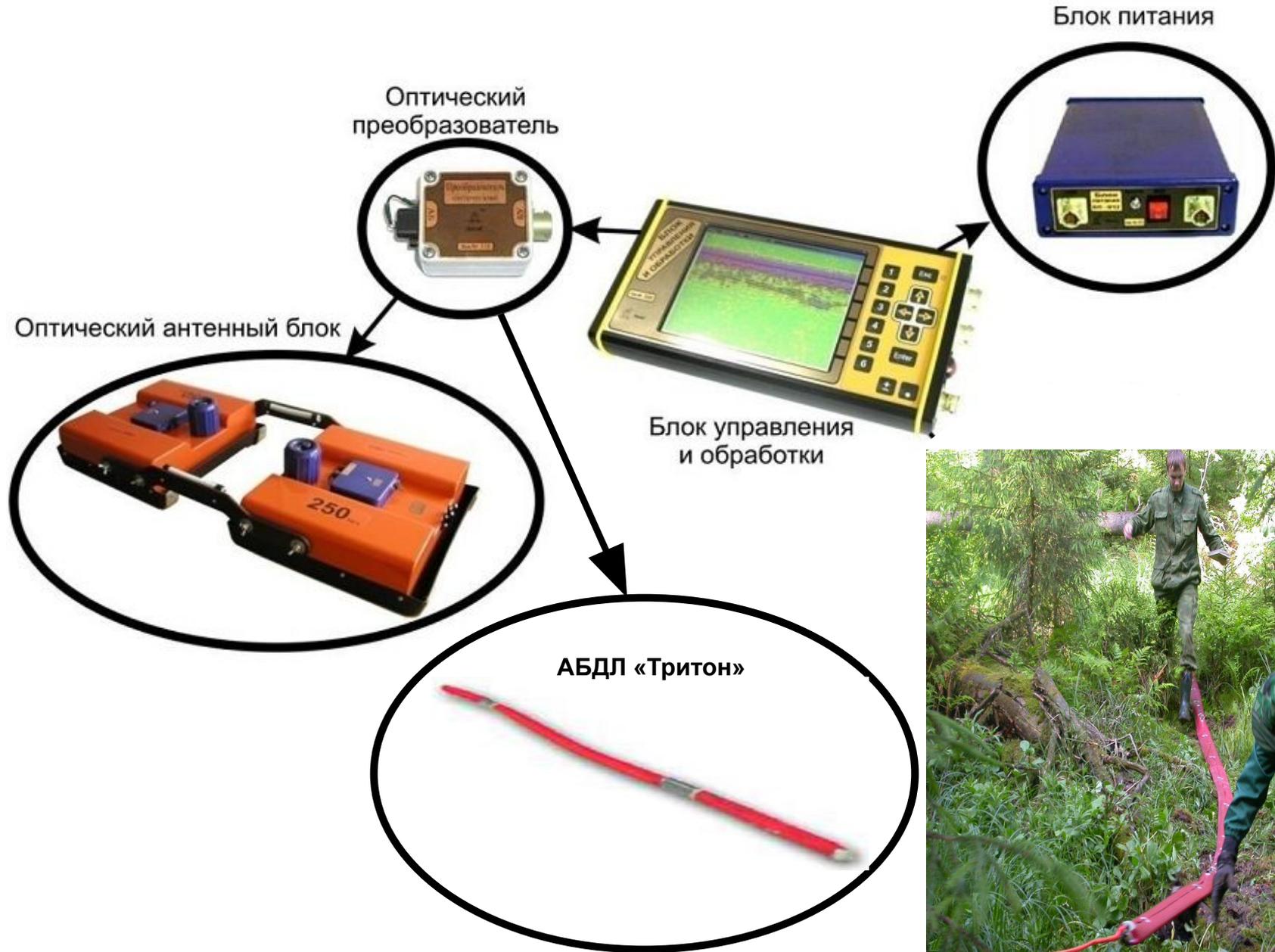
A photograph of several researchers in a forest. In the foreground, a person in a dark hooded jacket is partially visible on the left. Next to them, a person in a dark jacket and a white cap is looking down at something in their hands. In the background, another person in a green jacket is standing and looking at a notebook. The forest floor is covered with green ferns and other vegetation. The text is overlaid in the bottom right corner.

**ПОДПОВЕРХНОСТНОЕ
ГЕОРАДАРНОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ В
ЛАНДШАФТНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Геоэкологические задачи, решаемые с помощью георадара (GPR - "Ground Penetrating Radar") :

- а) картирование геологических структур – восстановление геометрии относительно протяженных границ, поверхности коренных пород под рыхлыми осадками, уровня грунтовых вод, границ слоев с различным водонасыщением, поиск месторождений строительных материалов;
- б) определение свойств различных отложений (влажности) по скорости распространения электромагнитных волн, опираясь на связь этих свойств с диэлектрической проницаемостью пород;
- в) определение толщины ледяного покрова;
- г) определение мощности водного слоя и картирование поддонных отложений;
- д) определение мощности зоны сезонного промерзания или оттаивания, картирование границ мерзлых и талых пород;
- е) определение уровня грунтовых вод, карстовых провалов и воронок, места подхода к поверхности грунтовых вод и обнаружение «подземных» карстовых рек.
- ж) обнаружение и регистрация инженерно-технических, геотехнических систем и антропогенных объектов (трубопроводы, высоковольтные кабели и др.)

