

Глубинный георадар.
Исследования геологической структуры подстилающей поверхности.
Экспериментальные данные и численное моделирование.

А.И. Беркут, В.В. Копейкин, П.А. Морозов, Л.М. Криницкий, Ульяновцев Н.А
(Компания ВНИИСМИ).
А.В. Попов, И.В. Прокопович (ИЗМИРАН).

Традиционные георадары в настоящее время недостаточно широко используются для решения задач геологоразведки. Небольшая мощность передатчиков таких георадаров ограничивает глубину зондирования в «легких» грунтах первыми 10 метрами. Такие глубины исследования мало интересуют геологов.

При разработке глубинного георадара «Лоза» было сделано все, чтобы возможности прибора по глубине зондирования стали привлекательны для геологов и геофизиков. Конструктивные особенности глубинного георадара «Лоза» (сверхвысокая мощность, концентрация энергии сигнала в низкочастотной части спектра, большой динамический диапазон регистрации отраженного сигнала) [1], позволяют применять георадар в исследовании подповерхностных структур до глубин 100-150 метров в «тяжелых» низкоомных грунтах и до 200-300 метров в высокоомных породах.

Такие рекордные глубины зондирования достигнуты с помощью реализации новые схемных решений и принципов:

1. Георадар «Лоза» оснащен передатчиками, которые по пиковой мощности превышают в 10 000 – 100 000 раз мощность передатчиков традиционных георадаров. Достижение таких мощностей передатчиков стало возможным после перехода от транзисторной схемы к формированию импульса на высоковольтных разрядниках. Георадар «Лоза» комплектуется передатчиками импульсным напряжением 5, 10, 21 кВ. Передатчики в 50 и 100 кВ проходят экспериментальные испытания.

2. Георадар «Лоза» оборудован низкочастотными резистивно-нагруженными антеннами (5-25 МГц), которые позволяют в полной мере реализовать возможности сверхмощных передатчиков. Антенны построены по схеме Ву-Кинга с распределенной резистивной нагрузкой. Дополнительная искусственная диссипация обеспечивает генерацию короткого апериодического импульса, который наилучшим образом подходит для георадарного зондирования.

3. В георадаре «Лоза» использован аппаратно-программный алгоритм, реализующий функцию оцифровки регистрируемого сигнала с динамическим диапазоном до 120 дБ.

4. Для достижения больших глубин зондирования в георадарах «Лоза» максимум энергии зондирующего сигнала сдвинут на более низкие частоты в пределах полосы частот приемника георадара 1-50 МГц.

Затухание зондирующего сигнала имеет существенную зависимость от частоты. Чем ниже частота, тем меньше затухание сигнала в одних и тех же условиях. Георадары «Лоза» серийно комплектуются антеннами 50 МГц,

(длина 3 метра), 25 МГц (длина 6 метров), 15 МГц (длина 10 метров), 10 МГц (длина 15 метров).

5. Для достижения рекордных результатов по глубине зондирования в георадарах учитывается «фактор среды». Только при размещении антенн георадара на поверхности (границе) раздела двух сред формируется диаграмма направленности излучения, ориентированная в сторону среды с большей диэлектрической проницаемостью. По теоретическим оценкам [3, 4], в нижнюю полусферу (в грунт) излучается в n^2 раз больше энергии электромагнитного сигнала, чем вверх (в воздух), (где n - показатель преломления). От свойств среды зависит и величина угла диаграммы направленности излучения георадара. Чем больше диэлектрическая проницаемость среды, тем меньше угол и зондирующий сигнал излучается более сфокусированным [1].

Все, перечисленные выше принципы повышения глубинности георадарных исследований реализованы аппаратурно и методически в современных моделях георадара «Лоза».

Осветим еще два вопроса, которые часто возникают при знакомстве с характеристиками георадара «Лоза».

Вопрос 1. Многие геофизики, которые применяют георадар в своих исследованиях, убеждены, что георадар не может зондировать на глубину больше нескольких метров. Такая оценка глубины вполне корректна, но необходимо только уточнить, что эта оценка выполнена для традиционных георадаров, которые работают с передатчиками мощностью 50 – 100 Вт в диапазоне частот 100-500 МГц. Георадар «Лоза» имеет принципиально другие характеристики. «Лоза» работает с передатчиками в 10 000 – 100 000 раз мощнее, а полоса частот приемника «Лоза» составляет 1-50 МГц.

Затухание зондирующего сигнала имеет существенную зависимость от частоты. Чем выше частота, тем выше затухание сигнала. Графически, по теоретическим и экспериментальным данным, эта зависимость выглядит так:

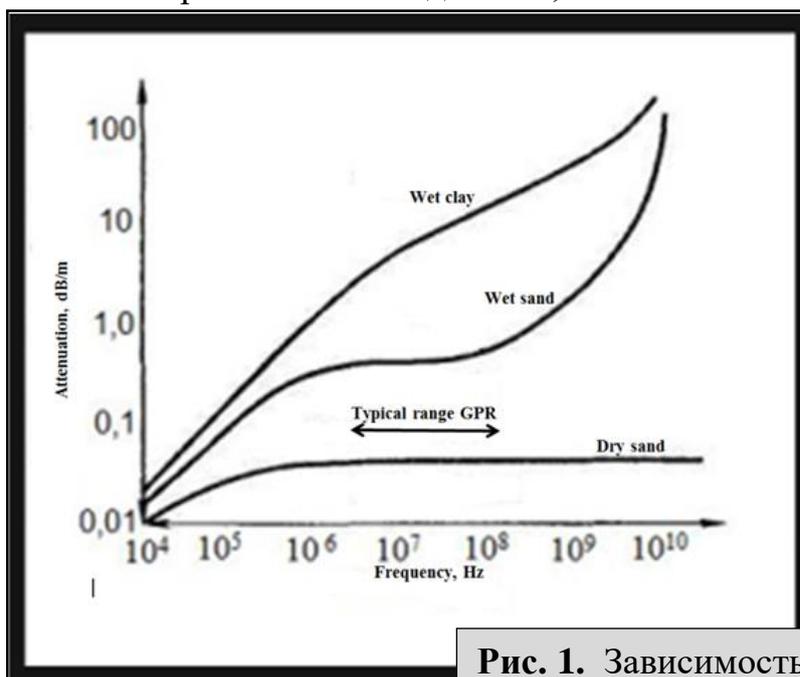


Рис. 1. Зависимость затухания зондирующего сигнала от частоты.

В диапазоне частот «традиционных» георадаров затухание действительно может составлять 5-10 и даже 20 дБ/м для влажной глины. Это делает невозможным глубинное георадарное зондирование. На частотах менее 15-20 МГц затухание сигнала может оказаться существенно менее 1 дБ/м.

Оценка глубинности георадара «Лоза» выглядит следующим образом:

Потенциал георадара определяется по формуле:

$$dB \text{ по напряжению} = 20 \cdot \lg(U_1/U_0)$$

где: U_1 – пиковое напряжение передатчика (в нашем случае $21 \cdot 10^3$ В),
 U_0 – чувствительность приемника, (в нашем случае $\sim 10 \cdot 10^{-3}$ В).

Потенциал прибора будет равен:

$$dB = 20 \cdot \lg(21 \cdot 10^3 / 10 \cdot 10^{-3}) = 126 \text{ dB}$$

При затухании порядка 0,3 – 0,4 дБ/м мы получим оценку глубины равную **~ 400 метрам**. Полученную оценку необходимо разделить на 2, так как георадарный зондирующий сигнал проходит двойной путь: от поверхности до отражающей границы и обратно. В результате, оценка максимальной глубины зондирования георадара с пиковым напряжением передатчика 21 кВ на частотах 15-20 МГц составит **~ 200 метров**.

Вопрос 2. Второй вопрос, непосредственно связан с первым: Насколько безопасны для человека передатчики с такой большой мощностью?

Вопрос опасности или неопасности такого высокого напряжения, можно проиллюстрировать примером свечи зажигания современного бензинового автомобильного двигателя. Свеча зажигания – это тот же «разрядник». Распределитель зажигания (трамблер) подает на свечу в нужный такт работы автомобильного двигателя напряжение до 25 000 вольт. Сигнал передатчика георадара «Лоза» по характеристикам похож на сигнал от системы зажигания автомобиля. Были случаи, когда в дальних экспедициях при поломке передатчика мы использовали для работы систему зажигания автомобиля. Передатчик георадара «Лоза» так же безопасен, как и система зажигания автомобиля. Они работают на нагрузку с очень высоким сопротивлением. При этом напряжение импульса очень высокое, а сила тока, протекающего во время разряда, микроскопически мала. Этот факт подтвержден необходимыми сертификатами.

Возможности глубинного георадара «Лоза» можно проиллюстрировать результатами конкретных геофизических исследований. На рисунках 5-9 подобраны примеры радарограмм, на которых обследуемые геологические структуры и объекты предстают достаточно узнаваемо без какой либо обработки.

Значения амплитуды и фазы на радарограммах передаются палитрой цветов. Условно принято, что максимальные значения амплитуды «плюсовой» поляризации отражаются тонами красного цвета, а максимальные значения амплитуды «минусовой» поляризации отражаются тонами синего и тёмно-синего цвета. Значения амплитуды в районе «нулевых» значений отражаются тонами желтого цвета палитры. Все

промежуточные значения амплитуды отражаются тонами цвета соответственно палитре цветов (256 уровней). Вариации условного цвета на радарограммах позволяют наглядно отразить весь динамический диапазон амплитуд (более 120 дБ) и фаз зондирующего сигнала. Геофизический смысл имеют только границы зон различных оттенков цвета и порядок изменения цвета.

Анализ низкочастотных сигналов на волновых формах показывает, что прослеживается связь между амплитудой и фазой этих сигналов и интегральными характеристиками диэлектрической проницаемости (ϵ) и проводимости (σ) глубинных геологических горизонтов.

Совершенствование методов анализа и интерпретации глубинных георадарных данных в настоящее время мы развиваем по двум направлениям. Первый вариант связан с эвристическим подходом, который реализуется посредством накопления опыта сравнительного анализа данных низкочастотного георадара и результатов заверочного геологического бурения [2, 3, 4]. Опыт интерпретации позволяет безошибочно выделять по георадарным данным зоны повышенных или пониженных значений диэлектрической проницаемости (ϵ) и проводимости (σ). Такие зоны соответствуют определенным геологическим структурам, контрастным по диэлектрической проницаемости и проводимости (рисунки 5-9).

