

## **«Принципы повышения глубины зондирования и опыт применения георадаров «Лоза»».**

**Беркут Андрей Ильич** (д.т.н., профессор, директор Компании ВНИИСМИ),

**Попов Алексей Владимирович** (д. ф.-м. н. зав. Отделом распространения радиоволн ИЗМИРАН),

**Копейкин Владимир Васильевич** (к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник Отдела распространения радиоволн ИЗМИРАН),

**Морозов Павел Анатольевич** (к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник Отдела распространения радиоволн ИЗМИРАН, зам. директора по экспериментальным работам Компании ВНИИСМИ),

**Наше знакомство с подповерхностной радиолокацией произошло в начале 90-х годов прошлого века после того, как наш коллектив стал участником проекта «Марс-94», который предполагал полет и посадку на поверхность Марса межпланетной автоматической станции.**

**В соответствии с проектом, по марсианской поверхности должен был двигаться марсоход, на борту которого должен был быть установлен наш прибор – подповерхностный радар, который позволял бы зондировать марсианскую почву на глубину до 500 метров, и определил бы на этих глубинах наличие или отсутствие льда. Это позволило бы, как задумывали разработчики проекта, приблизиться к решению проблемы «есть ли жизнь на Марсе».**

**По нашему схемному решению, накопление энергии сигнала происходит не в приемнике, а в передатчике. Такой метод накопления энергии проще по технической реализации, а конструкция легче по весу и более приспособлена к нестабильной бортовой сети. Через маломощный высоковольтный источник питания заряжается конденсатор до нескольких тысяч вольт и замыкается через разрядник на антенну.**

**Мощность передатчика в нашем случае выросла примерно в 10000 раз и составила 1 мегаватт, что позволило использовать простой и легкий приемник без накопления энергии принятого сигнала.**

**Этот, и целый ряд других схемных решений позволил сконструировать прибор с требуемыми характеристиками. Политические и экономические события начала 90-х годов в нашей стране привели к отмене проекта «Марс-94». После отмены проекта и общего ухудшения экономической обстановки в стране, встал вопрос о выживании коллектива как научного подразделения. В это время мы решили попробовать свои «марсианские» наработки в земных условиях. У нас было принципиально новое схемное решение подповерхностного радиолокатора, и следовало выяснить, будет ли оно полезным в условиях Земли.**

**Георадары серии «Лоза» основаны на схемах, разработанных в свое время для программы «Марс-94». Первые же испытания макета мощного георадара показали, что новый подход к его схемному решению не только полезен, но переводит прибор в совершенно другой класс по своим возможностям. Реальный потенциал более 120 дБ, который мы измерили экспериментально, означает, что прибор может регистрировать сигналы, уровень которых падает более чем в миллион раз. Глинистые почвы Подмосковья стали доступны георадиолокации.**

**На базе прототипа создана серийная версия – георадар «Лоза-В». Полоса частот приемника 50-300 МГц, передатчик 5 кВ, антенны от 100 до 300 МГц. Этот прибор хорошо зарекомендовал себя при решении задач инженерной геологии, коммунального хозяйства, в технологиях прокладки трубопроводов методом ГНБ, в дорожном строительстве, в строительной экспертизе, в археологии и др.**

**Для решения серьезных геологических задач, необходим георадар, который будет обладать потенциалом, обеспечивающим глубину зондирования 100 - 200 метров. Коллектив георадара Лоза разработал ряд принципов, реализация которых, позволит существенно повысить глубину зондирования:**

## 1. ПЕРЕДАТЧИК

Мощность (импульсная) передатчика должна быть доведена до практического предела, ограниченного только погодными условиями (влажностью). Для генерирования зондирующих импульсов в георадарах Лоза используется так называемый «метод ударного возбуждения». В соответствии с этим методом до определенного напряжения заряжается конденсатор, который через ключевой элемент (высоковольтный разрядник) подключается непосредственно к передающей антенне.



Характеристики передатчика (мощность и форма импульса) зависят от антенны и свойств почвы, на которой расположена антенна. Напряжение на конденсаторе – это единственный стабильный параметр, которым можно описать возможности передатчика.

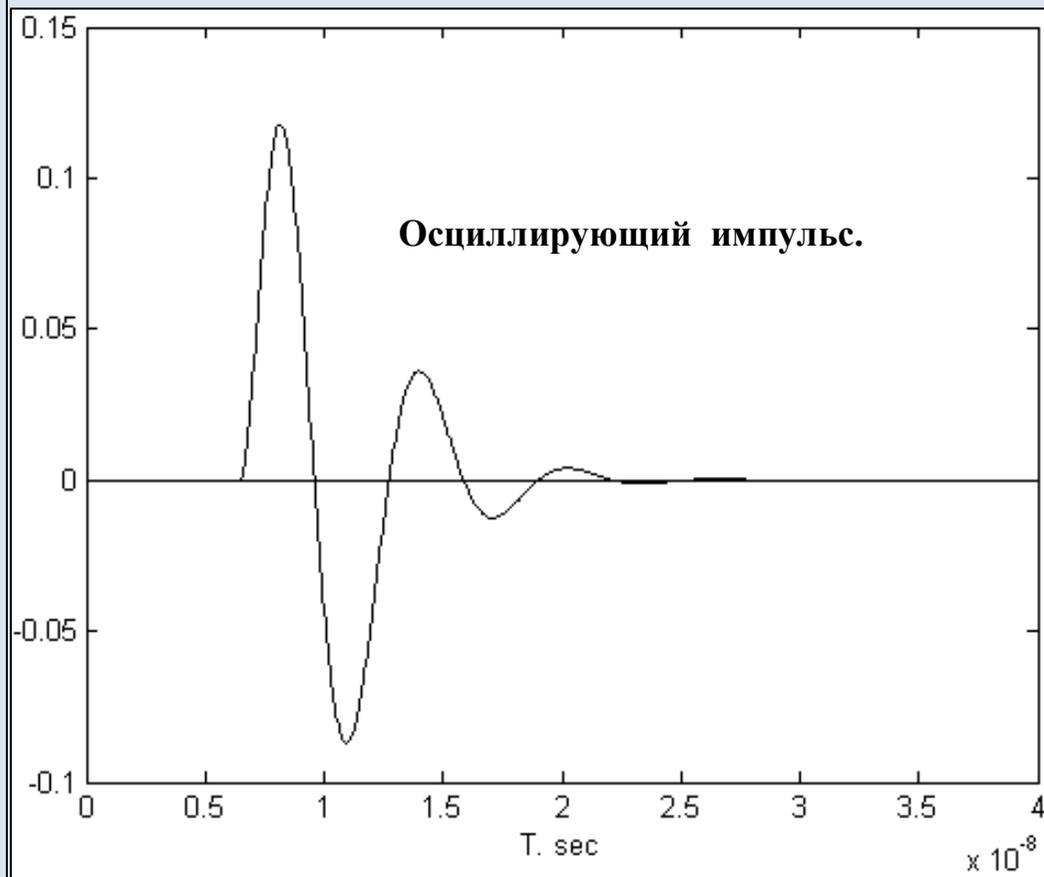
Георадар Лоза комплектуется серийными передатчиками 5, 10, 15, 21 кВ. Мощность самого «маленького» передатчика, мы оцениваем, как 1 мегаватт в импульсе. Эти передатчики работают у наших пользователей, практически в любую погоду. Проходят полевые испытания лабораторные образцы передатчиков 30 кВ, 50 кВ и 100 кВ. Эти приборы, рекомендуется использовать в сухую или морозную погоду.

