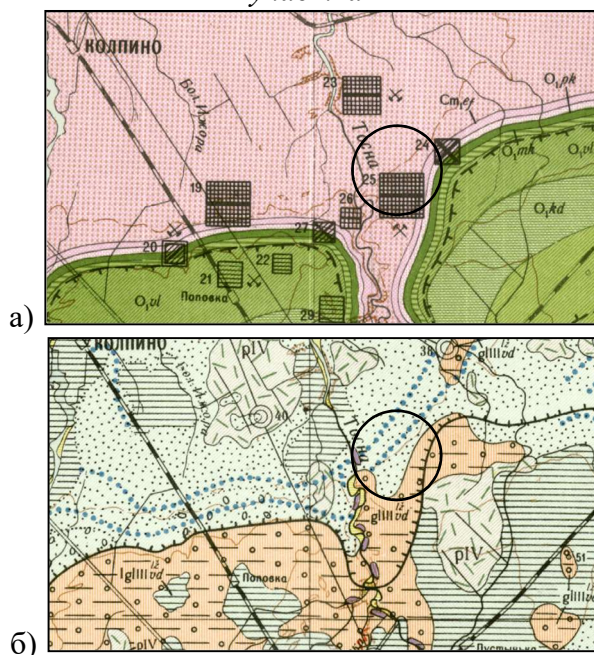


Рисунок 3. Фрагмент ГГК-200, Лист О-36-I. а) Геологическая карта дочетвертичных образований, б) Геологическая карта четвертичных образований. Кругом показано положение исследуемого участка. Балтийско-Ладозжский Глинт показан линией с береж-штрихами

Современный рельеф образовался в результате деятельности ледникового покрова (последнее Валдайское оледенение было 12 тысяч лет назад). После отступления ледникового покрова, во впадинах между отступающим ледником и поднятиями рельефа скапливались талые воды, образовавшие Балтийское ледниковое озеро. Затем образовалось Литориновое море, уровень которого был на 7—9 м выше современного. 4 тысячи лет назад море отступило и образовалась долина реки Невы. Последние 2,5 тысячи лет рельеф почти не менялся.

Согласно ГГК-200, Лист О-36-I, суммарная мощность четвертичных отложений в

окрестностях карьера составляет от 0 до 10 м. Встречаются 1) ледниковые отложения лужской стадии валдайского оледенения (glIII^{lzd}) состоящие из валунных суглинков и глин, и 2) нерасчлененные отложения балтийского ледникового озера (lgIII^{bvd}), представленные песками, суглинками и глинами (рис.36)).

На междуречье р. Мги и р. Тосны располагался один из наиболее активных языков ледника, выпавшего широкую ледниковую ложбину [5]. Здесь проявляются явления гляциотектоники, гляциодислокаций и гляциозостазии, которые в районе Глинта встречаются повсеместно [5, 3, 7]. Гляциотектонические движения возникают в следствие воздействия на нижележащие породы, в случае рассматриваемого участка, кембрийские глины, ледниковых масс и проявляются в виде их вертикальных перемещений. Так, в районе г.Никольское в слоях песка и песчаника встречены ксенолиты кембрийских глин [5]. Гляциодислокации вдоль подножия Глинта выражены в виде гляциочешуи и отторженцев, надвинутых с севера [7]. Гляциоизостазия проявляется или в виде упругих деформаций, или в виде уплотнения горных пород в следствие их горизонтальных движений [8].

Для Северо-Западного региона аномально высокое положение кровли кембрийских глин характерно для зоны Глинта [3].

Климат в районе работ умеренный и влажный, переходный от морского к континентальному. Для района характерна частая смена воздушных масс, обусловленная в значительной степени циклонической деятельностью. Летом преобладают западные и северо-западные ветры, зимой — западные и юго-западные. Среднегодовое количество осадков составляет 633 мм.

Цели и задачи инженерно-геофизических исследований. Целью исследований послужила необходимость получения новой достоверной информации о верхней части геологического разреза для получения опорных геоэлектрических свойств разрабатываемой толщи синих глин. Опорные свойства верхней части толщи кембрийских глин могут быть распространены на большую территорию их залегания. Задачами работ методом электротомографии являлись: уточнение физических свойств и геологического строения верхней части разреза участка работ.

Методика полевых работ методом электротомографии. В ходе электротомографических работ были выполнены профильные наблюдения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) в модификации электрической томографии (ЭТ). Электротомография является одним из ведущих методов малоуглубинной электроразведки постоянным током при геофизических исследованиях верхней части геологического разреза [2]. Всего выполнены исследования по 5 профилям общей протяженностью 1295 погонных метров с шагом по профилю 5 м (рис. 4)

Наблюдения методом электротомографии выполнены с помощью электроразведочной станции «Омега-48» производства компании ООО «Логис» (г.Раменское, МО) При измерениях использовались два 24-х электродных сегмента косы с шагом между электродами 5 метров. Общая длина одной расстановки при шаге между электродами 5 м составляет 235 метров. Всего измерения выполнены на 6 расстановках (две расстановки на профиле 1 и по одной на других четырех профилях). Перекрытие общего объема измерений в сводном профиле 1, состоящем из двух расстановок, составляет 30% (115 п.м.). Топографическая привязка пунктов наблюдений выполнялась с помощью GPS-приемника GPS Garmin GPSMap62s. Наблюдения выполнены симметричной инверсной установкой Шлюмберже **mABn** (рис.5).

Измерения выполнены с напряжением электроразведочного генератора 100 В. Сила тока в питающей линии достигала значений от 8 мА до 1000 мА. Форма тока генератора — разнополярные прямоугольные импульсы с паузами, длительность импульсов и пауз между ними 200 мс, общая длительность одного цикла 800 мс, что соответствует рабочей частоте 1.25 Гц. При этом длительность всего сигнала включения тока в конкретный электроды АВ и измерения сигнала на соответствующих протоколу приемных электродах mn составляет 2400 мс. Регистрация сигналов в приемных линиях выполнялась с 3 накоплениями: 3 интервала с включённым током положительной полярности, 3 интервала с током обратной

полярности и 6 интервалов с выключенным током для определения разности напряжения без тока в питающей линии АВ. Диапазон регистрируемых на приемных электродах напряжений составлял 11-9700 мВ.