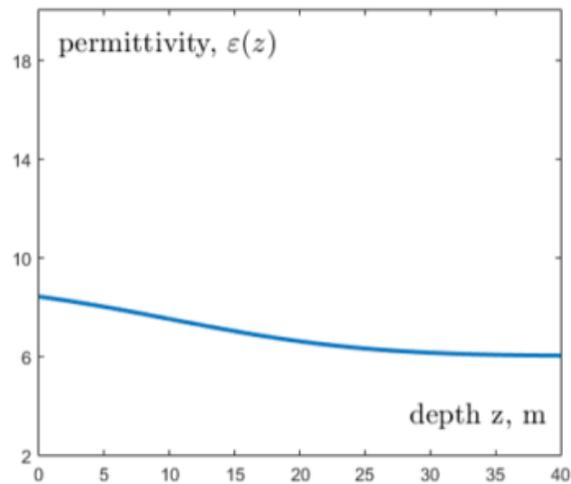
Второе направление развития методов анализа и интерпретации георадарных данных связано с использованием упрощенных (осредненных) вариантов решения обратной задачи. На рисунке 2 представлены варианты оценочного восстановления изменений по глубине параметров среды (диэлектрической проницаемости) по экспериментальным георадарным данным [1, 5].

Георадарный профиль (рис. 3) пересекает элемент древнего палеорельефа (возможно, палеорусл). Элемент палеорельефа «заполнен» влагонасыщенным грунтом. Это подтверждается как георадарными данными (мощный НЧ-сигнал, «+» поляризации), так и численным моделированием (диэлектрическая проницаемость (ϵ) возрастает с 10 до 16) (рис. 2d).

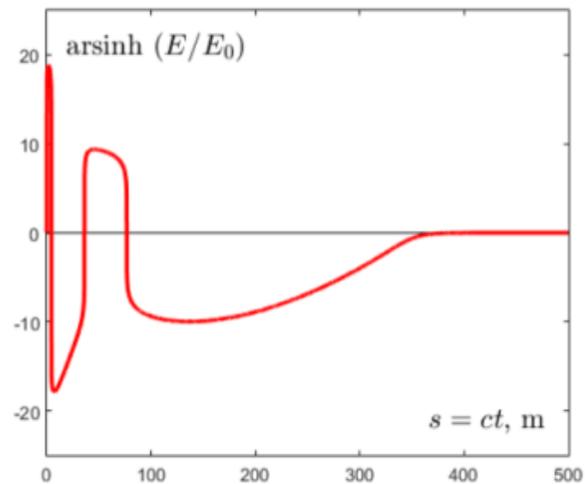
На примерах (рис. 3-8) представлены варианты геологических приложений георадара Лоза:

- исследование элементов палеорельефа,
- исследование тектонических нарушений,
- исследование тектонических разломов,
- разведка кимберлитовых трубок,
- разведка грунтовых вод.

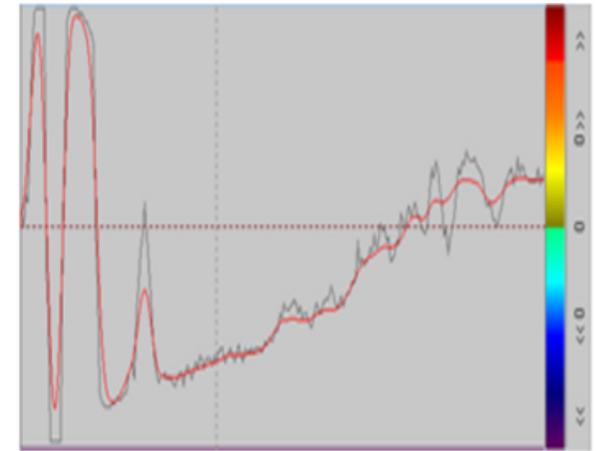
Все представленные результаты получены с помощью георадара Лоза-Н в экспедициях Компании ВНИИСМИ или пользователей георадара Лоза-Н.



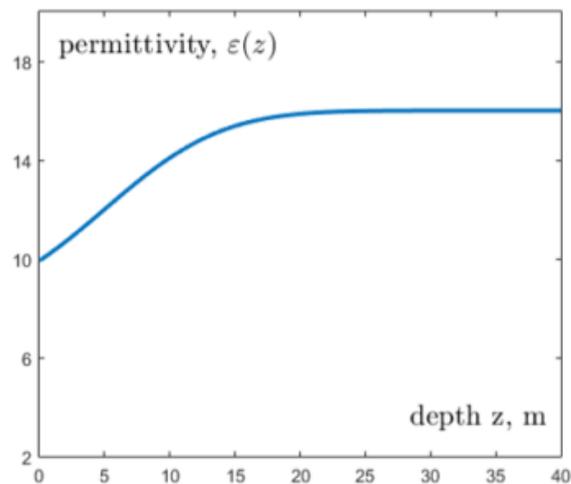
(a)



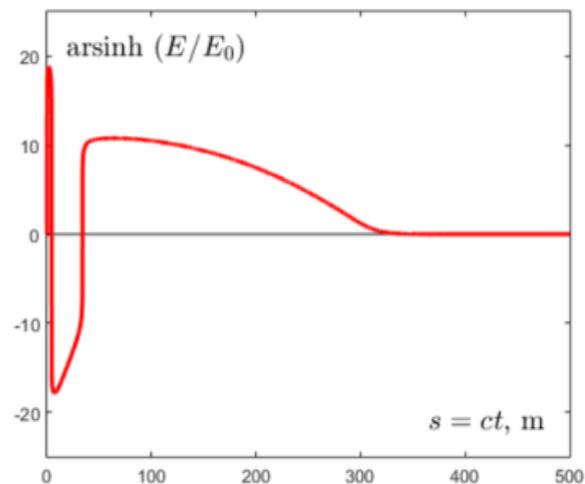
(b)