## 2. АНТЕННЫ

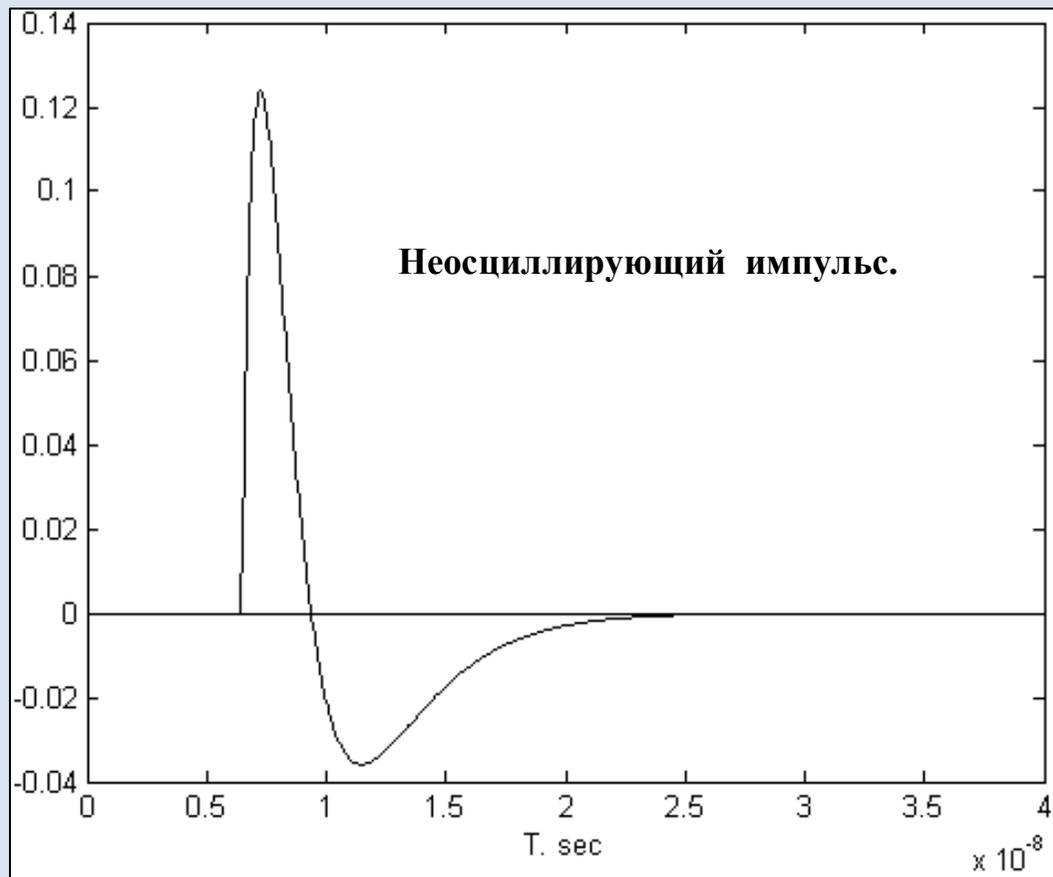
Для реализации потенциала мощных передатчиков, передающая антенна (так же как и приемная) должны иметь нерезонансный характер. Все антенны георадара Лоза построены по схеме Ву-Кинга. В конструкцию антенн введена дополнительная искусственная диссипация энергии. Между элементами антенны введены сопротивления. Размеры единичных элементов антенн и номиналы сопротивлений между элементами рассчитываются по формулам Ву-Кинга.



### 3. Форма зондирующего импульса.



Форма зондирующего георадарного импульса с использованием антенн с осциллирующей импульсной характеристикой (например, антенн, типа «бабочка»).



Форма зондирующего импульса георадаров Лоза с использованием резистивнонагруженных антенн (антенн «Ву-Кинга»).

### 3. Диапазон рабочих частот.

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 выше частота, тем выше затухание сигнала.

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).

Все антенны имеют конструкцию резистивнонагруженных полуволновых диполей.

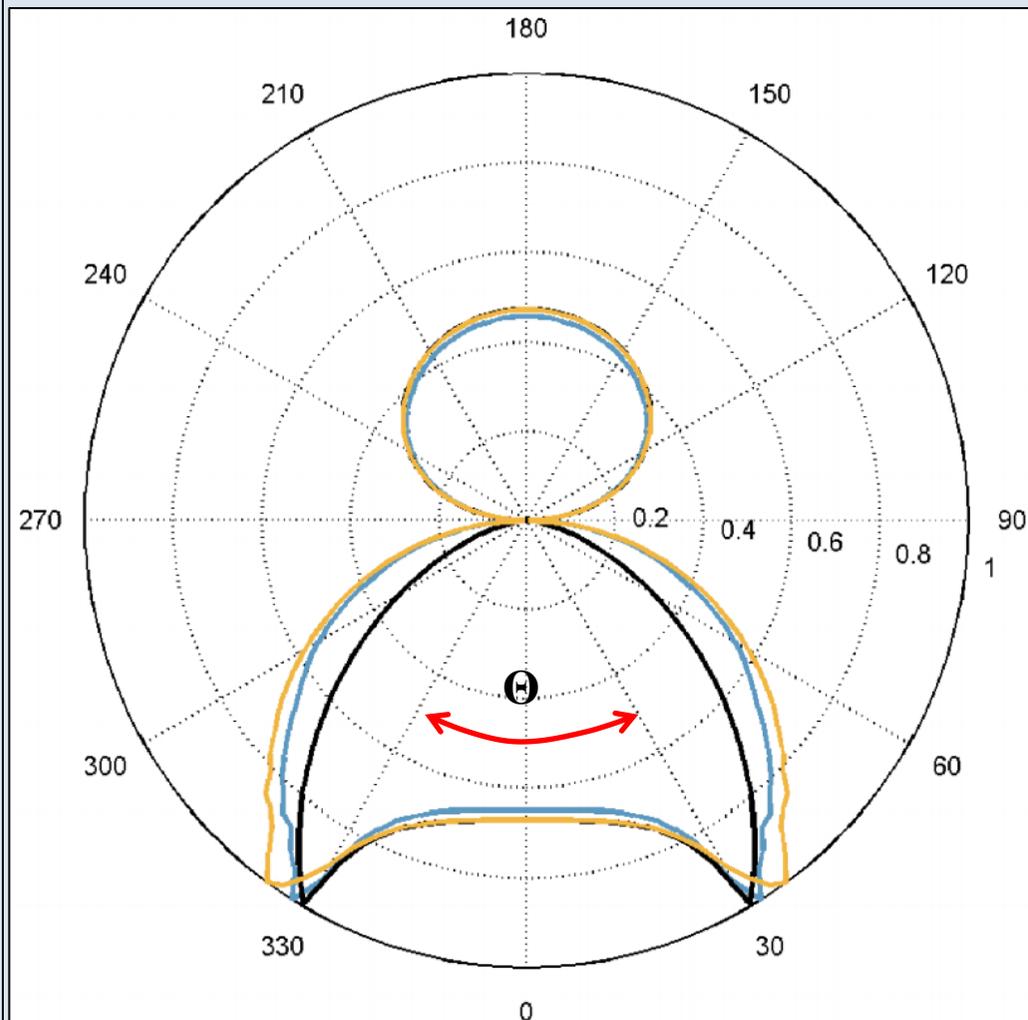


#### 4. Оцифровка сигнала.

Для замыкания цикла подповерхностного зондирования с помощью сверх мощных передатчиков и низкочастотных антенн необходимо без потерь оцифровать сигнал с динамическим диапазоном более 120 дБ и частотой дискретизации 0,5 - 1 ГГц. В георадаре Лоза регистрируется 256 уровней амплитуды с помощью быстродействующих компараторов. Изменяя ослабление на аттенюаторах перед группой параллельных компараторов, и многократно повторяя измерения, приемник георадара Лоза получает 256 пороговое представление волновой формы сигнала. Значения ослабления входного сигнала (начиная с «0») устанавливаются процессором в логарифмическом масштабе. Эти значения ослабления соответствуют уровням порогов, которые по результатам измерений восстанавливают волновую форму сигнала.