Схема георадара с блоком управления и обработки

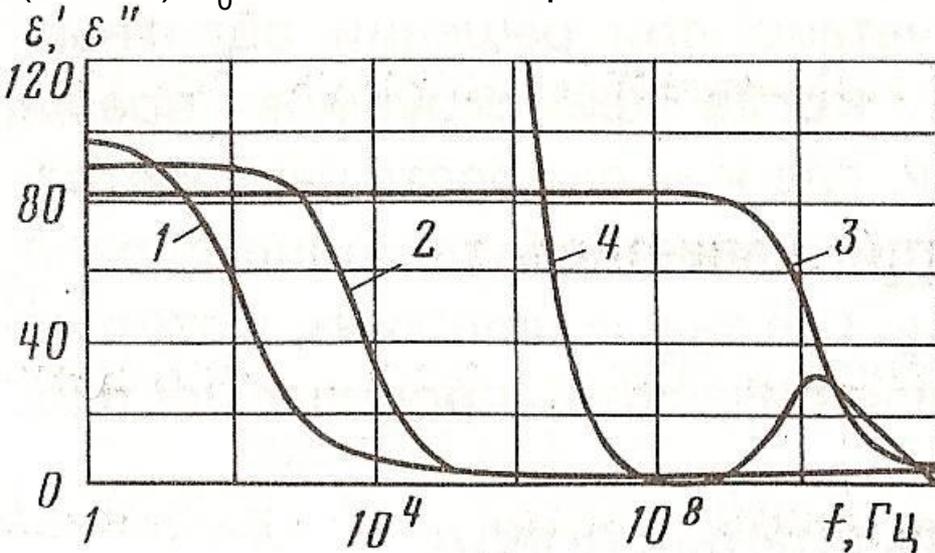


Скорость распространения электромагнитных волн, v м·с⁻¹,
 определяется комплексной диэлектрической проницаемостью, $\varepsilon^*(f) = \varepsilon'(f) - j\varepsilon''(f)$

$$v(f) = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'(f)\mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}{2}}}$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(f) + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f \varepsilon_0}}{\varepsilon'(f)}$$

c - скорость электромагнитных волн в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м·с⁻¹); f - частота электромагнитного поля (Гц);
 $\tan \delta$ характеризует диэлектрические потери; μ_r - относительная магнитная проницаемость (в вакууме равна 1); σ_{dc} - конечная проводимость постоянного тока потерь в диэлектрике, (См·м⁻¹), ε_0 - абсолютная проницаемость в вакууме ($8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹)



Частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости льда и воды.

1 - ε' лед, -40°C ; 2 - ε' лед, -1°C ; 3 - ε' вода 25°C ; 4 - ε'' вода 25°C

[Финкельштейн и др., 1986]

В **GPR** используют полосы частот от **10 МГц до 1 ГГц**, в интервале которых мнимая часть $\varepsilon''(f)$ мала, по сравнению с реальной частью $\varepsilon'(f)$ и многие почвы не показывают релаксацию диэлектрической проницаемости.

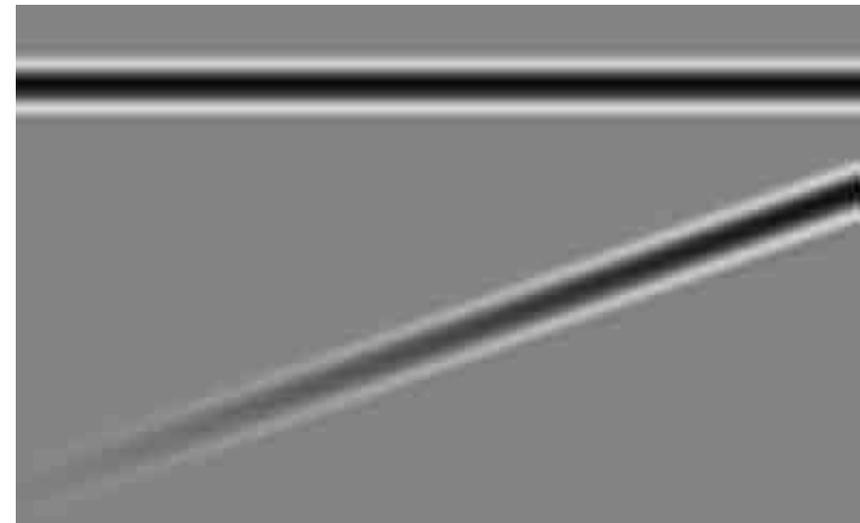
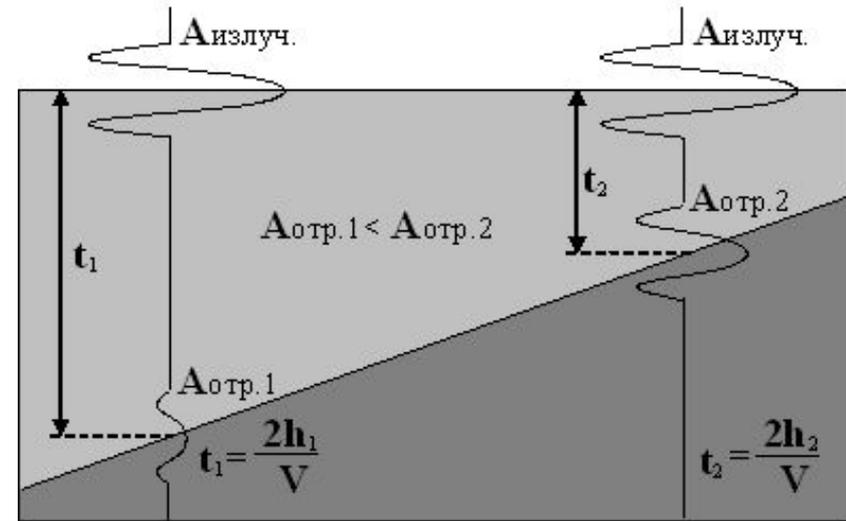
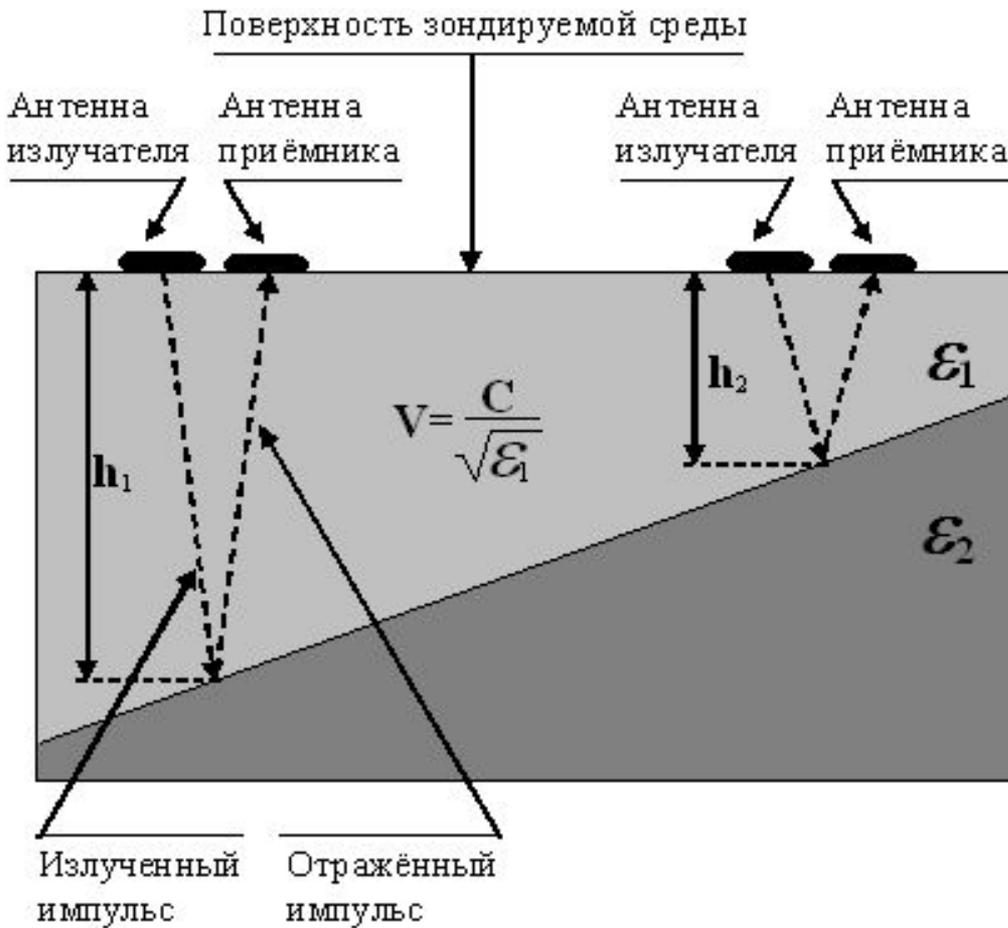
В этих условиях для незасоленных почв, уравнение (1) сводится