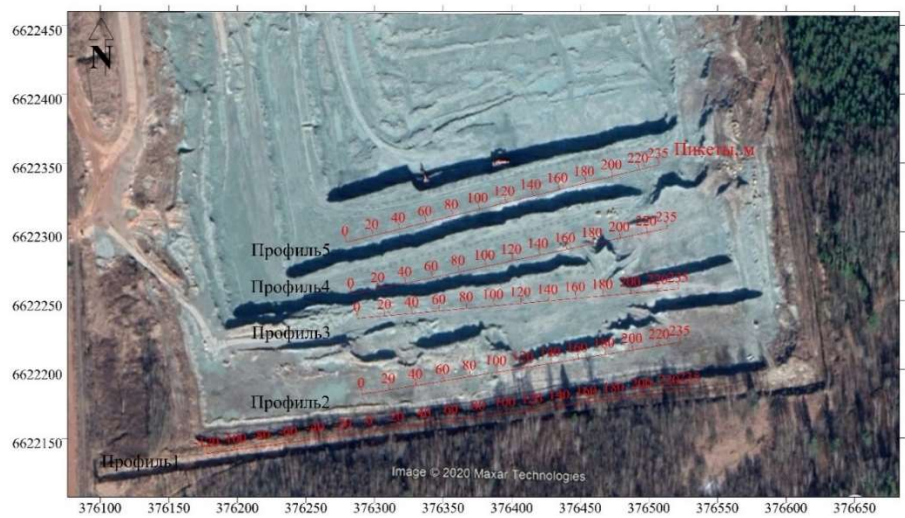


Рисунок 4. Карта фактического материала работ методом электротомографии. Система координат WGS-84, UTM



Рисунок 5. Протокол работы станции Омега-48, реализующий симметричную инверсную установку Шлюмберже. Красными точками показаны виртуальные точки записи для соответствующей установки. Синими треугольниками показаны электроды. Фиолетовая точка - точки записи для показанных положений приемных (m) и питающих (A, B) электродов

Геометрические параметры использованной электроразведочной установки показаны в таблице 2.

На каждой расстановке электродов проводились измерения переходных сопротивлений на каждом забитом в грунт электроде. В основном переходные сопротивления не превышали 3 кОм.

Таблица 1 - Геометрические параметры используемой установки mABn

Установка	Разносы, м		Размер АВ, м	Ворота	
	от	до		Разнос, м	Точек
mABn	7.5	111.5	5, 15	57.5	1

Контрольные наблюдения выполнялись на перекрытиях расстановок (профиль 1). Объем контрольных наблюдений составил 5% общего объема точек наблюдений. Средняя относительная погрешность измерений составила 1.2% (по кажущимся удельным электрическим сопротивлениям).

Благодаря выбранной методике, а также благоприятным геологическим условиям на исследуемом участке, удалось изучить геологический разрез до относительной глубины 45м в пределах электротомографических профилей.

Результаты инженерно-геофизических исследований. На рис. 6 показано трехмерное представление геоэлектрических разрезов, которое позволяет сделать вывод о горизонтально-слоистом строении исследуемого участка, а также о незначительном различии свойств основания геоэлектрических разрезов.

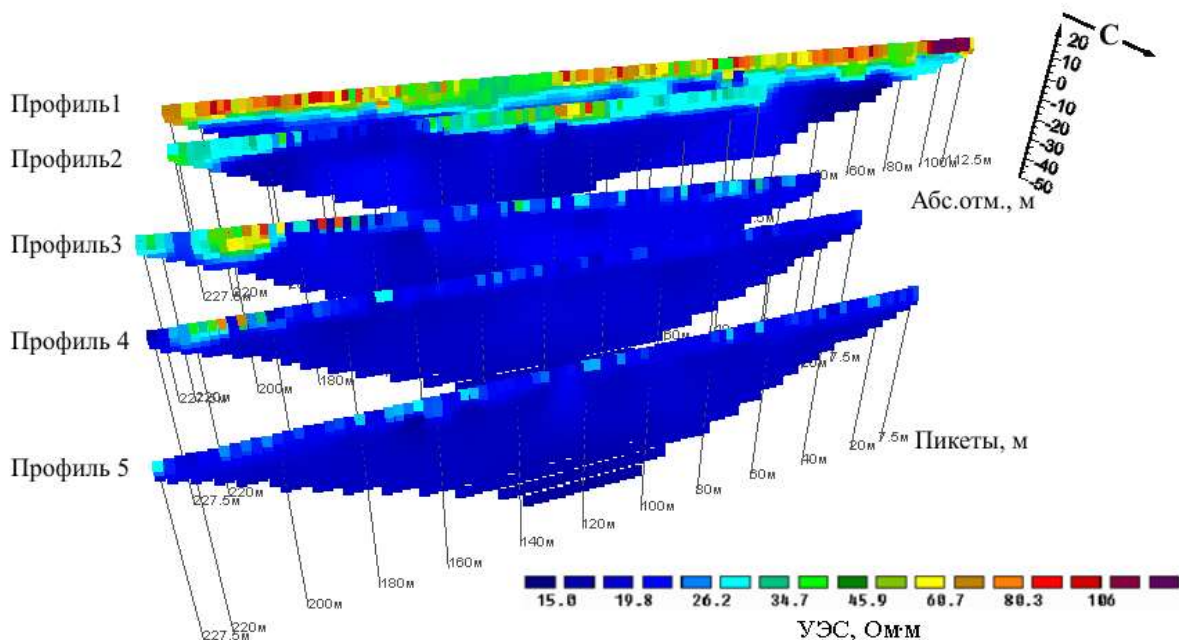


Рисунок 6. Трехмерное представление геоэлектрических разрезов. Балтийская система высот

На гистограмме, построенной по результатам всех полученных в результате инверсии значений УЭС (по пяти профилям) (рис.7), видно, что большинство данных из выборки (всего 5792 значения) попадают в диапазон от 15 до 28 Ом·м, такие значения характерны для глин, глин с прослоями песков и суглинков. Кроме того, на распределении отчетливо выделяются два пика со значениями сопротивлений 19 и 23 Ом·м, что может говорить о наличии двух типов глинистых пород на исследуемом участке. Суммарный вклад пород сопротивлениями >25 Ом·м составляет около 20%, а пород с сопротивлениями >50 Ом·м около 10%, что также видно и на рис.9.

На рис.8 показаны горизонтальные слайсы УЭС на различных гипсометрических уровнях. Суммарная мощность отложений нижнекембрийского возраста меняется от 40 м (на Юге) до 100 м (на Севере), согласно опорному геологическому разрезу, проходящему в 4 км юго-западнее участка работ (ГТК-200, Лист О-36-І). Положение кровли кембрийских глин по априорной геологической информации составляет 5-8 м, кроме того, начиная с глубины 8 м ведется их добыча в карьере.