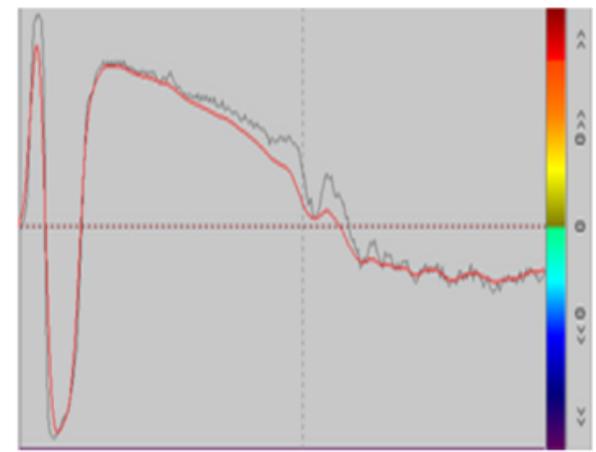
(c)



(d)



(e)



(f)

Рис. 2. (a, d) – model vertical distributions of relative dielectric permittivity, (b, e) – received signal in quasi-logarithmic scale; (c, f) – experimental A-scans (1) and (2) from Fig. 5.

Рис. 4. Радарограмма тектонического блокового провала, грабена и фото места работ. Иран. 2012 год