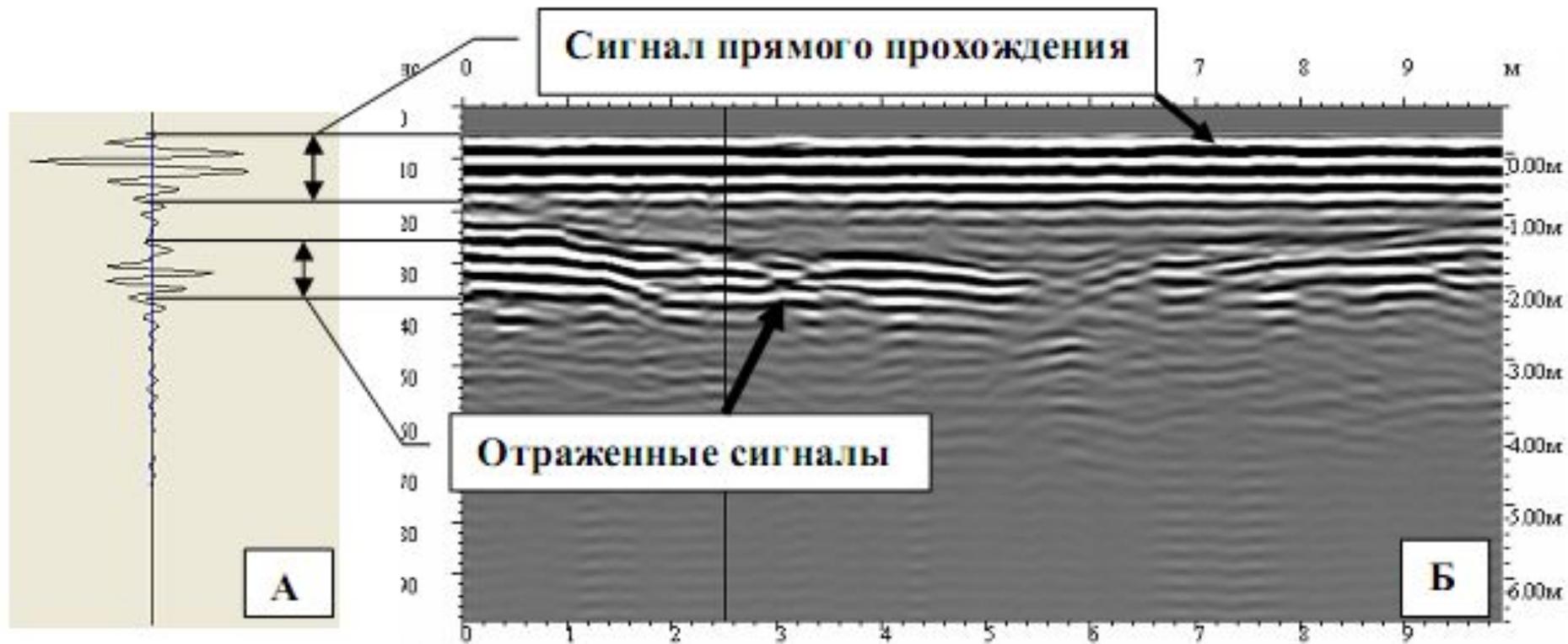
$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}$$

Зависимость диэлектрической проницаемости от гранулометрического состава и влажности грунта

Состав среды	Диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_{\text{отн.}}$)	Скорость волны, см/нс
Воздух	1	30
Лёд	3	17
Культурный слой	5,3	13
Суглинок с гравием	5,3	13
Песок	6	12
Пески гравелистые с глиной	7,4	11
Глины	16	7,5
Песок водонасыщенный	25	6
Вода	81	3,3

Образование отражённой электромагнитной волны от наклонной границы раздела сред с разными диэлектрическими проницаемостями ϵ (V -скорость импульса в верхнем слое, C - скорость света в вакууме)