Как видно из рисунка 8, начиная абсолютной отметки 0м диапазон сопротивлений сужается до значений 15-30 Ом·м, однако, удается выделить отдельные области со значениями 15-20 Ом·м 20-30 Ом·м. Области тонкой дифференциации сопротивлений начинают проследиваться уже на глубине 10м. Простирание выделяемых областей восточное. Учитывая, что ледниковые массы наступали с Севера, можно предположить, что области связаны с явлениями гляциодислокаций и гляциоизостазии. Под воздействием крупных масс льда подстилающие ледники кембрийские глины испытывали уплотнение и упругие деформации, которые привели к уплотнению отдельных участков глин и изменению их пористости.

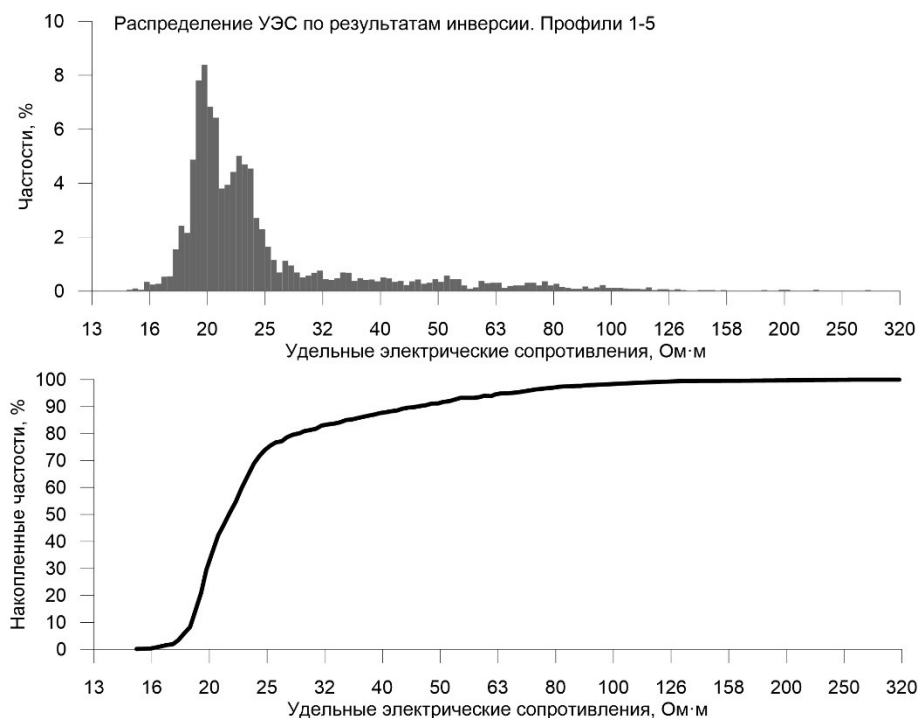


Рисунок 7. Гистограмма УЭС, полученных по результатам инверсии на профилях 1-5

После снятия ледниковой нагрузки различия в пористости выразились в различной степени влагонасыщенности глин, что в итоге привело к их различным удельным электрическим сопротивлениям.

Наибольшие значения УЭС на участке встречены в основном на интервале абсолютных отметок 17-10 м и в северо-восточной части участка (рис.11, окончание профиля 5). Суммарная мощность четвертичных отложений здесь составляет 0-12 м (опорный геологический разрез четвертичный образований (ГГК-200, Лист О-36-1) расположен в 3 км к северо-западу от исследуемого участка).

Самые высокоомные отложения с сопротивлениями 60-120 Ом·м зафиксированы на профилях 1 и 2 на абсолютных отметках до 10м., причем на профиле 1 они слагают практически верхнюю часть разреза. Отложения представлены песками (наблюдения *in situ*, априорные данные)

Высокоомные отложения с сопротивлениями 30-60 Ом·м зафиксированы также на 1 и 2 профилях, на абсолютных отметках до 10м. Отложения валунными суглинками с примесью крупнозернистого песка (наблюдения *in situ*, априорные данные)

Отдельно фиксируются отложения с сопротивлениями 30-60 Ом·м на срезах 10м, 5м и 0м, окончания профилей 3,4. В плане эти отложения имеют северное простирание. Отложения представлены валунно-песчаным материалом с суглинистым заполнителем (наблюдения *in situ*)

Описанная дифференциация сопротивлений подтверждается также и на гистограммах УЭС, построенных на разных гипсометрических уровнях (рис.9).

Учитывая априорные состав и происхождение горных пород, а также характер распространения выявленных геоэлектрических аномалий, можно выделить следующие типы отложений, зафиксированных по результатам анализа площадных данных электротомографии (таблица 3).

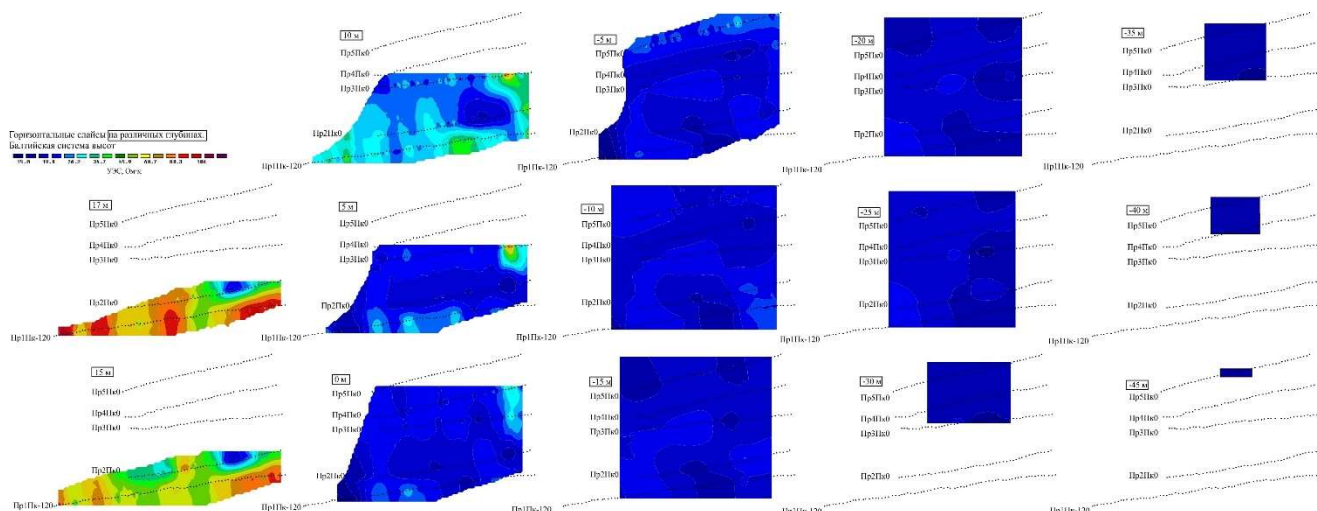


Рисунок 8. Горизонтальные слайсы удельных электрических сопротивлений полученных в результате инверсии данных по профилям 1-5 на различных гипсометрических уровнях (Балтийская система высот). Глубина среза показана в рамке