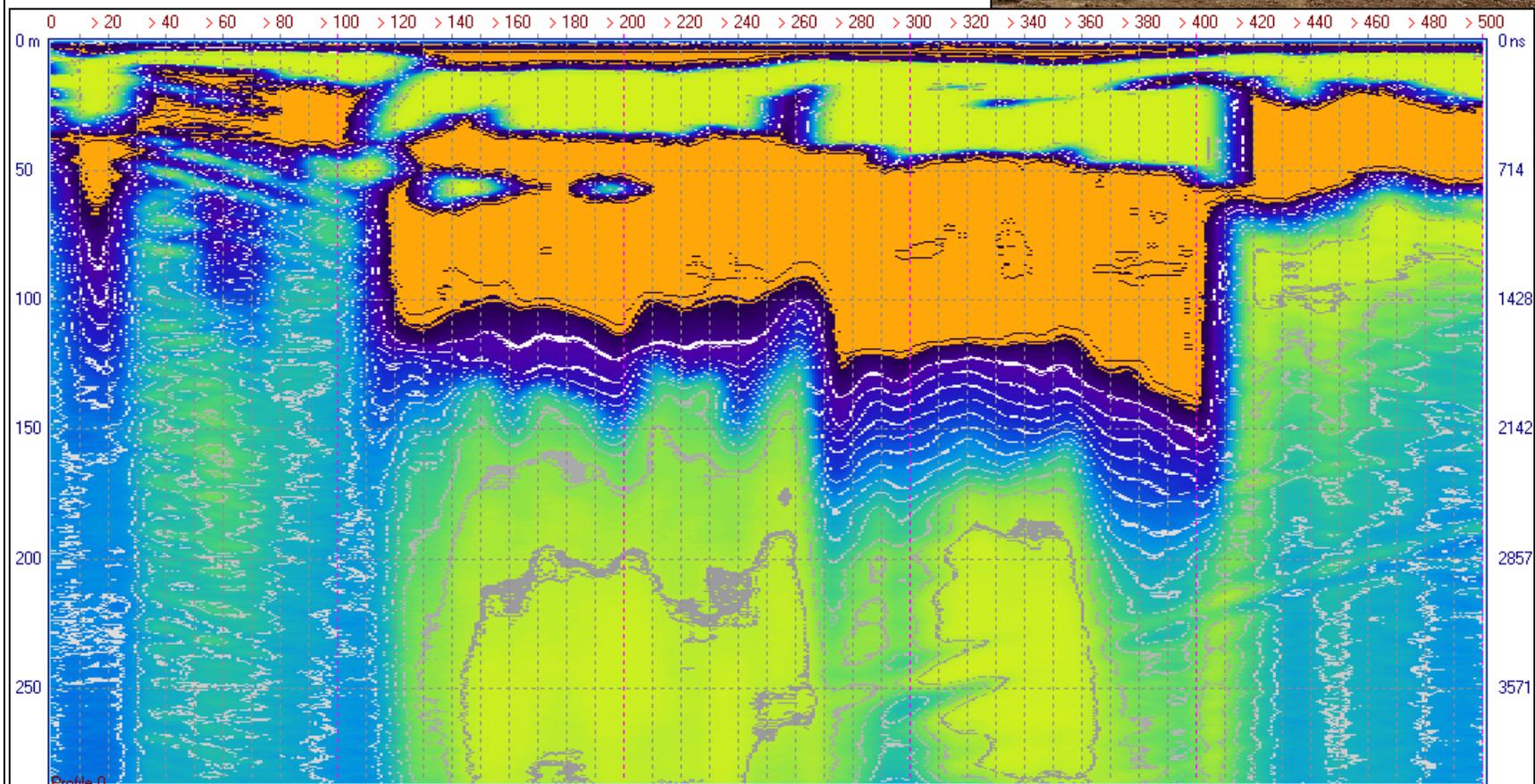
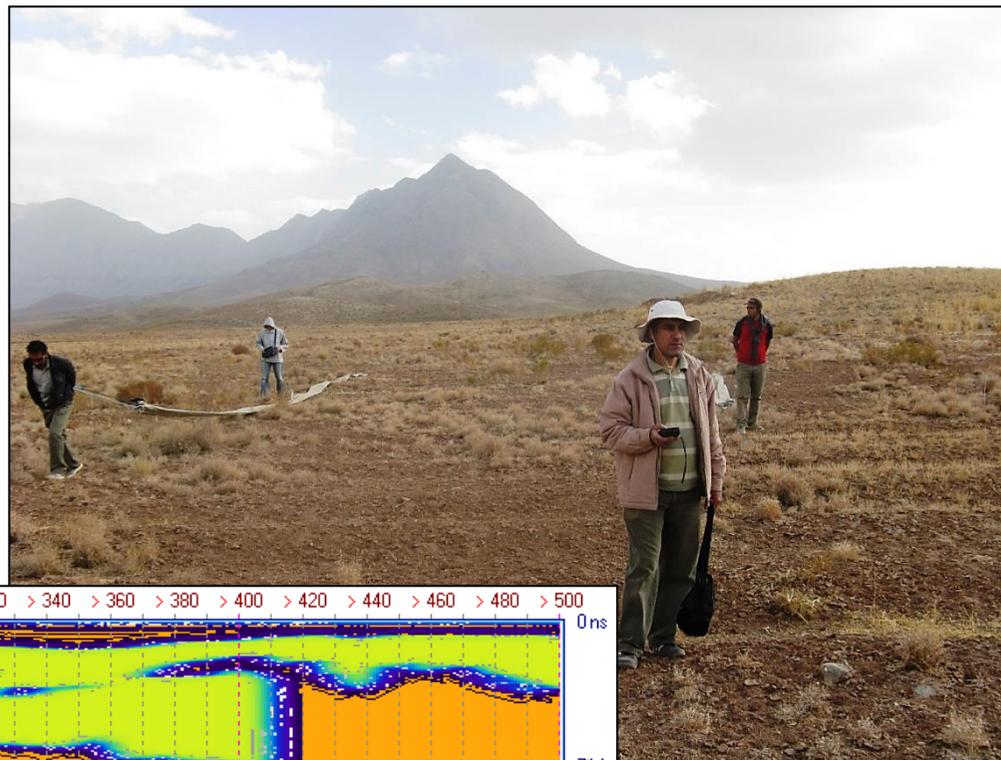
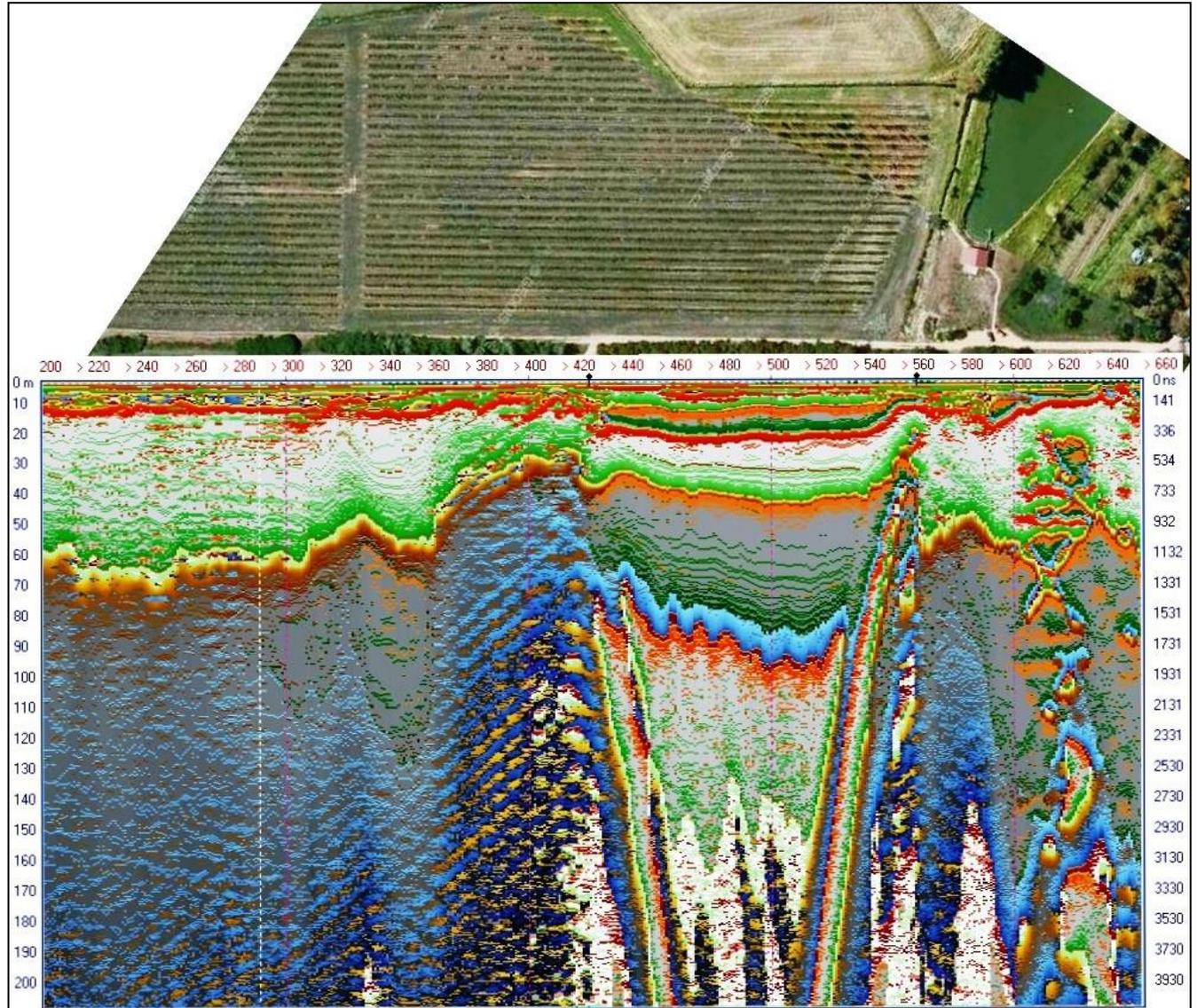


Рис. 5. Радарограмма тектонического провала (по типу грабена) и фото места работ. KDANICE, Чехия, 2014 год.