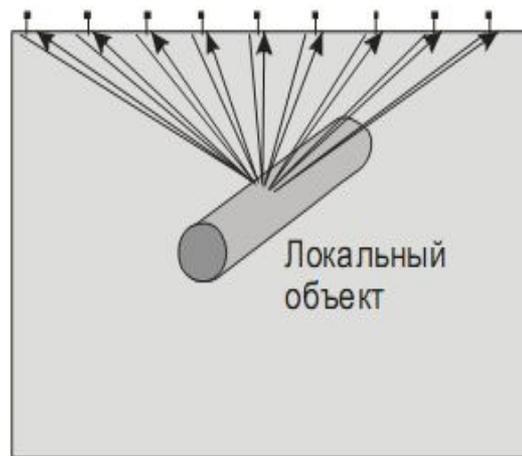




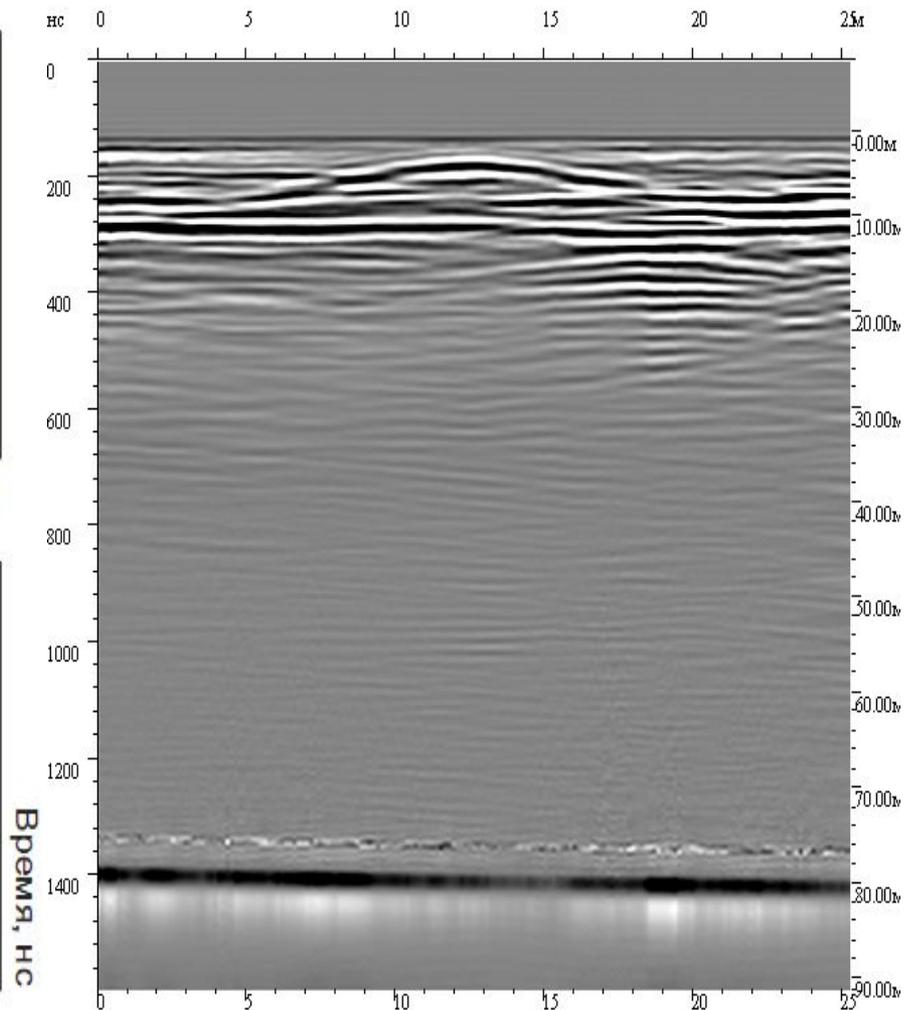
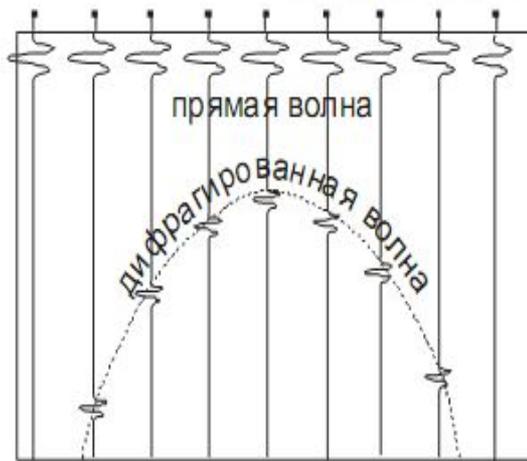
В среду излучаются короткие сверхширокополосные электромагнитные импульсы, имеющие 1,0-2,0 периода квазигармонического сигнала (А – визирка трассы, сигнал прямого прохождения).

Отраженные импульсы от границ неоднородностей, на которых скачкообразно изменяются электрические свойства (электропроводность и диэлектрическая проницаемость) принимаются антенной, усиливаются, преобразуются в цифровой вид, обрабатываются в ЭВМ и визуализируется на мониторе (Б – радарограмма).

Формирование дифрагированной волны от локального объекта и измерение диэлектрической проницаемости отложений



Расстояние, м



Сигналы, отраженные от трубы газопровода

Сигналы отраженные от границы слоев

По гиперболе отраженного от трубы сигнала вычисляется реальный средний для слоя $\epsilon = 6.0$

1. Профилирования на постоянной базе

излучающую и приемную антенны с постоянным разнесом (в сантиметры для высоких частот и в первые метры для низких частот) перемещают вблизи поверхности или непосредственно по поверхности земли.