## 5. Факторы среды.



На результаты георадарного зондирования большое влияние оказывают параметры среды. Диаграмма направленности линейных антенн в большой степени определяется средой (грунтом) на котором размещены антенны. Только при размещении антенн георадара (линейных электрических диполей) на поверхности (границе) раздела двух сред формируется диаграмма направленности излучения ориентированная в сторону среды с большой диэлектрической проницаемостью. По оценкам [3, 4], в нижнюю полусферу (в грунт) излучается в  $n^2$  раз больше, чем вверх (в воздух), (где  $n$  - показатель преломления)

Свойства среды влияют и на угол конуса диаграммы направленности. Чем выше диэлектрическая проницаемость нижней среды, тем уже диаграмма направленности, и тем больше энергии излучается в нижнюю полусферу (в грунт). Угол диаграммы направленности в нижнюю полусферу можно оценить как:

$$\Theta = \arccos(1/n) = \arccos(1/\sqrt{\epsilon});$$

где:  $n$  - показателем преломления;

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

Для случая суглинка средней влажности диаметр сечения пятна диаграммы направленности на глубине 5-6 метров будет составлять 0,3 – 0,6 метра (в зависимости от конкретных условий среды).

**Все, перечисленные выше принципы возможного повышения глубинности георадарных исследований реализованы аппаратно и методически в современных моделях георадара Лоза-Н. Приведу примеры результатов глубинных георадарных обследований. Это подборка наиболее ярких радарограмм, на которых обследуемые геологические объекты предстают достаточно узнаваемо без какой либо обработки.**

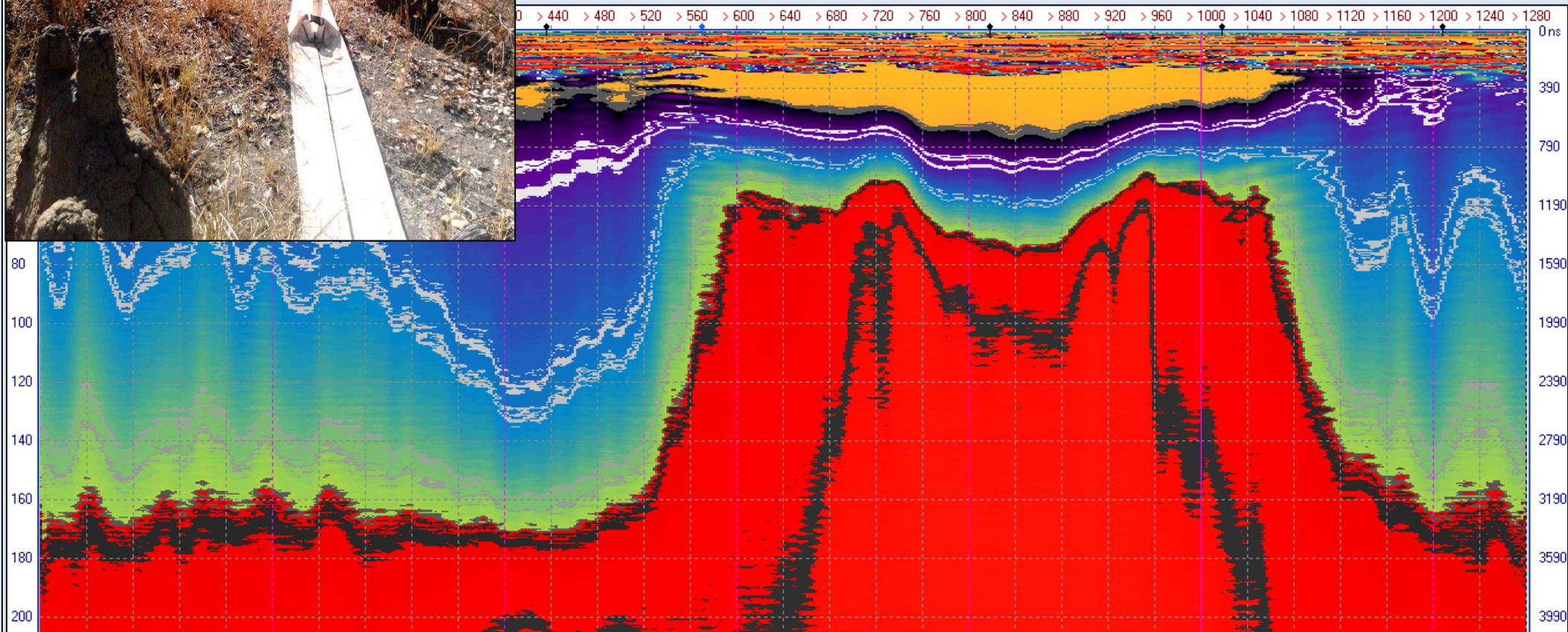
**Значения амплитуды и фазы на радарограмме передаются палитрой цветов. Условно принято, что максимальные значения амплитуды «плюсовой» поляризации отражаются тонами красного цвета, а максимальные значения амплитуды «минусовой» поляризации отражаются тонами синего и тёмно-синего цвета. Значения амплитуды 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 радарограмме позволяют наглядно отразить весь динамический диапазон амплитуд и фаз зондирующего сигнала. Геофизический смысл имеют только границы зон различных оттенков цвета и порядок изменения цвета.**

**Совокупность линий и границ, образованных на радарограмме зонами с различными оттенками цвета представляют собой радиообраз геологической структуры, полученный с помощью электромагнитных зондирующих сигналов.**

**Для выделения малококонтрастных границ и слабых сигналов нами применяется метод «Выделения амплитуды». С помощью этого алгоритма можно один из группы оттенков (например, один из 10-15 оттенков красного, трудно различимых глазом), заменить на контрастный оттенок. Эта замена тона автоматически произойдет по всей радарограмме, и новый контрастный тон будет присвоен всем участкам, имеющим выбранное значение амплитуды. В результате такой обработки отдельные контрастные тона, как изолинии амплитуды, будут выделять тонкую структуру отраженного сигнала.**



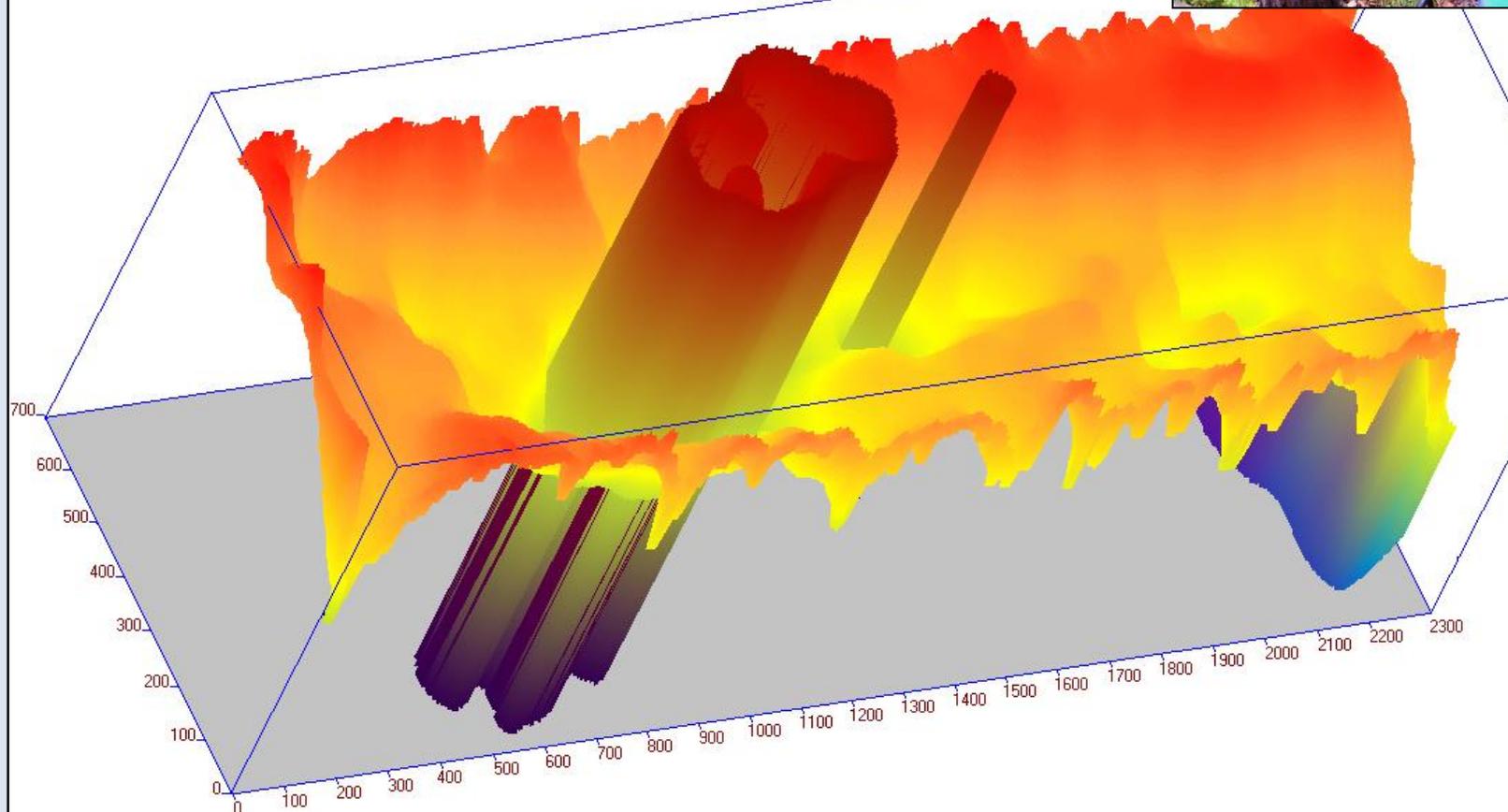
*Кимберлитовая трубка, Австралия, сентябрь 2016 года.*