Таблица 3. Типы отложений выделяемые по площадным данным

УЭС, Ом·м	Абс. отм., м	Состав	Генетический тип	Индекс
60-120	17-10	Пески	Отложения Балтийского ледникового озера (нерасчлененные)	lgIII^bvd
30-60	17-5	Валунные суглинки	Ледниковые отложения лужской стадии Валдайского оледенения	glIII^{lz}vd
30-60	10-0	Валунно-песчаные отложения суглинистым заполнителем	Ледниковые отложения	glQ
20-30	15-(-30)	Глины	Морские	Є_{2sn}
15-20	15-(-45)			

Распределение УЭС на различных глубинах
Балтийская система высот

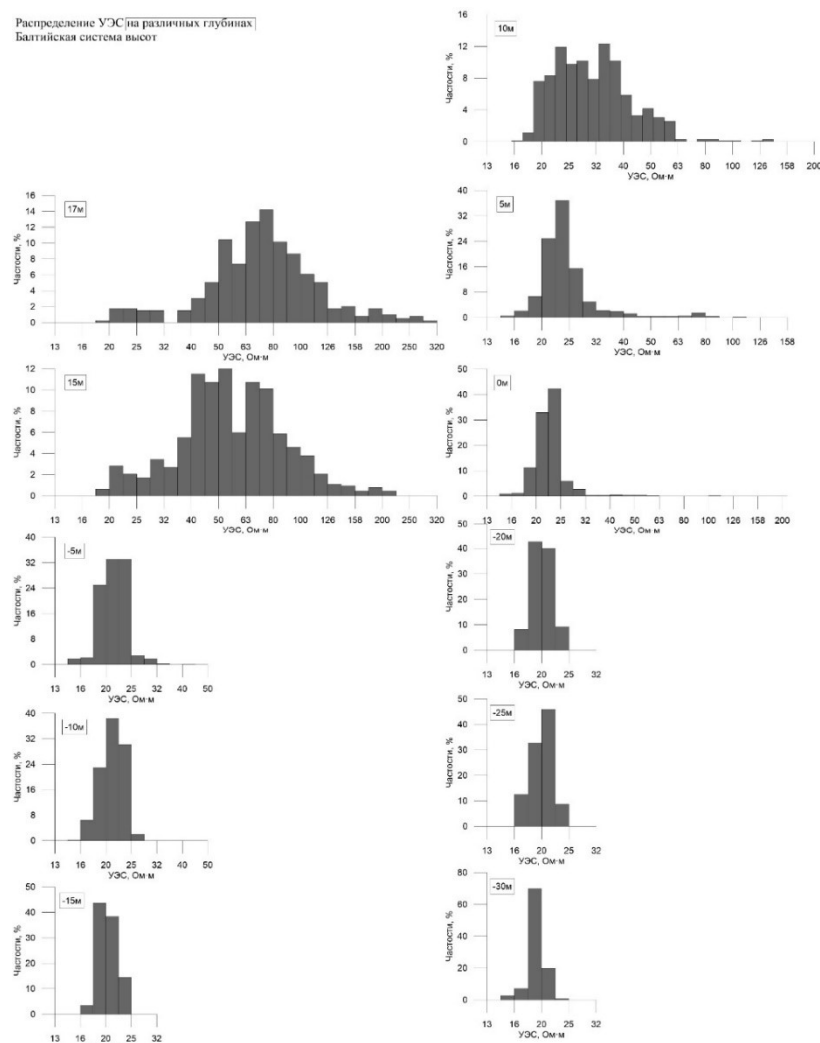


Рисунок 9. Гистограммы УЭС, полученные по результатам инверсии по профилям 1-5 на различных гипсометрических уровнях. Абсолютные отметки показаны в рамках.

Балтийская система высот

На рис.10 показаны геоэлектрический (ГЭР) и геолого-геофизический разрезы (ГГР) по Профилю 1. Точность решения обратной задачи (инверсии) составляет 4.7%.

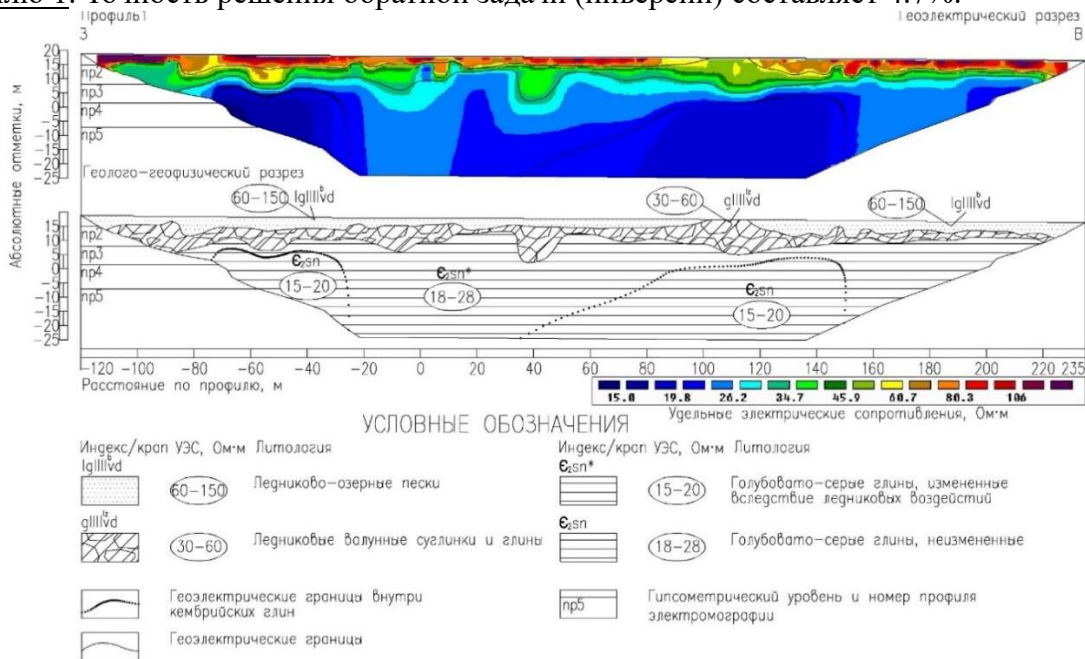


Рисунок 10. Геоэлектрический и геолого-геофизический разрезы по профилю

ГЭР и ГГР по профилю 1 отличаются сложным строением: верхняя горизонтально-слоистая часть (до абс. отм. 5-10 м) с УЭС более 30 Ом·м залегает на низкоомной толще с УЭС 15-30 Ом·м. Основание разреза неоднородно по геоэлектрическим свойствам и имеет, предположительно, блоковое строение.