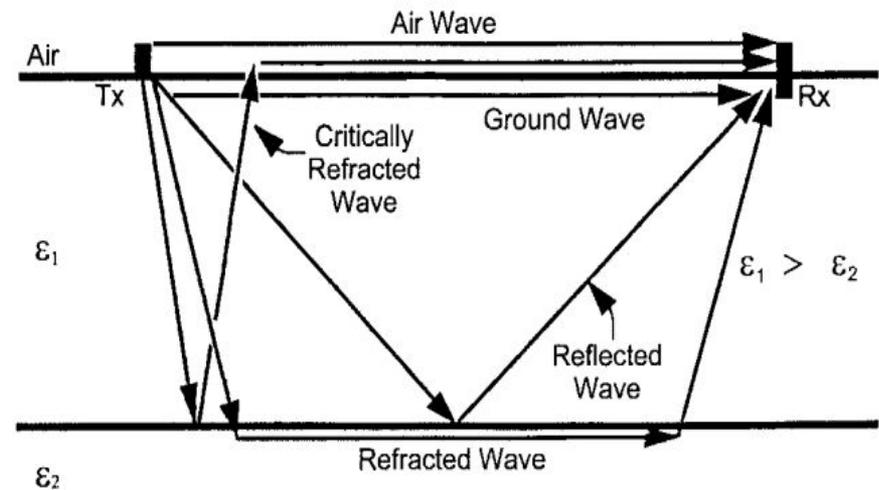
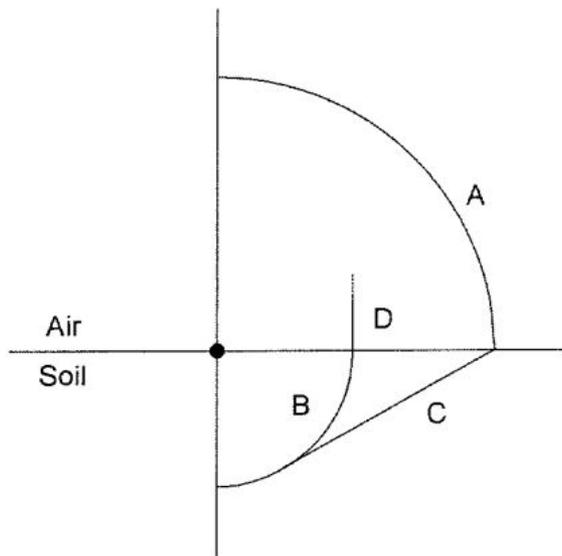


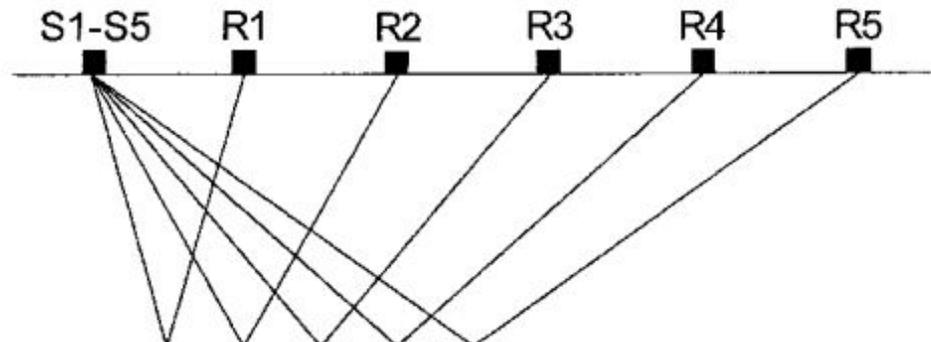
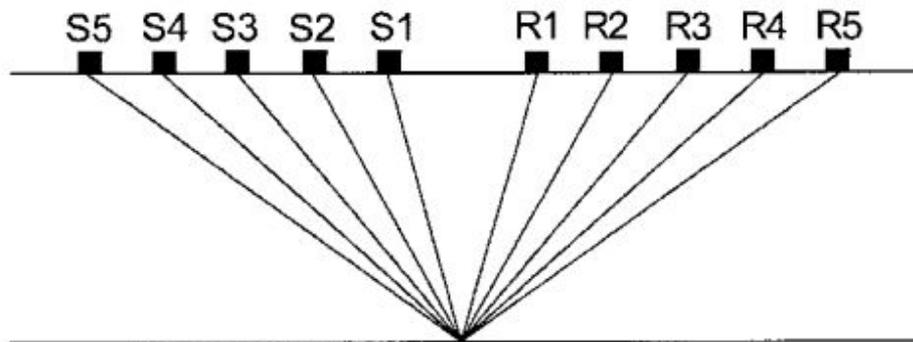
Схема волновых фронтов вокруг дипольного источника на поверхности почвы (слева) и путей распространения электромагнитных волн в почве с двумя контрастными по диэлектрическими свойствами слоями (справа)

2. Методы с последовательным увеличением разноса между антеннами

(От десятков сантиметров до 5 – 10 м). Цель - получение зависимости времени прихода отраженных волн от расстояния между антеннами (годографа) и скорости распространения волн в среде. Используются два метода:

- **метод общей глубинной точки**
(МОГТ, англ. Common-MidPoint – CMP), позволяет определить скорости волн и пересчитать разрез из масштаба времен в масштаб глубин без привлечения априорной информации;

- **метод расширения угла отражения и преломления** (англ. Wide Angle Reflection and Refraction – WARR)



$$v_{\text{soil}} = \frac{2\sqrt{d^2 + (0.5a)^2}}{t_{\text{rw}}}$$

t_{rw} - время двустороннего прохождения отраженной волны, которое был скорректировано на нулевое время;
 d - глубина грунтовых вод; a - разнесение антенны

Взаимосвязь влажности почв с диэлектрической проницаемостью почв

Первая эмпирическая формула связи θ и ε для минеральных почв, имеющих различные текстуры [Topp et al., (1980)]:

$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3$$

Более обоснована в диэлектрических моделях смешанных сред, общая диэлектрическая проницаемость в системе почва - вода - воздух, ε_b ,

$$\varepsilon_b = \left[\theta \varepsilon_w^\alpha + (1 - n) \varepsilon_s^\alpha + (n - \theta) \varepsilon_a^\alpha \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