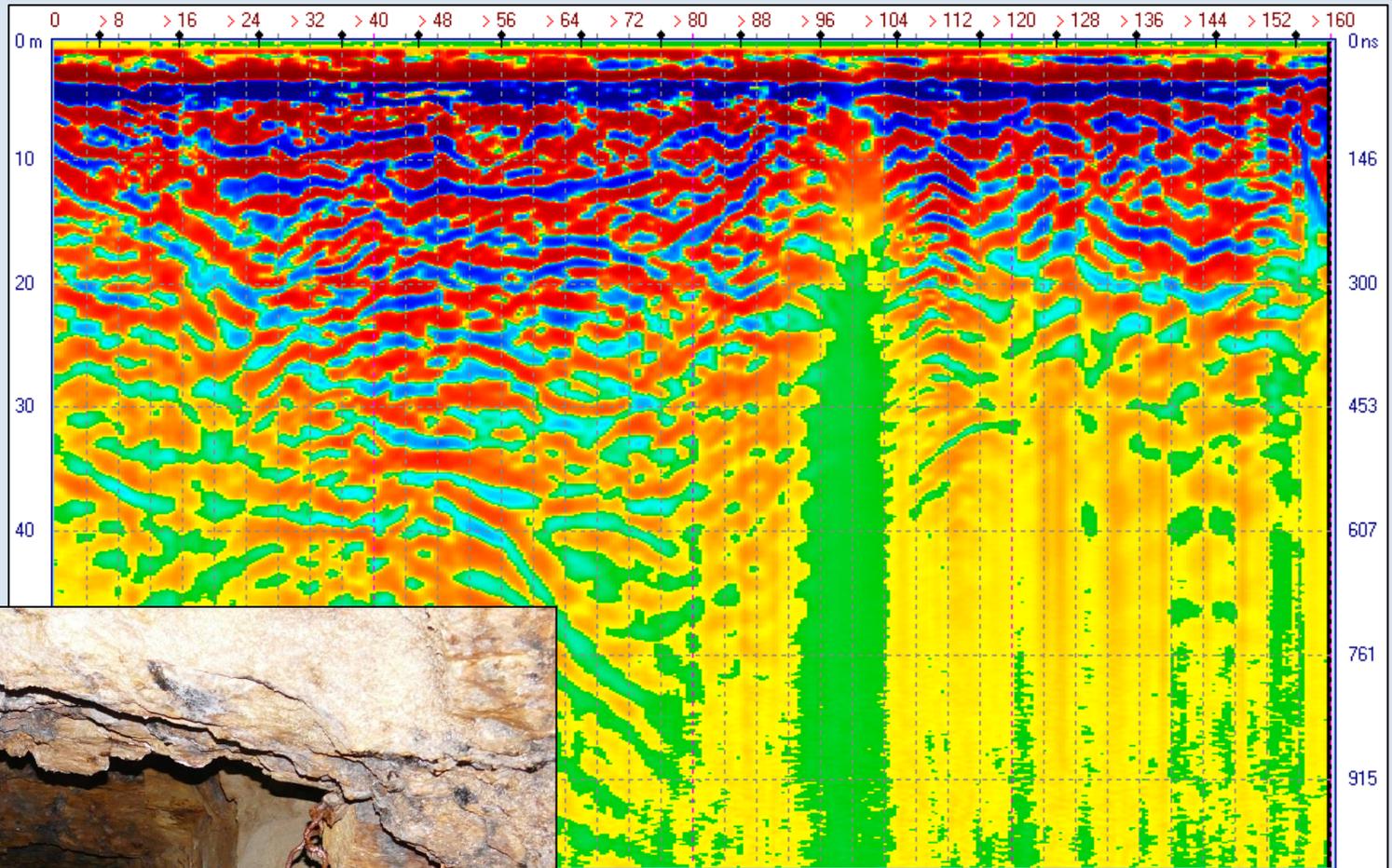


*Георадарная разведка кимберлитовой трубки  
(Архангельская