Первый от поверхности слой с УЭС 60-150 Ом·м распространен в пределах Пк -120-102м и Пк115-235м, подошва слоя располагается в интервале абс. отм. 12-15 м, максимальная мощность фиксируется на Пк -83м и составляет 7 м. Исходя из априорной геологической информации, полевых наблюдений и диапазону УЭС, можно соотнести этот слой с песками Балтийского ледникового озера. По несогласной границе залегает второй слой с сопротивлениями 30-60 Ом·м, фиксируемый на протяжении всего профиля. Слой выходит на поверхность в районе Пк102.5-115.5м. Абс. отм. подошвы колеблется в интервале 2.2-12.5 м, максимальная мощность составляет 12.3 м (Пк11.5м). Исходя из априорной геологической информации, полевых наблюдений и диапазону УЭС, можно соотнести этот слой с валунными суглинками Лужской стадии Валдайского оледенения. По несогласной границе ниже залегает толща с сопротивлениями 15-30 Ом·м. Толща имеет блоковое строение, здесь в относительно высокоомном (УЭС 18-28 Ом·м) комплексе расположены два низкоомных (УЭС 15-20 Ом·м) блока с горизонтальными размерами 48 м (Пк -68- -20м) и 115 м (Пк35-150м). Границы низкоомных блоков показаны на ГЭР и ГГР пунктирной линией. Исходя из априорной геологической информации, натурных наблюдений и диапазону УЭС, можно соотнести этот слой с горизонтом синих глин нижнекембрийского возраста. Невыдержанность УЭС в горизонтально и вертикальном направлениях может быть объяснена с позиции гляциоизостатических явлений.

Происхождение двух типов синих кембрийских глин, выделяемые на геоэлектрических разрезах, судя по их распространению, конфигурации, аномально высокому положению кровли и электрическим свойствам (с одной стороны блоки глин, которые имеют повышенные удельные сопротивления, а с другой стороны повышенные проводимости) может быть связано с явлением гляциоизостазии

Слой кембрийских глин испытал воздействие процессов, связанных сначала с прогибанием территории под тяжестью нагружения ледника и, соответственно, неравномерным опусканием всего горного массива и изостатической релаксацией земной коры в последствии. Учитывая, что ледниковая нагрузка в разные периоды оледенения могла быть неравномерной, можно предположить, что глины, хорошо проводящие электрический ток, являются относительно сохранными, тогда как более высокие значения удельных сопротивлений в глинах глины – следствие их передвижения и перемешивания.

Выводы

В результате выполненных инженерно-геофизических исследований методом электротомографии можно сделать следующие выводы.

По геоэлектрическим свойствам в пределах исследованного участка выделяются два комплекса грунтов:

- 1) Разновозрастные ледниковые отложения, включающие в себя:
 - отложения Балтийского ледникового озера, представленные песками с удельными электрическими сопротивлениями от 60 до 150 Ом·м.
 - отложения Лужской стадии Валдайского оледенения, представленные валунными суглинками с удельными электрическими сопротивлениями от 30 до 60 Ом·м
 - предположительно ледниковые отложения представленные валунами и песком с суглинистым заполнителем и удельными электрическими сопротивлениями от 30 до 60 Ом·м
 - 2) Морские нижнекембрийские отложения, горизонт синих глин, включающий:
 - глины с удельными электрическими сопротивлениями 18-28 Ом·м
 - глины с удельными электрическими сопротивлениями 15-20 Ом·м
- Различия свойств внутри отложений одного генетического типа связаны с воздействием ледниковых масс (гляциоизостазия).

Учитывая условия проведения полевых работ, высокую детальность работ, а также

высокие точности измерений и решения обратной задачи, полученные свойства можно считать опорными.

Библиография

1. Инструкция по электроразведке: Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. - Л.: Недра, 1984. – 352 стр.
2. Электроразведка. Том 1. Под редакцией проф. И.Н.Модина и доц. А.Г.Яковлева – 2-ое издание, перер. и доп. –Тверь: «Полипресс», 2018.- 276 с.
3. Бискэ Ю.С., Никонов А.А. Состав и происхождение эрратического материала в отложениях верхнего плейстоцена Приневской низменности. Вестник СПбГУ, сер.7, 2007, Вып.2
4. Дашко Р.Э. Инженерно-геологический анализ и оценка условий Строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах предглинтовой низменности (санкт-петербургский регион): диссертация на соискание ученой степени кандидата геол.-мин. наук, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, 2015
5. Малаховский Д.Б., Мусатов Е.Ю. Геологические и геоморфологические наблюдения в нижнем течении р.Тосны, левого притока Невы. Вестник СПбГУ, 2004, вып.4
6. Малаховский Д.Б. Геолого-геоморфологические аномалии на Северо-Западе России. Геология Северо-Запада: вчера и сегодня //под ред. Проскурякова В.В. и Шурыгина В.Н., Москва, 2000
7. Краснов И.И., Арсланов Х.А., Казарцева Т.И., Тертычная Т.В., Чернов С.Б., Плешивцева Э.С. Опорный разрез верхнеплейстоценовых отложений в Приневской низменности в карьере Келколово. Региональная геология и металлогения. 1995, №4, с.88-99.
8. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. Москва, «Недра», 1988
9. Loke, M.N. and Barker, R.D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity

В.В. Романов¹ А.А. Иванов², М.П. Широбоков³

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИКАЦИИ МПВ–ОГП ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

*1- РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина»,
РГГРУ-МГРИ, ООО «НПЦ Геотех»*

Введение

Способ ОГП МПВ (способ или модификация общей глубинной площадки) был создан в Западно-Сибирском научно-исследовательском институте геологии и геофизики В.К. Монастырёвым, Ю.В. Ознобихиным, Г.М. Голошубиным и В.М. Вингаловым; первоначально применялся в нефтегазовой геологии. Способ МПВ ОГП основан на реализации идей и подходов МОВ–ОСТ в отношении сейсмограмм, содержащих группы колебаний преломлённых волн в первых или последующих вступлениях[1]. Автоматизация обработки в МПВ–ОГП определяет большую скорость получения результата в виде глубинного динамического разреза, чем слоистых и непрерывных моделей при классических и томографических подходах, основанных на получении и обработке поля годографов. При вводе кинематических поправок в сейсмограммы МПВ (редуцировании) импульсы не растягиваются и динамические параметры преломлений при обработке искажаются минимальным образом[2]. Характерные для ВЧР шероховатые границы редко формируют интенсивные отражения, тогда как преломлённые волны от тех же границ отличаются большей амплитудой[3].