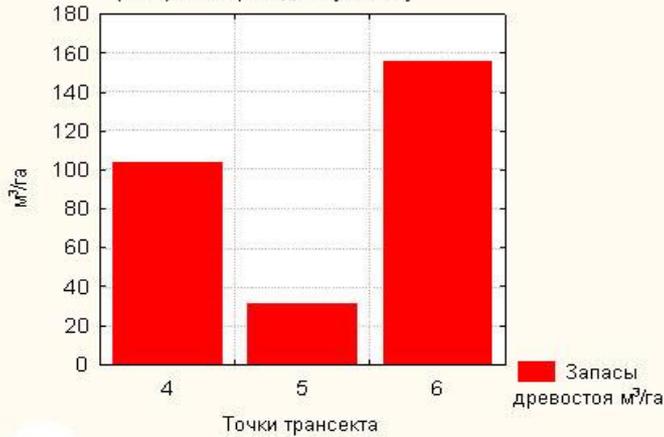
n (m^3m^{-3}) – пористость почвы; ε_w , ε_s и ε_a – диэлектрические проницаемости воды, частиц почвы и воздуха, соответственно, и α – фактор составляющей ориентации электрического поля по отношению к геометрии среды ($\alpha=1$ для электрического поля, параллельного слоям почвы, $\alpha=-1$ для электрического поля, перпендикулярного слоям почвы и $\alpha=0,5$ для изотропной среды).

$$\theta = \frac{\varepsilon_b^\alpha - (1 - n) \varepsilon_s^\alpha - n \varepsilon_a^\alpha}{\varepsilon_w^\alpha - \varepsilon_a^\alpha} \quad \Rightarrow \quad \theta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_w} - 1} \sqrt{\varepsilon_b} - \frac{(1 - n) \sqrt{\varepsilon_s} - n}{\sqrt{\varepsilon_w} - 1} \quad \Rightarrow$$

$$\theta = a \sqrt{\varepsilon_b} - b$$

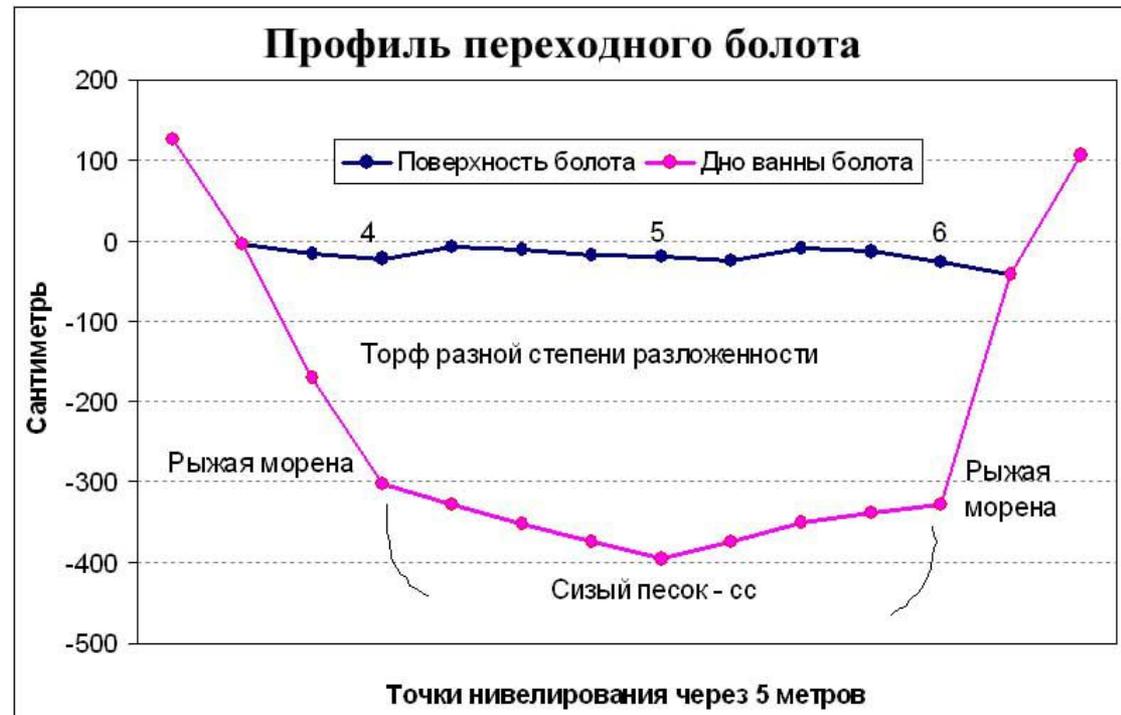
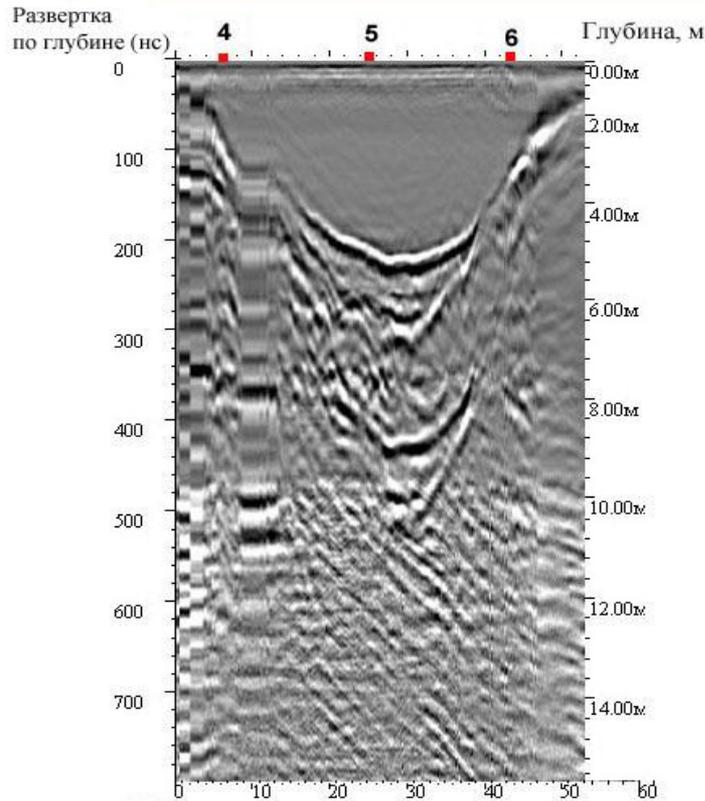
GPR в ландшафтных исследованиях