область), 2014 год.*

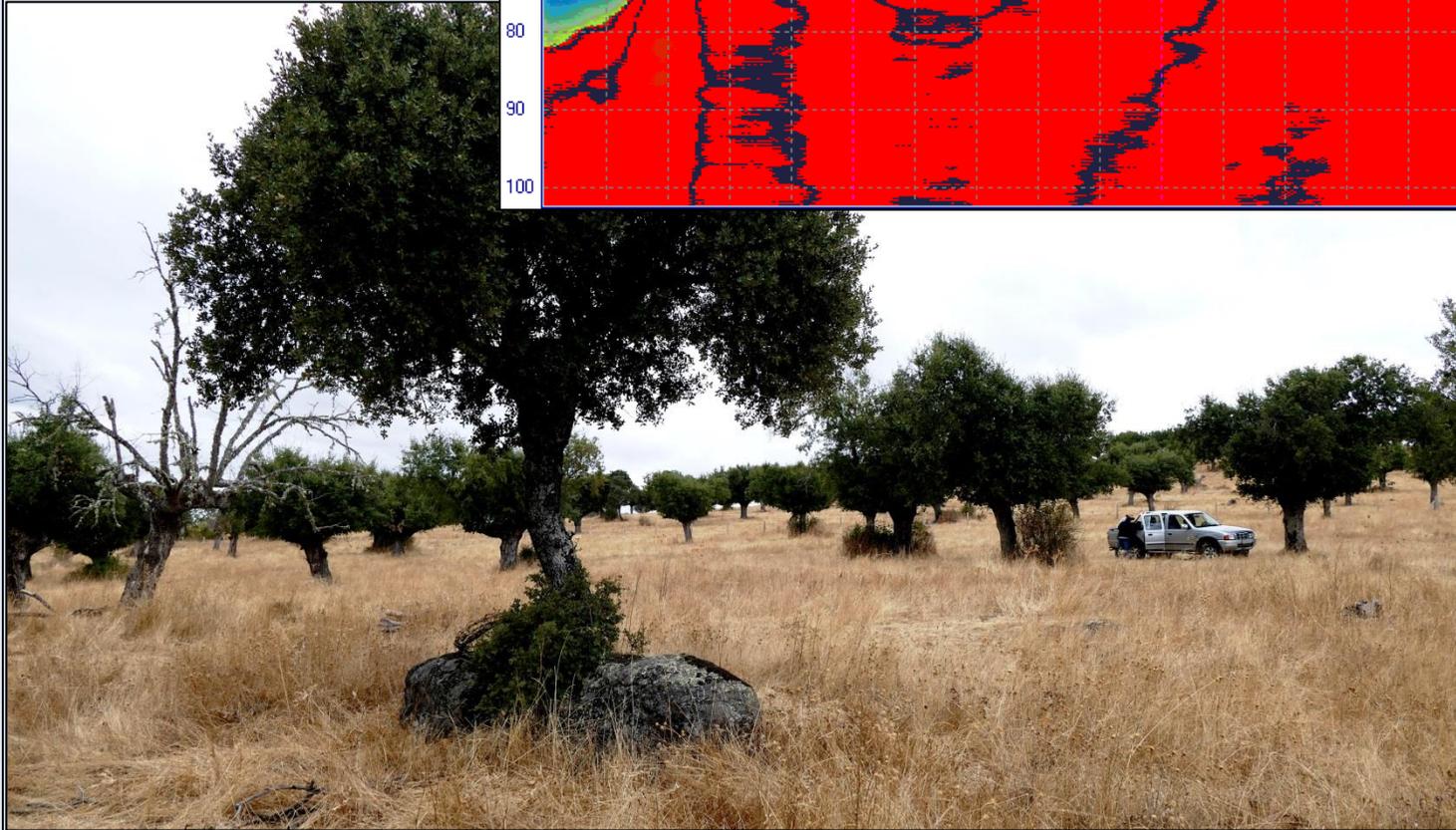
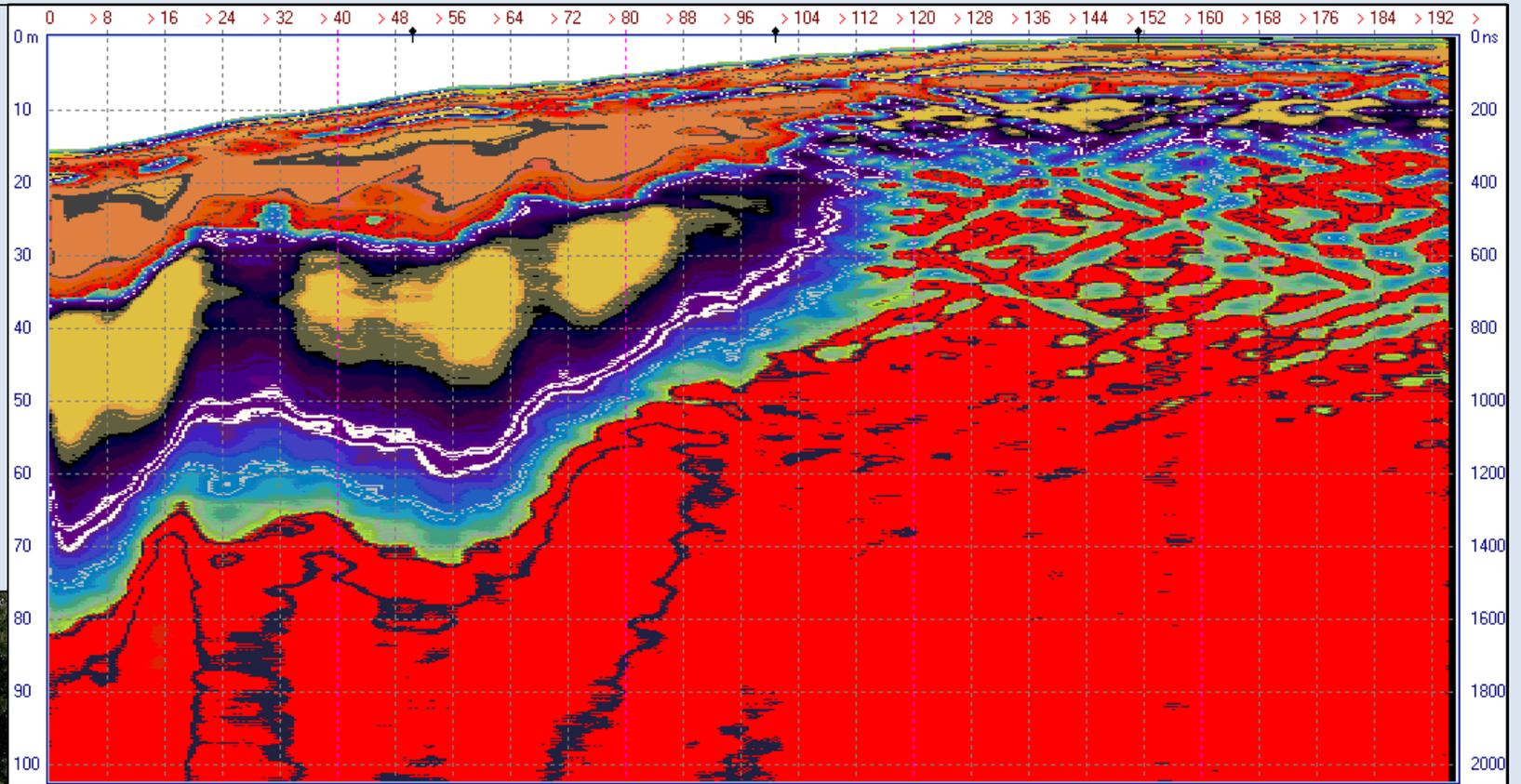


= ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ. 1600 нс 80 м =



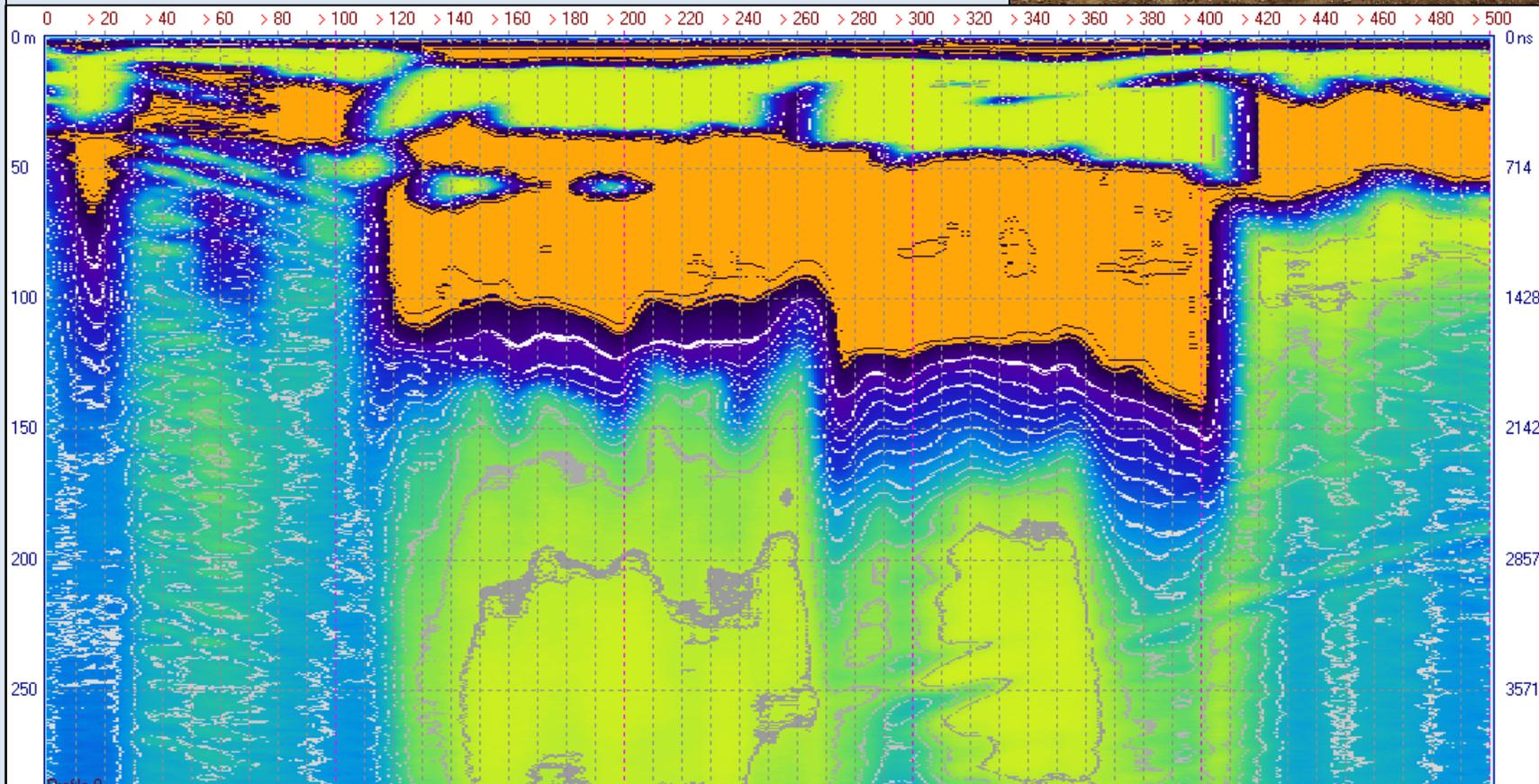
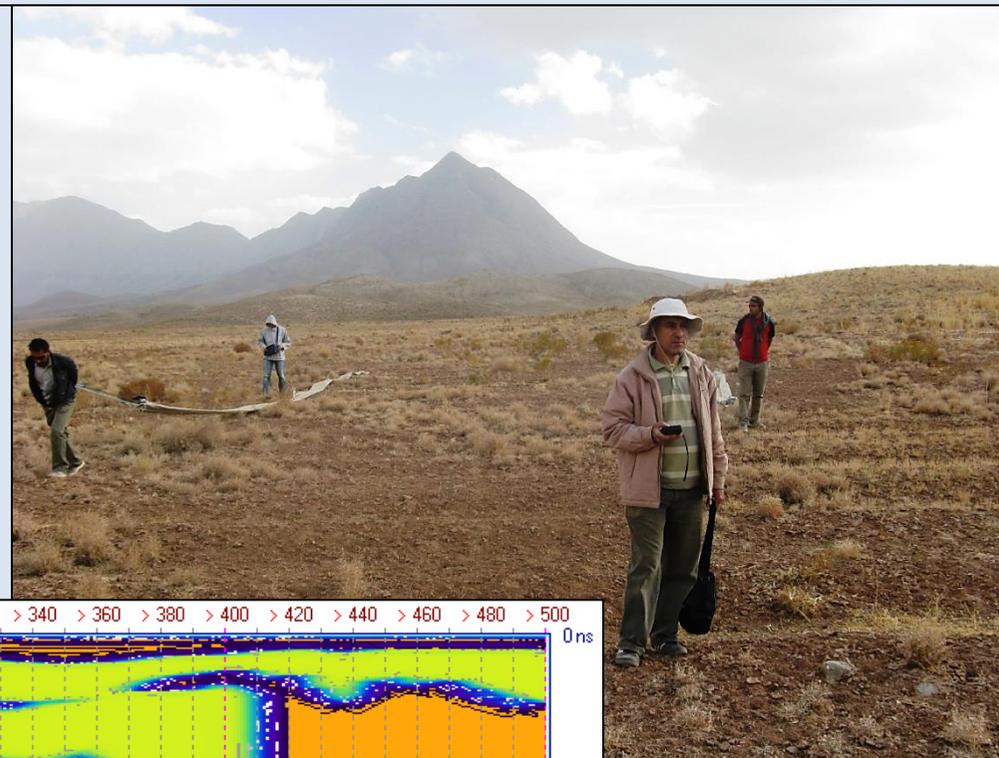


*Штольня в горе Лобо, месторождение рудного золота, Испания, сентябрь 2016 года.*



*Месторождение урана,  
полигон фирмы Беркли,  
Испания, сентябрь 2016 года.*

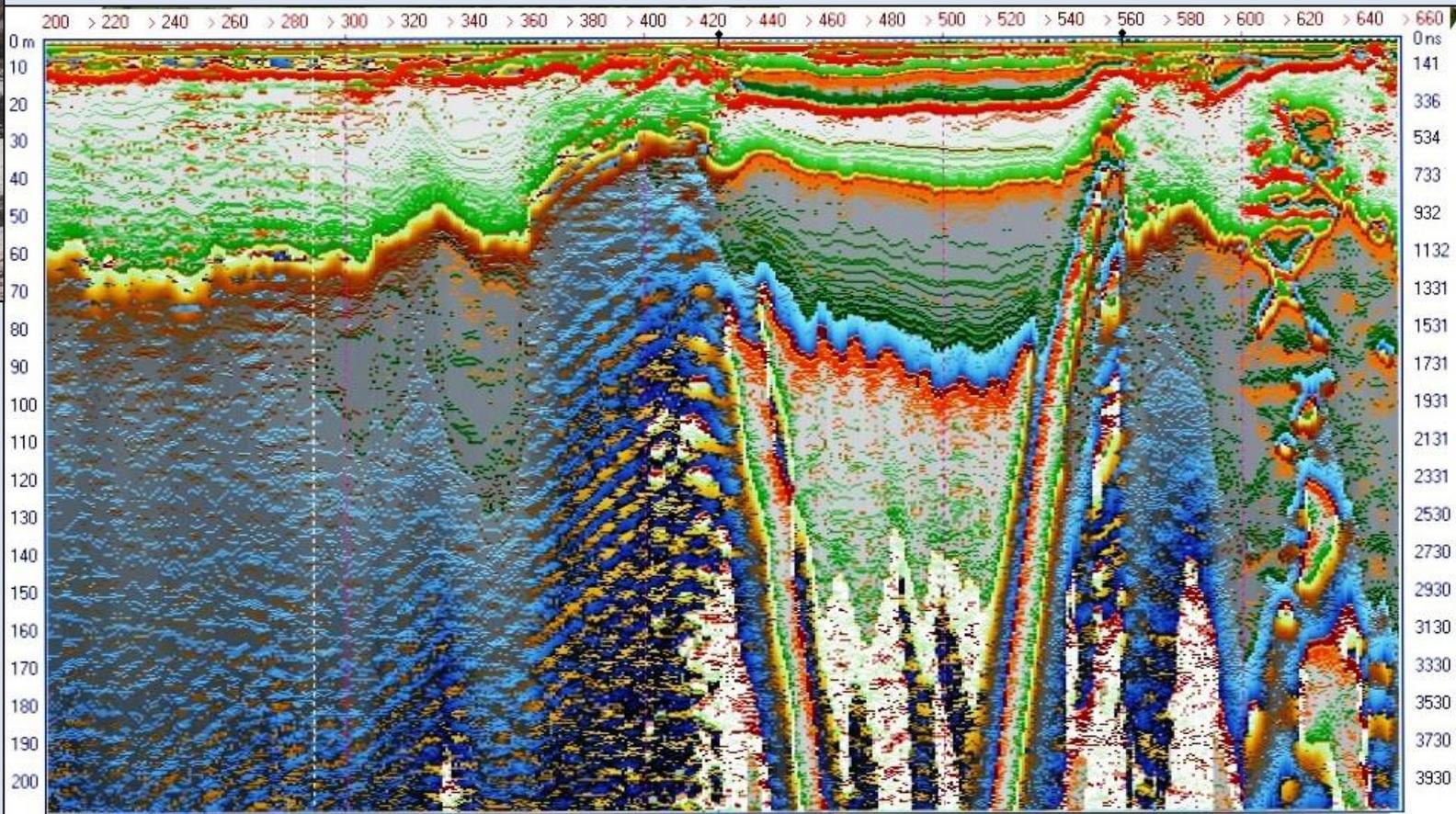
*Тектонический блоковый провал,  
грабен. Иран. 2012 год.*