Основное различие МОВ–ОСТ и МПВ–ОГП в формуле расчёта кинематических поправок, так как годограф преломлённой волны на сейсмограмме ОСТ имеет форму прямой, а не гиперболы. В

формуле (1) приведено уравнение годографа преломлённой волны в случае двухслойной среды. Для трёх и более слоёв оно также может быть использовано, но уже как приближённое (1).

$$t = t'_0 + \frac{d}{V_{\text{ост}}} \quad (1)$$

, где t'_0 — фиктивное t_0 , d — дистанция (расстояние между пунктами приёма и возбуждения), $V_{\text{ост}}$ — фиктивная граничная скорость (2).

$$V_{\text{ост}} = \frac{V_{\Gamma}}{\cos \varphi} \quad (2)$$

, V_{Γ} — истинная граничная скорость, φ — угол наклона границы.

Временные разрезы в МПВ–ОГП формируются путём введения кинематических поправок (редуцирования) и суммирования по общим средним точками, на преломляющей границе соответствующим общим глубинным площадкам. В СП 11-105-97 (часть VI) применение МПВ–ОГП допускается в инженерно-геофизических исследованиях, при условии, что регистрация проводится на малых базах наблюдений и применяется система наблюдений, основанная на выносных фланговых расстановках. Вынос должен быть не менее дистанции начальной точки годографа преломлённой волны, соответствующей самой глубокой изучаемой границе. Обоснование подобных требований в документе не приводится, поэтому нами было математическое моделирование с целью уточнения требований к предлагаемой системе наблюдений.

В своде правил МПВ ОГП указан как метод обнаружения и оконтуривания карстовых полостей и подземных выработок. В нашей практике к способу МПВ–ОГП приходилось прибегать в ситуациях, когда резкие сейсмические границы, такие как кровли скальных, водонасыщенных или мёрзлых грунтов, залегали на малых глубинах (<10 м). Отражённые волны в такой ситуации не выделялись или прослеживались фрагментарно, в последующих вступлениях на фоне интенсивных преломлённых волн, наблюдаемых в первых вступлениях. Цель исследований, результаты которых представлены далее, заключалась в оценке горизонтальной разрешающей способности МПВ ОГП при выделении карстовых полостей, обосновании возможности применения способа при прослеживании неглубоких границ, сформировать требования к системе наблюдений и графу обработки.

Оценка возможностей МПВ–ОГП

В отличие от МОВ, одной общей средней точке в МПВ соответствует несколько перекрывающихся интервалов между предельной точкой и точкой выхода на преломляющей границе, образующих общую глубинную площадку. Размер общей глубинной площадки зависит от максимальной дистанции трасс, входящих в ОСТ и во много раз превышает протяжённость «общей глубинной точки» МОВ (Рисунок 1).

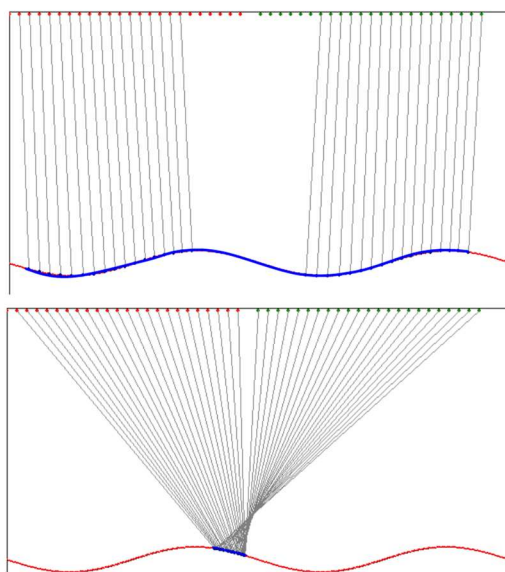


Рисунок 1. Лучевая схема для одной ОСТ: МПВ (сверху), МОВ (снизу). Синим выделено геометрическое место глубинных точек и точек выхода — «глубинная площадка»

Учитывая, что минимальная дистанция, на которой выделяется преломлённая волна, равна дистанции точки излома годографа первых вступлений, то минимальный размер общей глубинной площадки равен (3) (Рисунок 2).

$$L_{огп} = d_{и} - 2H \operatorname{tg} i = 2H \left(\frac{D}{\sqrt{D^2 - 1}} \right) \quad (3)$$

, где $d_{и}$ — дистанция точки излома годографа первых вступлений, i — критический угол, D — скоростная дифференциация преломляющей границы, V_2/V_1 .

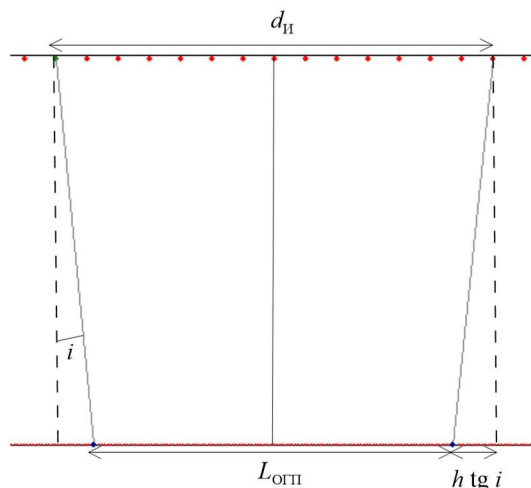


Рисунок 2. К определению минимального размера общей глубинной площадки в случае горизонтальной площадки

При высокой скоростной дифференции размер ОГП уменьшается, асимптотически приближаясь к удвоенной глубине преломляющей границы. С уменьшением скоростной дифференциации, увеличением глубины и угла наклона границы минимальная протяжённость общей глубинной площадки растёт. Для оценки размеров структурных аномалий в картируемой границе, выделяемых МПВ, были вычислены и обработаны по МПВ–ОГП. Для расчёта сейсмограмм применялись модели с одной контрастной ($D = 4$) криволинейной границей. Форма границы определялась гармонической функцией с пространственным периодом L_a (Рисунок 3).