Изменение запасов древесины (м³/га) по переходному болоту



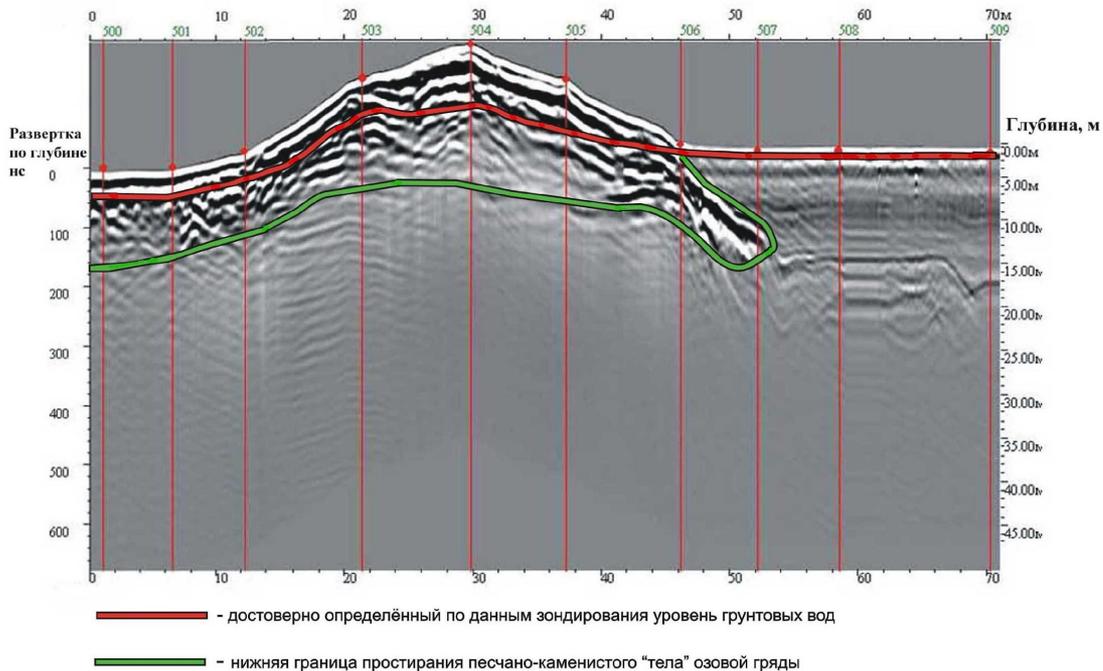
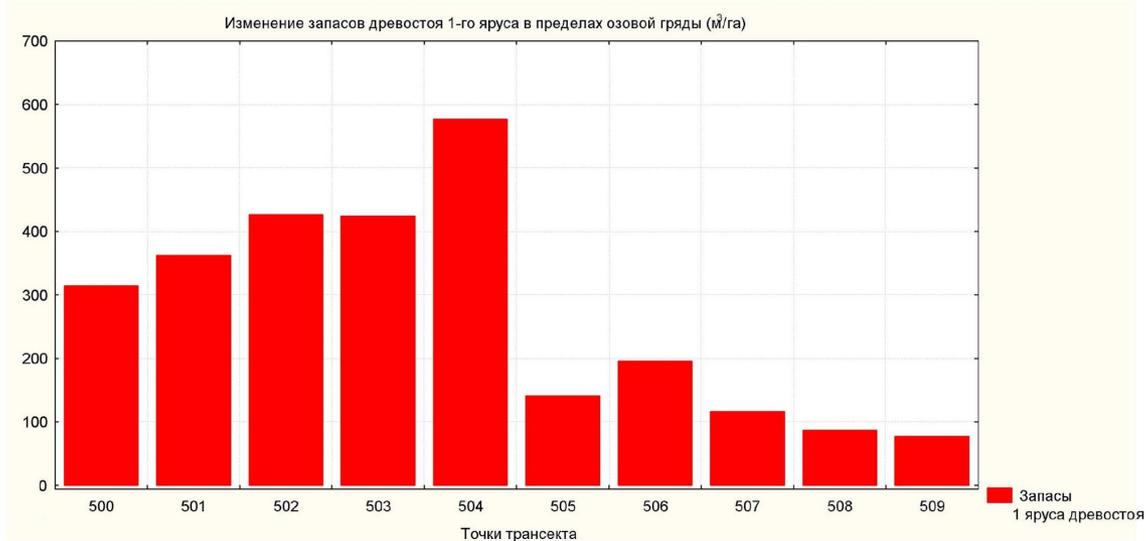
Сопряженный профиль изменения гидрогеологических условий и продуктивности древостоя (м³/га) на переходном болоте