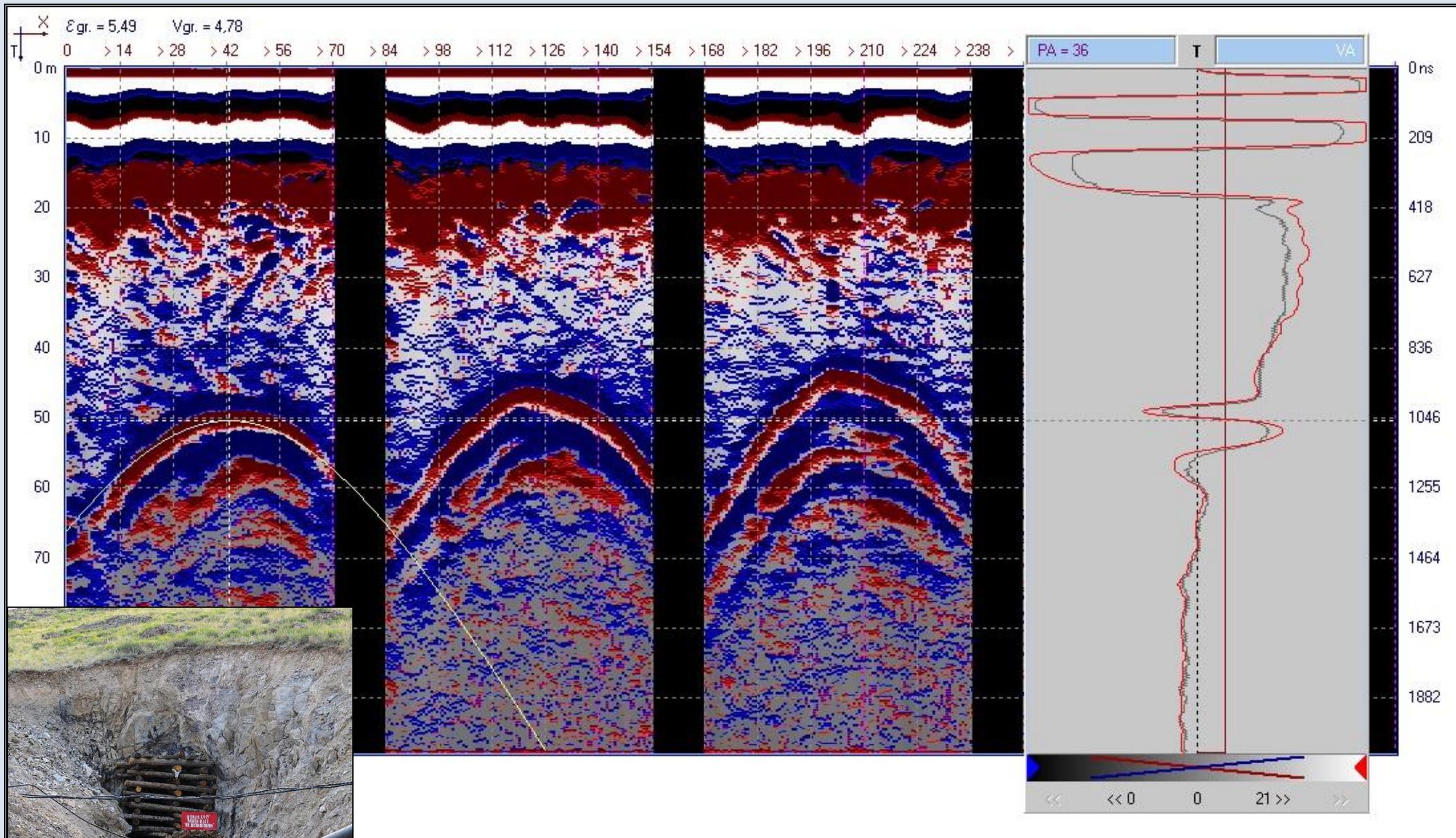


0 ns  
714  
1428  
2142  
2857  
3571



*Карстовый провал, Kdanice, Чехия.  
2012 год.*

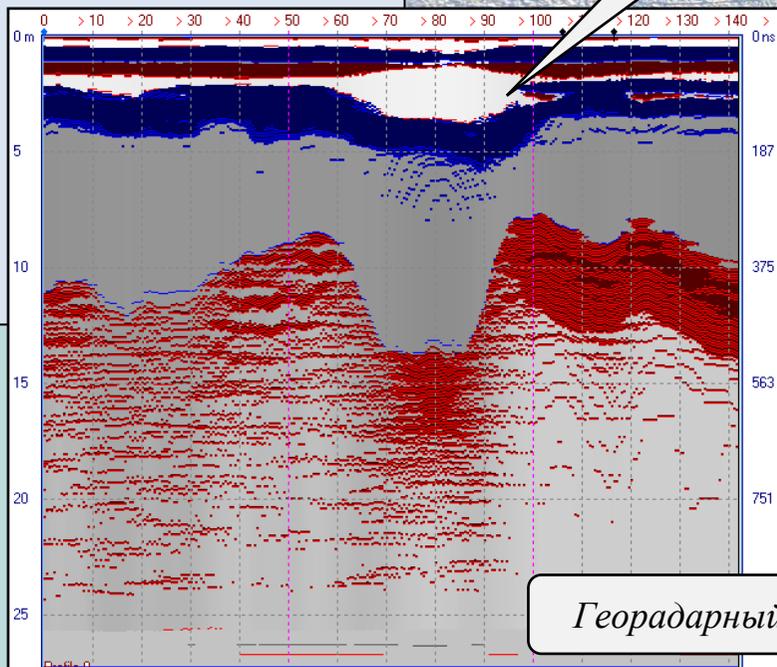




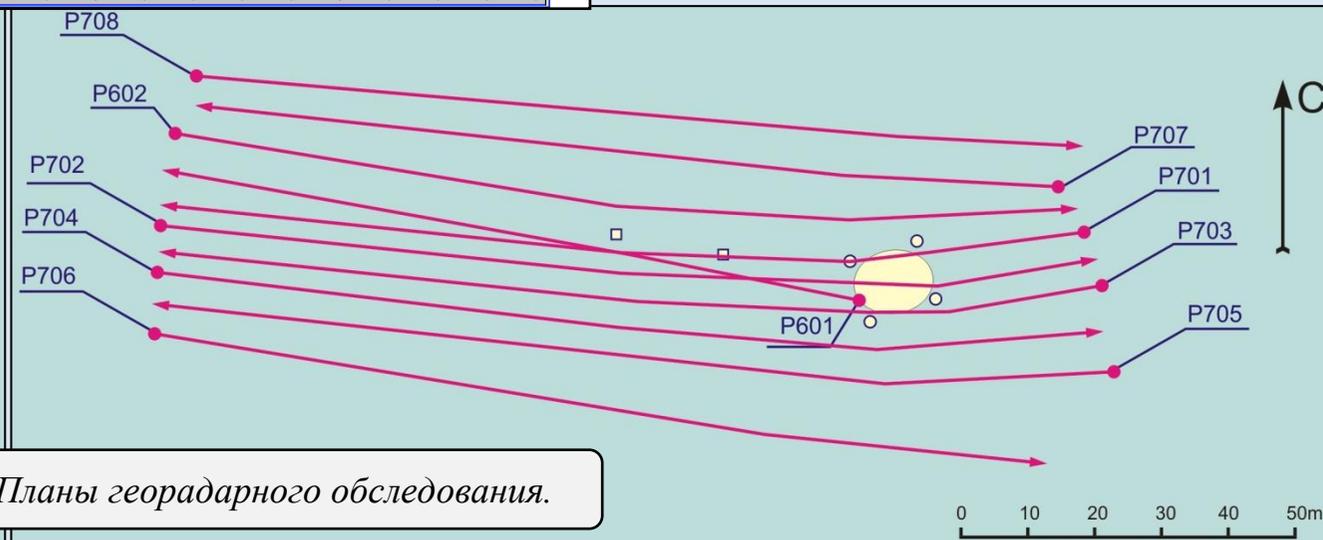
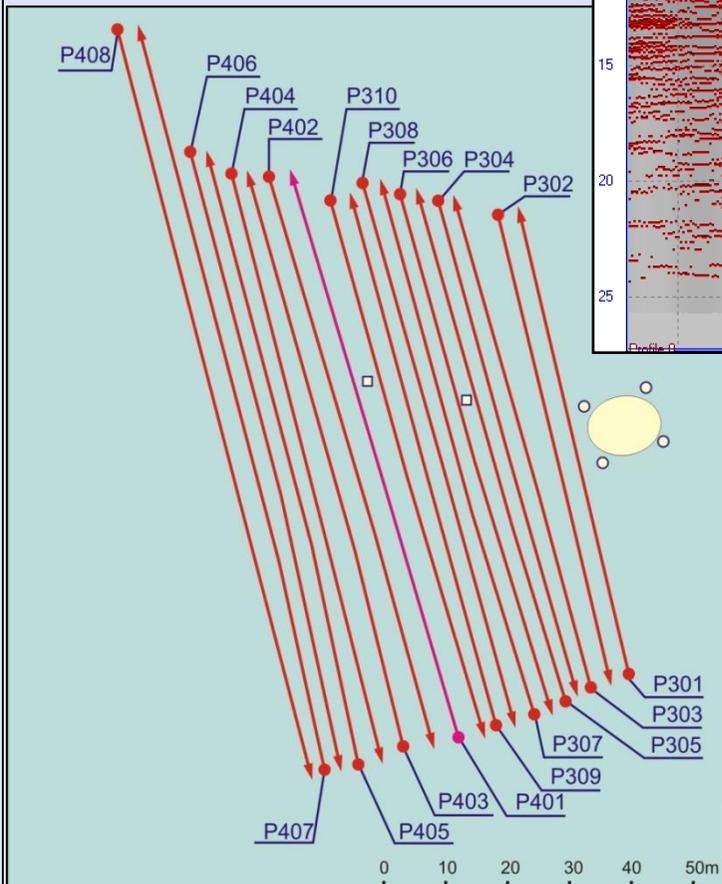
*Заброшенные штольни  
 в горном массиве Дегелен в Казахстане*