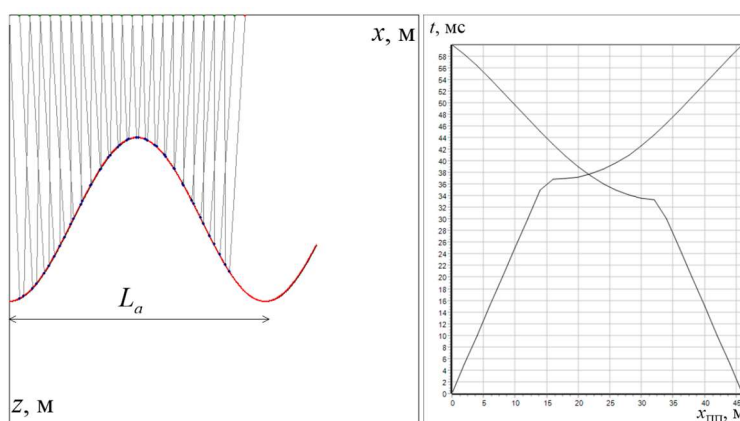


Рисунок 3. Модель с криволинейной преломляющей границей и встречные годографы первых вступлений для неё, L_a — размер (пространственный период) структурной аномалии

Максимальную горизонтальную разрешённость МПВ обеспечило бы однократное профилирование на постоянной базе $d_{и}$, однако при использовании многоканальных станций эта технология неэффективна. Для моделирования применялась общепринятая система наблюдений, когда пункт возбуждения перемещается относительно неподвижной приёмной линии. Все относительные позиции ПВ образуют линию возбуждения. Такой подход обеспечивает получение

несколько разнотипных расстановок с совпадающей приёмной линией. Назовём такой элемент системы наблюдений *шаблоном*. После отработки шаблона, приёмная линия перемещается вперёд по профилю. Для моделирования была выбрана приёмная линия из $N = 24$ ПП, с шагом $\Delta x_{ПП} = 2$ м и общей длиной $L_{П} = 46$ м, на линии возбуждения шаг $\Delta x_{ПВ} = 4$ м. Учитывая, что преломлённые волны прослеживаются на сейсмических записях начиная с дистанции $d_{и}$ (4), к шаблону было добавлено по $M(5)$ выносных пунктов возбуждения с каждого фланга. Шаблон системы наблюдений представлен на обобщённой плоскости (Рисунок 4).

$$d_{и} = 2H \sqrt{\frac{D+1}{D-1}} \approx (2-3) H \quad (4)$$

$$M = \frac{d_{и}}{\Delta x_{ПВ}} \quad (5)$$

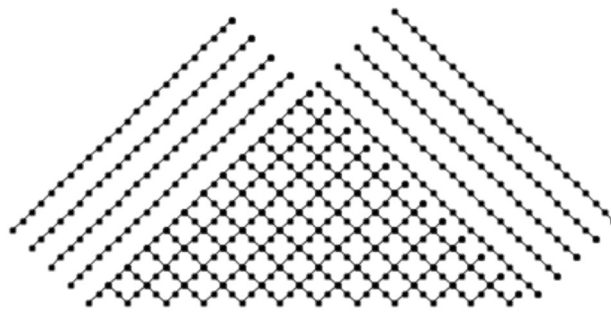


Рисунок 4. Шаблон системы наблюдений на обобщённой плоскости

Массив данных формируется сортировкой трасс по признаку $d = d_{и}$ и упорядочиванием их по возрастанию $x_{ост}$. Кратность при сортировке по постоянной дистанции (удалению) будет меняться по профилю, для некоторых ОСТ она будет равна нулю (Рисунок 5).

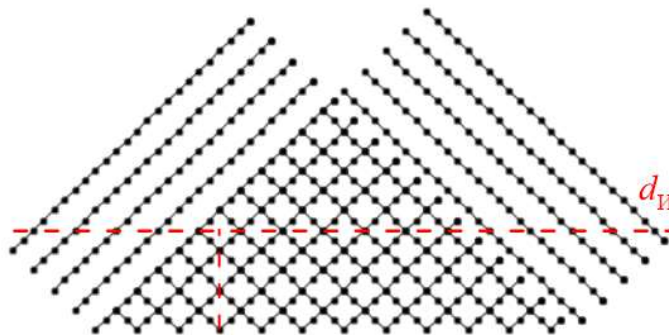


Рисунок 5. Линия постоянного удаления на обобщённой плоскости. Выделена ОСТ с нулевой кратностью

Выравнивание кратности вдоль профиля достигалось выбором размера бина, равного $\Delta x_{ПВ}$. С этой позиции оптимальный шаг возбуждения — $\Delta x_{ПВ} = \Delta x_{ПП}$. Альтернативный подход — суммирование трасс с дистанциями, большими $d_{и}$. Оптимальный диапазон трасс приведён в выражении (6).

$$[d_{и}; d_{и} + (\Delta x_{ПВ} + \Delta x_{ПП})] \quad (6)$$

Кроме сортировки, граф обработки включал следующие ключевые процедуры — программную регулировку амплитуд, скоростной анализ, ввод кинематических поправок (редуцирование), суммирование и миграцию. Программная регулировка была реализована на основе приближённой зависимости амплитуды преломлённой волны от дистанции (7):

$$A'(d) = A(d) \cdot d^2 \quad (7)$$

Для миграции применялся алгоритм Кирхгоффа после суммирования, применяемый при обработке разрезов МОВ. Если скоростная дифференция достаточно велика, то выполняется равенство (8) и подобный подход обоснован.

$$t_0 \approx t'_0 \quad (8)$$

В результате обработки формировались глубинные динамические разрезы. Структурные аномалии размером меньше общей глубинной площадки на разрезах не выделялись. Аномалии с протяжённостью, превышающей утроенную длину ОГП, локализовались точно (Рисунок 6). Контуры и расположение аномалий с $L_{\text{ОГП}} < L_a < 3L_{\text{ОГП}}$ определялись приближённо.