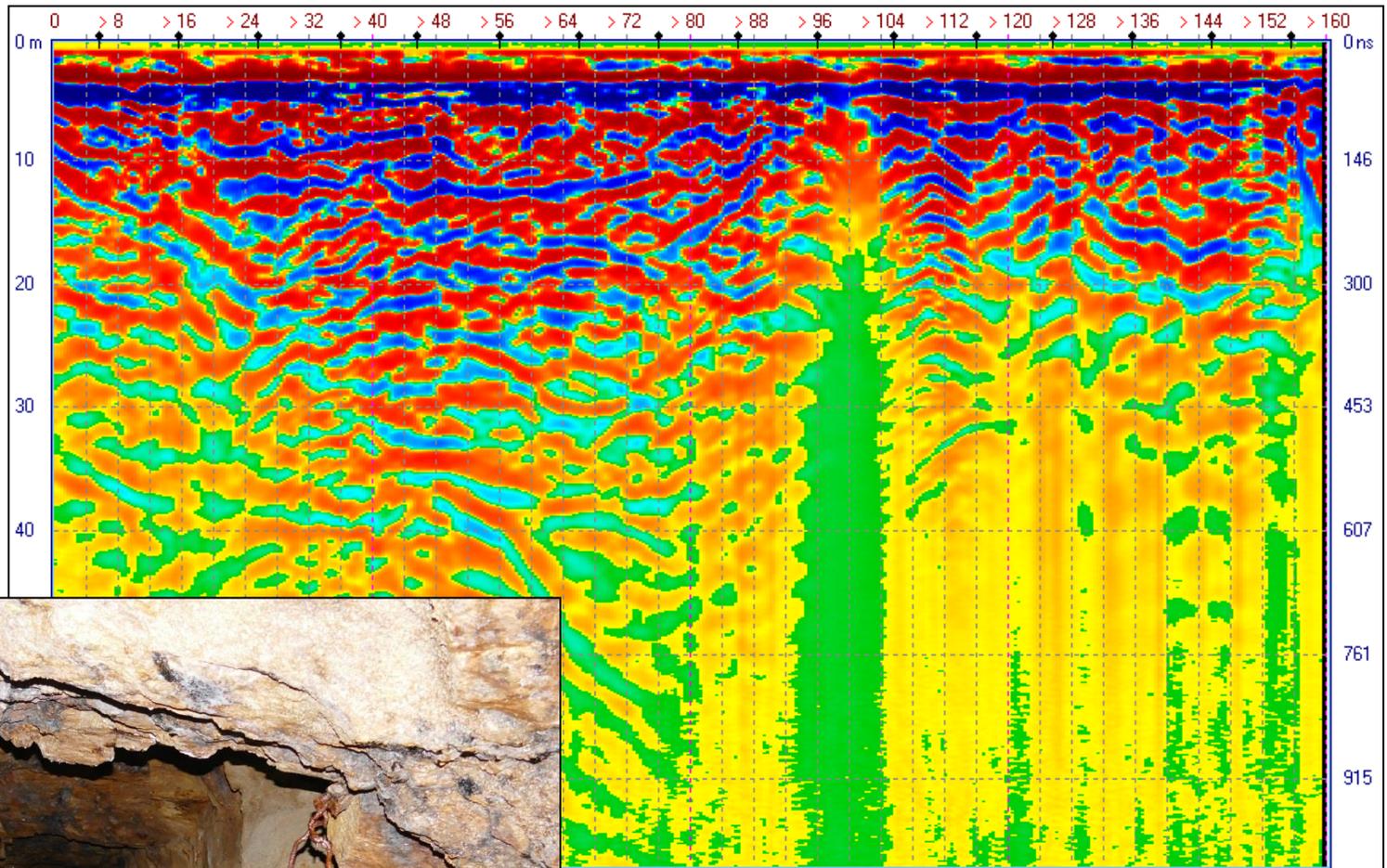
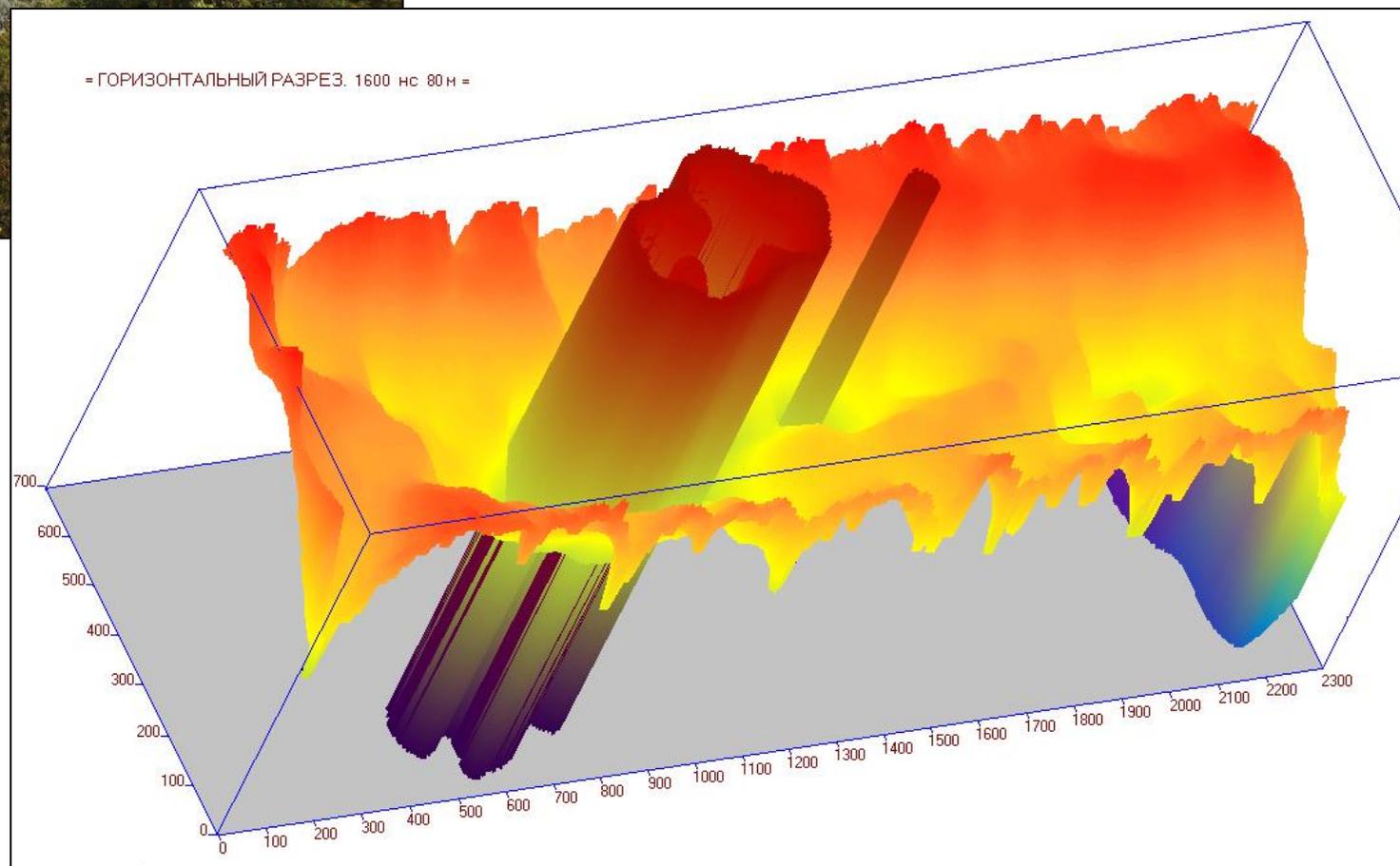