*Результаты георадарного обследования  
места падения фрагмента метеорита  
Челябинск в озеро Чебаркуль.*

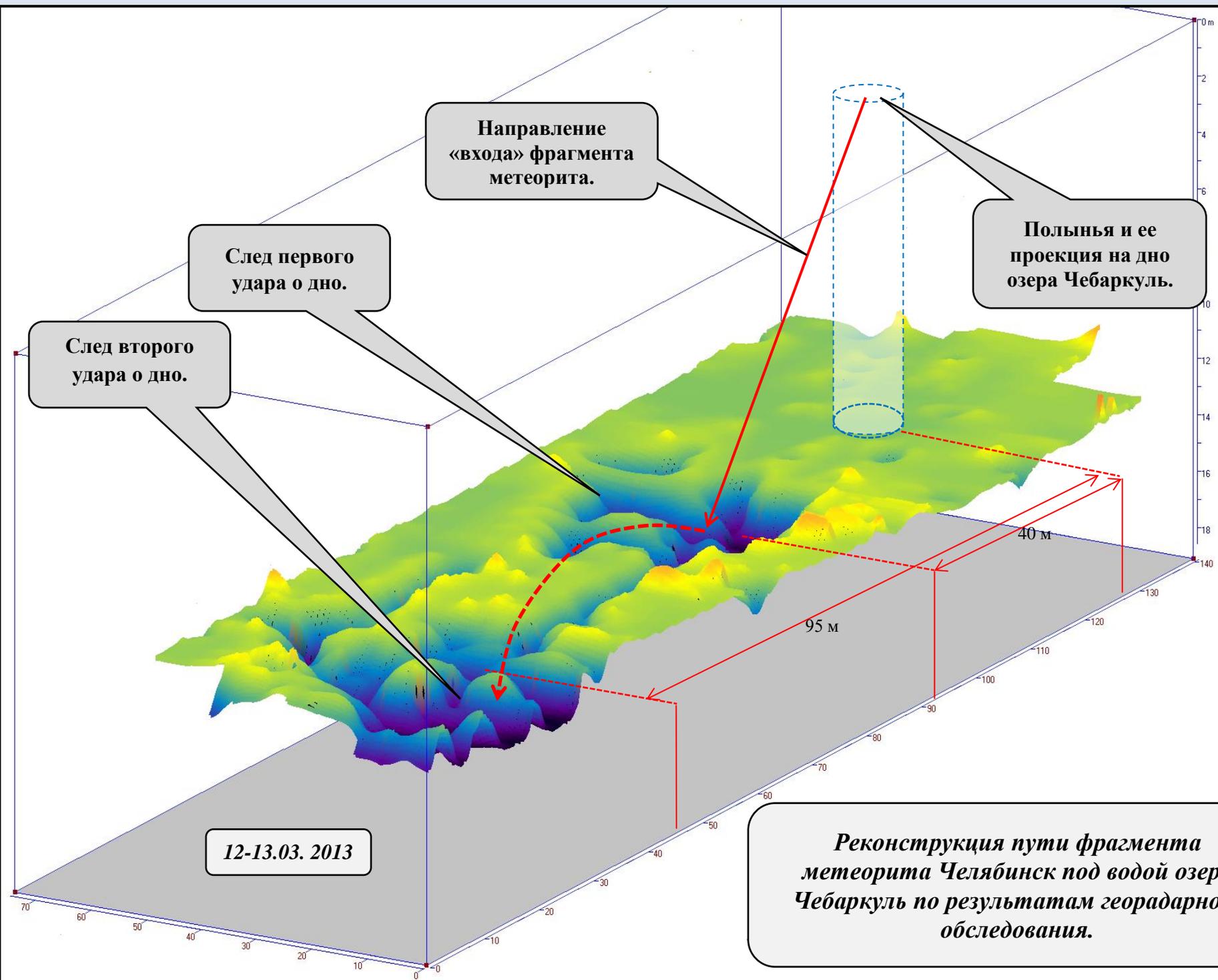
*Лед, захваченный  
метеоритом.*



*Георадарный разрез по линии P702.*



*Планы георадарного обследования.*



Направление  
«входа» фрагмента  
метеорита.

След первого  
удара о дно.

След второго  
удара о дно.

Полынья и ее  
проекция на дно  
озера Чебаркуль.

12-13.03. 2013

*Реконструкция пути фрагмента  
метеорита Челябинск под водой озера  
Чебаркуль по результатам георадарного  
обследования.*

## Литература:

1. **«Перспективы применения георадаров для исследования процессов карстообразования и оползней»**, Morozov P.A., Volkov V.A., Kopeikin V.V., «Potential of the use of superpower radars to study karst formation and landslide processes», **«Разведка и охрана недр»** №7 (геофизика), журнал Министерства природных ресурсов и экологии РФ. Москва, июль 2012, стр. 47-51.
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. N. Engheta and C. N. Papas, **Interface Extinction and Subsurface Peaking of the Radiation Pattern of a Line Source**, Applied Physics, B 26, 231-238 (1981).
5. Alexei Popov, **Georadar development at IZMIRAN and mathematical aspects of subsurface radio probing**, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow region, Russia.
6. **Георадарное обследование места падения Чебаркульского фрагмента метеорита «Челябинск»**. Копейкин В.В., В.А. Алексеев, В.Д. Кузнецов, П.А. Морозов, А.В. Попов, В.Б. Бузин, С.А. Гудошников, В.С. Скомаровский, А.И. Беркут, С.В. Меркулов; Доклад на международной конференции «Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль», г. Чебаркуль, июнь 2013.
7. **«Георадарное обследование предполагаемого места падения фрагмента метеорита Челябинск в озеро Чебаркуль»**, В.В. Копейкин, В.Д. Кузнецов, П.А. Морозов, А.В. Попов, А.И. Беркут, С.В. Меркулов, В.А. Алексеев. Геохимия, № 7, с. 636-642, 2013.
8. **«Георадарное обследование места падения фрагмента метеорита Челябинск»**, В.В. Копейкин, В.Д. Кузнецов, П.А. Морозов, А.В. Попов, А.И. Беркут, С.В. Меркулов, В.А. Алексеев. Сборник Всероссийской научной конференции «Метеорит Челябинск – год на Земле», с. 286-293, Челябинск, февраль 2014.