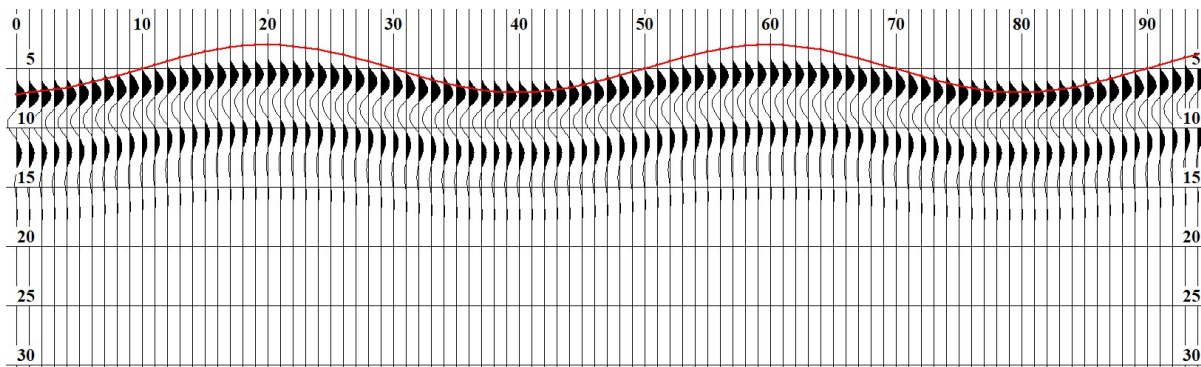


Рисунок 6. Глубинный динамический разрез, полученный обработкой модельных данных по способу МПВ-ОГП. $L_a = 4L_{\text{ОГП}}$

Описанный граф обработки был применён к полевым данным. На рисунке 7 показаны примеры глубинных динамических разрезов, с выделенной преломляющей границей.

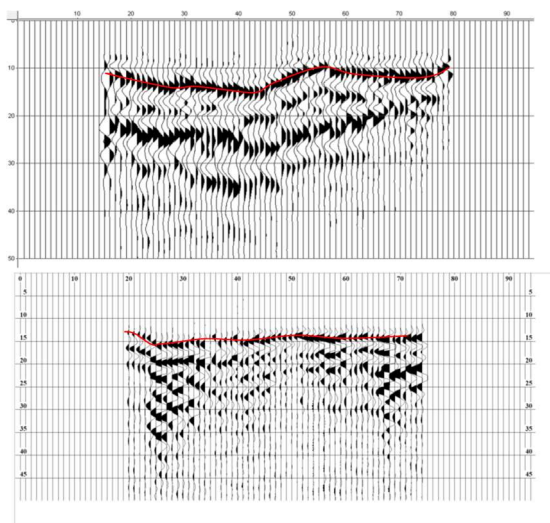


Рисунок 7. Глубинный динамический разрез, полученный обработкой полевых данных по способу МПВ-ОГП

Для обнаружения локальных аномалий использовались как чисто структурные признаки (увеличение или уменьшение глубины), так и динамические — потеря корреляции, локальные изменения амплитуды или преобладающей частоты преломлений, хаотизация волнового поля, появление дифрагированных волн и т.д. Кроме того, карстовые полости и подземные выработки могут проявлять свойства резонаторов и формировать протяжённые моночастотные колебания. По динамическим признакам выделяются даже небольшие по протяжённости аномалии (Рисунок 7).

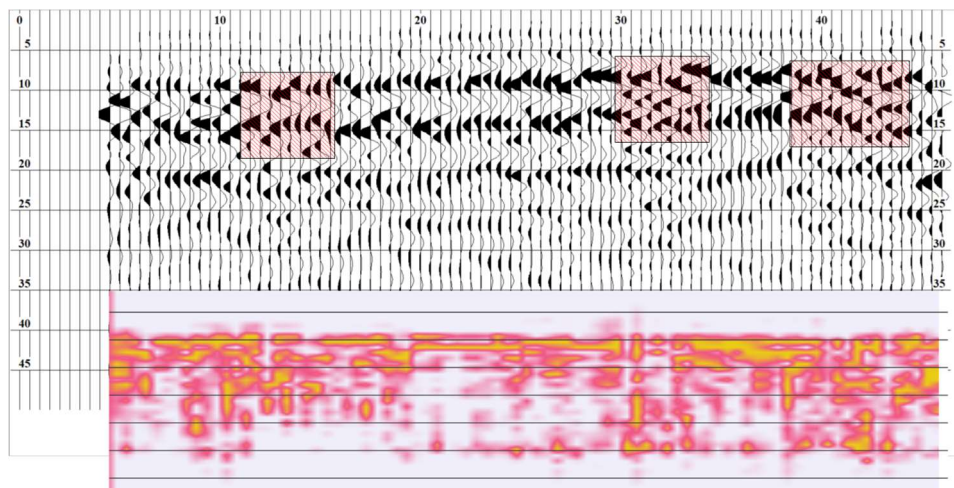


Рисунок 7. Глубинный динамический разрез МПВ-ОГП (сверху) с выделенными карстовыми полостями (красная штриховка). Снизу – спектрограмма по разрезу

Выводы

По нашему мнению, способ МПВ–ОГП можно использовать при картировании неглубоко залегающих горизонтальных и слабонаклонённых горизонтальных границ, в первую очередь для оценки глубины их залегания. Рекомендуется использовать небольшие шаги приёма и возбуждения (1–2 м), включать в каждый шаблон выносные расстановки для непрерывного прослеживания преломляющих границ. Для обработки выполнять сортировку по ОСТ, выбирая в каждую сейсмограмму трассы с дистанциями ($d_{\text{и}} — d_{\text{и}} + \Delta x_{\text{ПВ}} + \Delta x_{\text{ПП}}$) или задавая размер бина $\Delta x_{\text{ПВ}} = \Delta x_{\text{ПП}}$. Размер аномалий, выделяемых по изменению глубины преломляющей границы, зависит от размера общей глубинной площадки, который растёт с увеличением глубины и угла наклона границы и уменьшением скоростной дифференции. Также выделение аномалий, приуроченных к кровле преломляющей границ возможно по динамическим признакам, которые при обработке МПВ искажаются меньше, чем в МОВ–ОГТ.

Библиография

1. Пригара А.М., Татаркин, А. В. [2012]. Определение физико-механических свойств грунтов при оценке состояния гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. **84**. С. 360-372.
2. Старобинец А. Е., Старобинец М. Е. [1983] Цифровая обработка и интерпретация данных метода преломленных волн
3. Телегин, А. Н. [2017] Возможности сейсморазведки при изучении кристаллического фундамента / Записки Горного института. **223**. С. 30-36. DOI 10.18454/PMI.2017.1.30.