

**Малоглубинная беспилотная электроразведка: БАС- $\mu$ ЗСБ Г.М. Тригубович\* (АО «ЕМ-Разведка»), А.В. Чернышев (АО «ЕМ-Разведка»), А.В. Куклин (АО «ЕМ-Разведка»), С.И. Еременко (ООО ГП «Сибгеотех»), А.Е. Симаков (АО НПП «Радар ммс»)**

## **Введение**

В современной геофизике и геологии активное развитие получают беспилотные авиационные системы (БАС). Одним из наиболее перспективных и востребованных наземных прототипов является электромагнитная разведка методом переходных процессов МПП или зондирования становлением ЗСБ. С развитием технологий и увеличением потребности в высокоточных детальными геофизических исследованиях в методах импульсной индуктивной электроразведки возникли специализации, которые активно используются в геофизической практике при поисках УВС, ТПИ, гидрогеологии и решении инженерных задач. Эти методы демонстрируют премиальную результативность и позволяют проводить исследования на различных глубинах. Деление это во многом условное, но отражает специфику используемой технологии и оборудования.

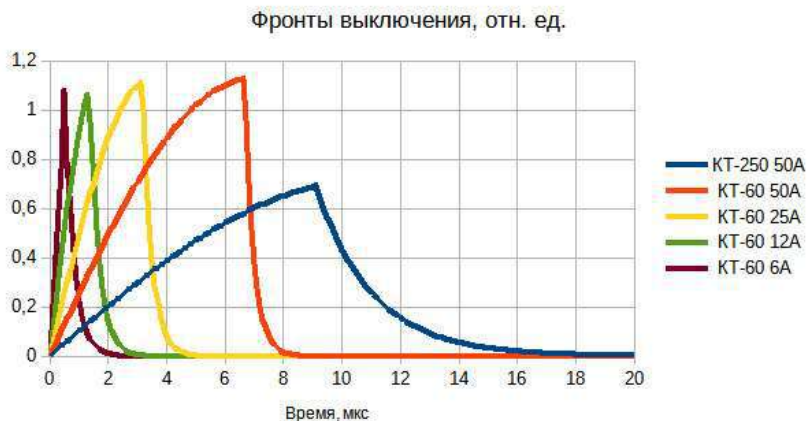
Парадоксальным фактом можно считать, что изучать малые глубины, начиная с первых метров, в ЗСБ оказалось сложнее, чем выходить на глубины в несколько километров. Для этого есть веские причины, на которых, однако, сейчас мы не намерены останавливаться подробно. Более важным является то, что в значительной мере многие проблемы технологии малоглубинных исследований сейчас решены. Получен значительный фактический материал результативности применения импульсной индуктивной электроразведки в геофизике в проектах УВС, ТПИ, гидрогеологии и инженерных исследованиях.

## **$\mu$ -ЗСБ**

Здесь мы рассмотрим элементы нового технологического уровня с применением беспилотников средней грузоподъемности и легких антенн для глубины исследований до 50 м, которые могут обеспечить ЗСБ с времен 1 мкс. Технология еще на старте осознанного применения в практике. Не секрет, что особенности методики полевых работ и интерпретации еще не в полной мере известны широкой геофизической общественности и, конечно, уважаемым потенциальным заказчикам. Область исследований  **$\mu$ -ЗСБ** – самая верхняя часть разреза от первых метров до 50 м, но задача не выглядит легкой и требует спец подготовки техники и оператора-геофизика, интерпретатора ввиду ее достаточно высокой наукоемкости. Микросекундный масштаб времен – это: учет формы зондирующего импульса, поляризационных эффектов ИВП, СПМ, геометрии приемно-генераторных конструкций, их амплитудно-частотных характеристик, «тока смещения», взаимоиנדукции источника и среды и др. Существует значительное количество задач и специфических проблем, без решения которых нельзя рассчитывать на высокое качество прогноза полезных ископаемых и решения инженерных задач (Belaya, 2021).

## **БАС $\mu$ -ЗСБ**

Для более эффективного применения аэро-ЗСБ в области инженерных изысканий шла борьба за повышения высоких частот спектра излучения и приема сигналов о ВЧР, что максимально было реализовано в пилотируемой системе «Импульс-А-150-AeroFast»,  $D = 14.1$  м, где был достигнут минимальный фронт выключения главного индуктора системы на уровне 8 мкс. Дальнейшее снижение этого важного параметра зондирующей системы стало возможным с применением беспилотных авиационных систем (рисунок 1).