Рис. 6. Радарограмма тектонического разлома. Штольня в горе Лобо, месторождение рудного золота, Испания, сентябрь 2016 года.



Рис. 7. 3Д представление кимберлитовой трубки, восстановленное по сети параллельных георадарных профилей на площадке 0,7 x 2,3 км, Архангельская область, 2014 год.



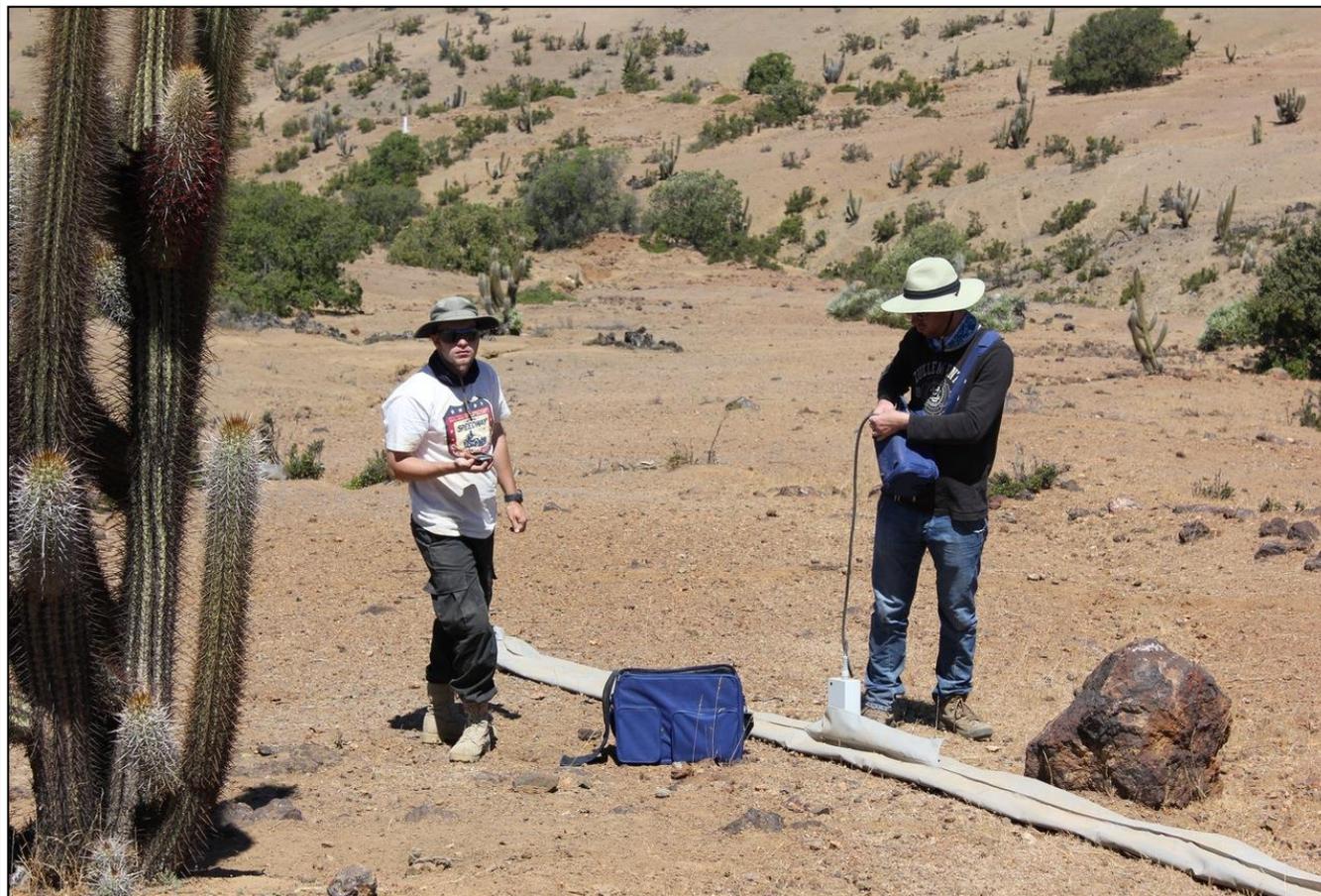
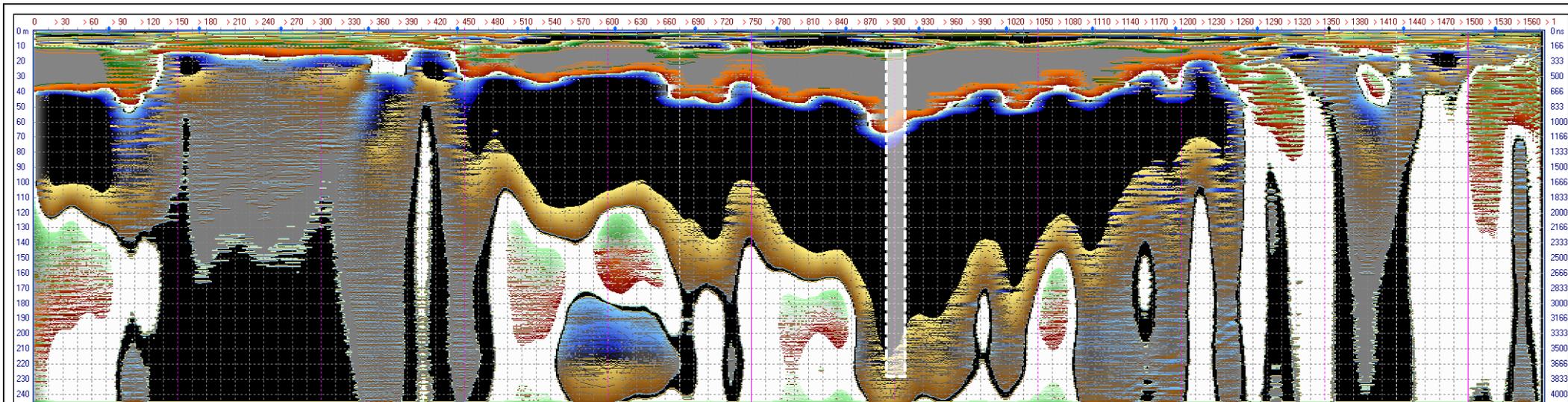


Рис. 8. Георадарная разведка горизонтов грунтовых вод, перспективных для бурения скважин в условиях Южной Америки, Сан-Николас, Чили.

Литература:

1. Berkut A.I., D.E. Edemsky, V.V. Kopeikin, P.A. Morozov, I.V. Prokopovich, A.V. Popov, **Deep penetration subsurface radar: hardware, results, interpretation.** /Proc. 9th Int. Symp. on Advanced Ground Penetrat. Radar (IWAGPR), PS-2, 3 25, Edinburgh, UK, 2017.
2. **Опыт применения георадаров серии «Лоза» при поисках перекрытых медно-золотоносных зон,** В.Я. Пчелка, А.Н. Михно, Е.Г. Мальченко, Г.Г. Фрейман, Т.Д. Мальченко, «Разведка и охрана недр» 2(43)2012, стр. 82-88.
3. **Перспективы применения инновационных технологий с использованием сверхмощных георадаров в инженерной и полевой геологии,** Морозов П.А., Ульяновцев Н.А., Бородин В.П., Инговатов А.П., «Разведка и охрана недр» (геофизика) №1, журнал Министерства природных ресурсов и экологии РФ. Москва, январь 2012 г., стр. 35-38.
4. **Низкочастотное вертикальное радарное зондирование в практике геологоразведочных работ.** В.Я. Пчелка, А.Н. Михно, Е.Г. Мальченко, Т.Д. Мальченко, Г.Г. Фрейман, “Earth sciences in Kazakhstan”, (International Geological Congress IGC – 35, South Africa, Report of Kazakhstani Geologists), pp 430-438, Almaty 2016.
5. A.I. Berkut, L.M. Krinitsky V.V. Kopeikin , P.A. Morozov, A.V. Popov, I.V. Prokopovich. **Deep Penetration Radar: Hydrogeology and Paleorelief of Underlying Medium.** 17-й Международная конференция по подповерхностной радиолокации, Рапперсвилль, Швейцария 18-21 июня 2018 года.