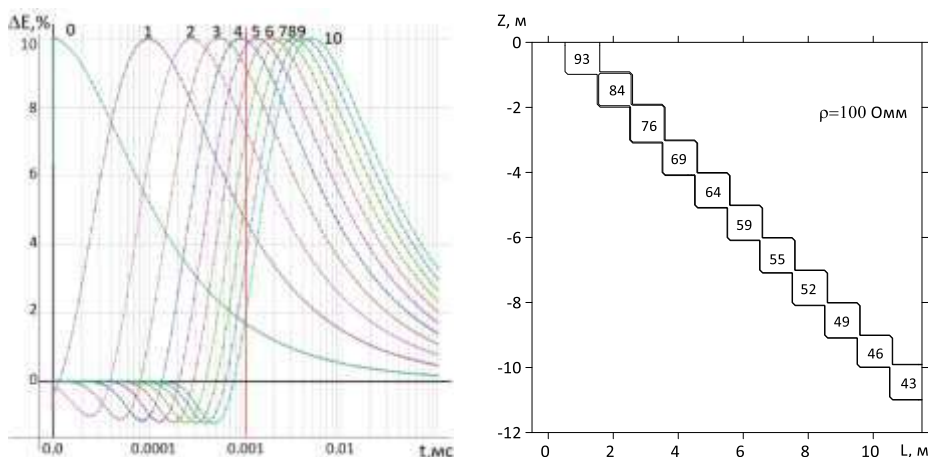


**Рисунок 1.** Фронты выключения П-образного тока главного индуктора аэрогеофизических систем серии «Импульс-А» и БАС μ-ЗСБ (Тригубович, 2024)

### Оценка начальной глубины исследования

Для корректного описания верхней части разреза необходимо представление о возможностях зондирующей системы в области ранних времен. Ранее существовало мнение о корректности применения формулы толщины скин-слоя  $h = \sqrt{\rho t / \mu_0}$ , где  $\rho$  - среднее удельное сопротивление среды (чаще всего «кажущееся» или «эффективное») в момент времени  $t$ , для оценки т.н. «мертвой зоны», т.е. области глубин от поверхности, которые якобы не поддаются изучению за счет инерционности приемно-генераторной конструкции. По этой формуле в среде с  $\rho=100$  Омм уже на 1 мкс достигнута глубина 9м. Куда «пропали» эти 9м?

На рисунке 2 приведены относительные аномальные сигналы от слоя толщиной 1м, создающего аномалию в 10% относительно сигнала в полупространстве  $\rho=100$  Омм. Слой залегает на меняющейся глубине от 1 до 10 м. Расчет проведен с мгновенным выключением тока для дипольной установки на поверхности полупространства.

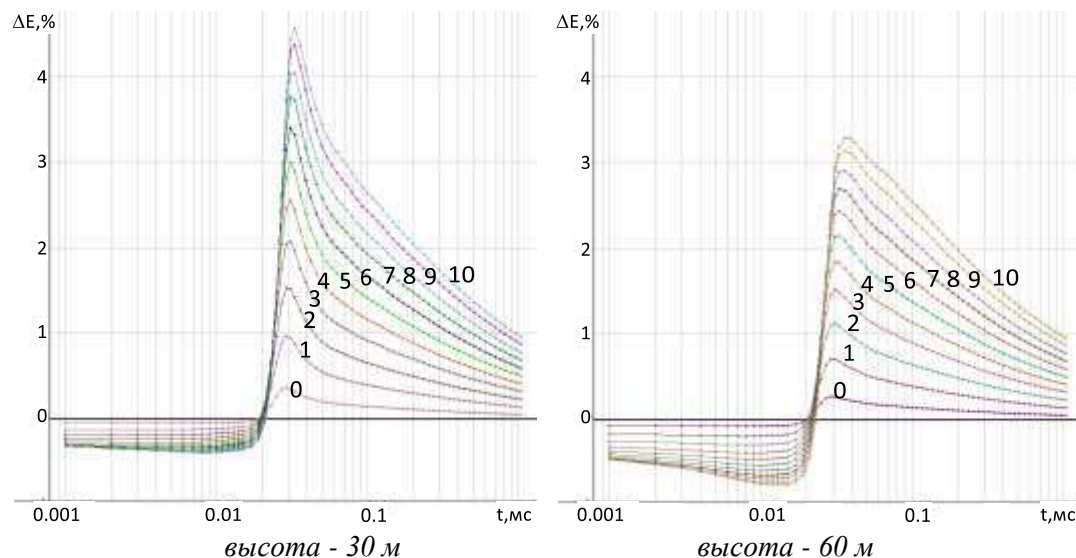


**Рисунок 2.** Аномалия в % от слоя толщиной 1м в полупространстве  $\rho=100$  Омм. Шифр – глубина слоя. Токковый импульс – Хевисайд

Как видно из рисунка, на времени 1 мкс слой может быть зафиксирован на всех глубинах его залегания, начиная с поверхности  $H = 0$ .

На рисунке 3 приведены относительные аномальные сигналы для той же модели, рассчитанные с реальным фронтом выключения тока 2 мкс для системы «воздух-воздух» на двух высотах – 30 и 60 м.

В этом случае проявление слоя отмечается меньшей амплитудой относительной аномалии и регистрируется после окончания фронта выключения тока в ГП на всех глубинах. Ожидаемо с увеличением высоты полета уменьшается амплитуда относительной аномалии.



**Рисунок 3.** Аномалия в % от слоя в полупространстве для двух высот БАС «воздух-воздух». Реальный импульс

Таким образом, использование толщины скин-слоя для обоснования наличия «мертвой зоны» является некорректным. Так называемой «мертвой зоны» не существует. В наблюдаемом сигнале проявляются все глубины начиная от поверхности, однако с увеличением длительности фронта выключения тока (и высоты полета) растет область эквивалентности определения характеристик среды на малых глубинах.

### Глубина исследований

Известно, что глубина исследований в беспилотной системе «воздух-воздух» определяется в основном ограничением грузоподъемности БАС. В текущий момент для рядовых работ мы можем рассчитывать на грузоподъемность в пределах 7-10 кг, что предполагает использование легких антенных конструкции и малую емкость источников питания. Однако, рассчитывая на появление более мощных, доступных для аэрогеофизики беспилотных авианосителей, мы оцениваем достижимую глубину исследований в **100 м** уже в ближайшее время. Сегодня за счет вынужденного применения относительно малых, легких, близко расположенных измерительных антенн и индуктора с учетом решения проблем их взаимодействия мы можем рассчитывать на глубину исследования до **50 м**.

При оценке максимально достижимой глубины исследования пользуются двумя подходами:

- экспресс-оценка по толщине скин-слоя;
- на основе прямого моделирования геоэлектрических условий исследуемой среды. Для этого восстанавливают модель среды по параметрическим зондированиям и оценивают чувствительность электроразведочной системы регистрации сигналов на тестовых поисковых объектах, располагаемых на различных глубинах.

Снижение измеряемого сигнала ниже уровня чувствительности системы есть оценка глубины по нижнему уровню, к которой применяется понижающий коэффициент.

## Преимущество БАС $\mu$ -ЗСБ

За счет возможности сближения с поверхностью земли увеличиваются возможности более достоверной регистрации поляризационных эффектов, которые при решении ряда прикладных задач в инженерных задачах и поисках золотосульфидного оруденения играют важную роль. Современная электроразведка научилась максимально точно учитывать и рационально использовать эти дополнительные признаки.

## Проблемы

В малых облегченных конструкциях БАС  $\mu$ -ЗСБ нарастают проблемы учета собственных процессов вынужденно сближенных элементов зондирующей конструкции, которые приходится решать нетрадиционными способами, конструктивно отличающимися от применяемых в пилотируемой аэрогеофизике. В идеале, после введения всех поправок, измеряемый сигнал должен содержать только отклик резистивной компоненты геологической среды с сохранением поляризационных атрибутов.

•

## Выводы:

- В настоящее время созданы экспериментальные образцы беспилотной аэроэлектроразведки БАС  $\mu$ -ЗСБ, системы «воздух-воздух», позволяющие выполнять прецизионные исследования верхней части разреза до глубины 50 м. Увеличение глубины исследований до 100 м требует увеличение грузоподъемности беспилотника до 25-30 кг.
- «Мертвой зоны», в технологии БАС  $\mu$ -ЗСБ практически не существует. Проявляются все глубины начиная от поверхности земли. Для этого обеспечен максимально короткий фронт выключения тока индуктора и высокая дискретизация ЭМ отклика среды.
- Отклик среды в наносекундном диапазоне времен дешифрируется в рамках 1D и 3D инверсий с коротким временем выключения индуктора системы. Увеличение длительности фронта выключения индуктора и высоты излучателя повышают эквивалентность определения характеристик среды на малых глубинах.
- Корректная интерпретация данных БАС- $\mu$ ЗСБ невозможна без учета формы импульса тока, геометрии установки и ее положения относительно исследуемой среды, поляризационных эффектов и помех.

## References

1. Belaya A., Kuklin A., Trigubovich G., Chernyshev A. High Space Density Time-Domain Electromagnetic Scanning for Ore and Engineering Exploration. Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021, Volume 2021, p.1 – 8
2. Trigubovich G.M., Piharev S.N., Eremenko S.I., Kuklin A.V., Barsukov S.V. Stadiya «poisk» OPI s bespilotnoj elektrorazvedochnoj sistemoj BAS- $\mu$ ZSB. – Sbornik statej po materialam IV nauchno-prakticheskoj konferencii OOO «NK «ROSNEFT'» – NTC»: «Puti realizacii perspektivnyh tekhnicheskikh reshenij. Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluataciya kar'erov obshcherasprostranennyh poleznyh iskopaemyh» 23-24 noyabrya 2023 goda. Krasnodar, «Izdatel'skij Dom – YUG», 2024, 50 s.