Мощность торфяных отложений по данным бурения



Параметры зондирования: $\epsilon=70$.
Развертка - 800

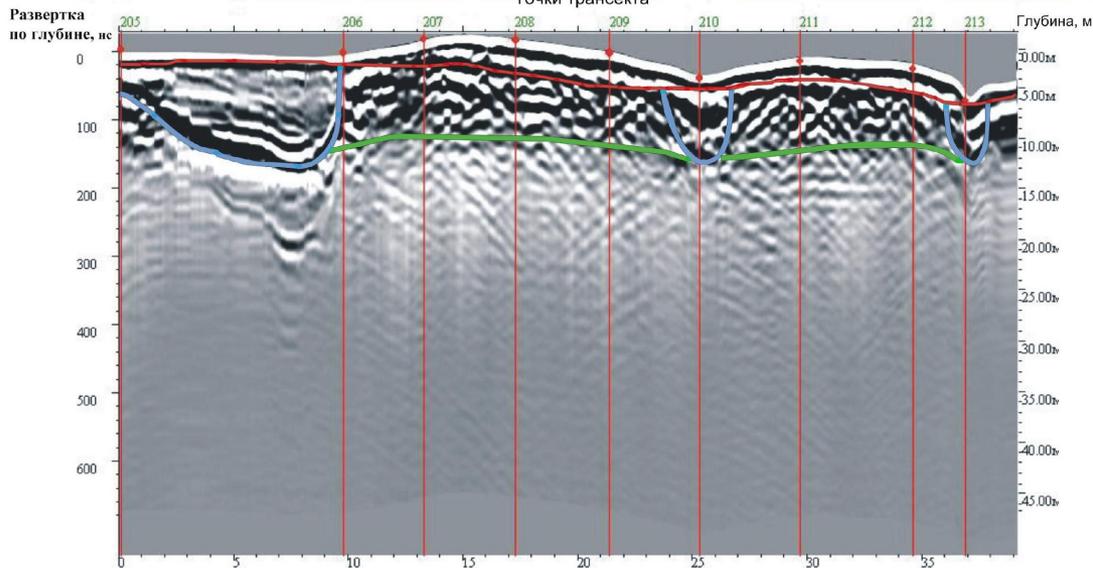
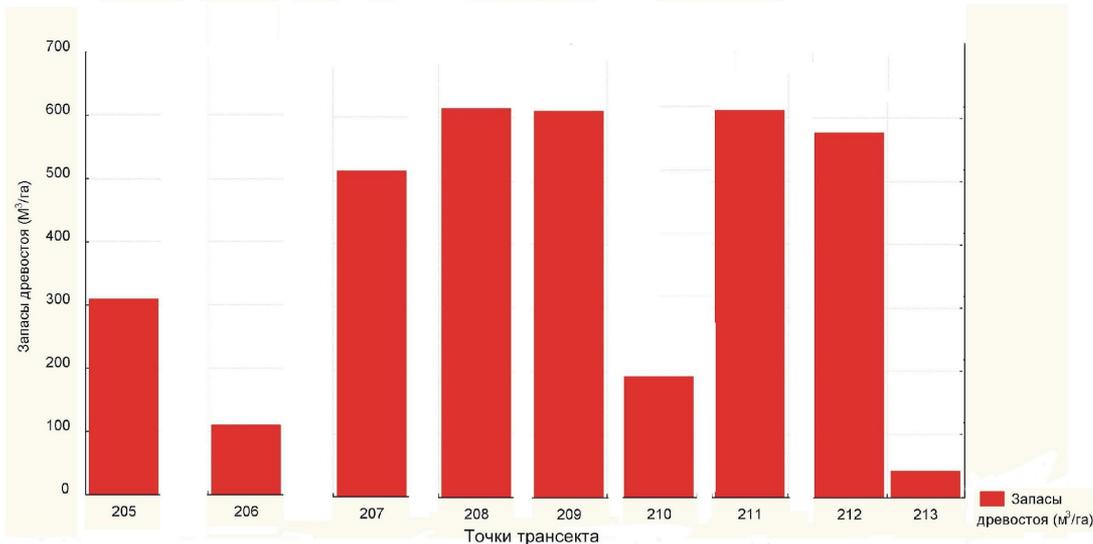
Сопряженный профиль изменения гидрогеологических условий и продуктивности древостоя ($\text{м}^3/\text{га}$) в грядово-котловинно-озовом ландшафте



Параметры зондирования: $\epsilon=5$,
развертка – 800,
накопление – 160.

Сопряженный профиль изменения гидрогеологических условий и продуктивности древостоя ($\text{м}^3/\text{га}$) в местности с развитием реликтового термокарста

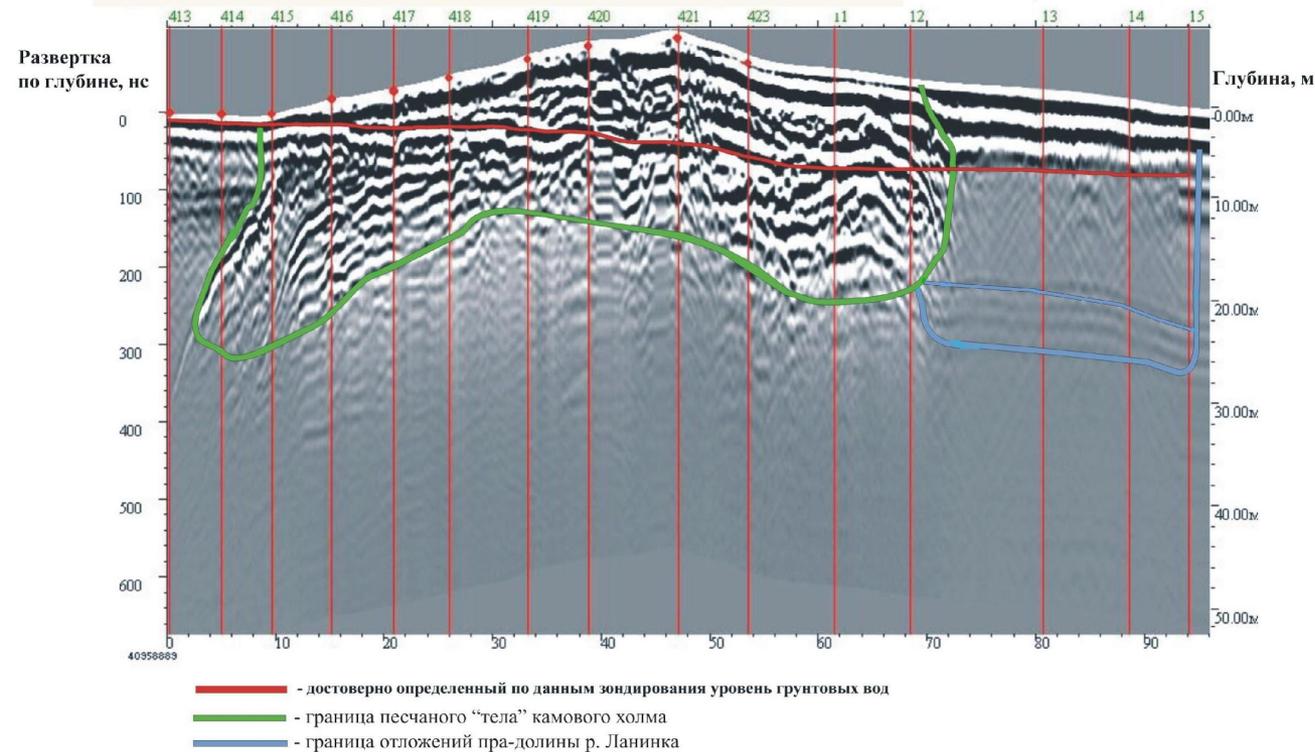
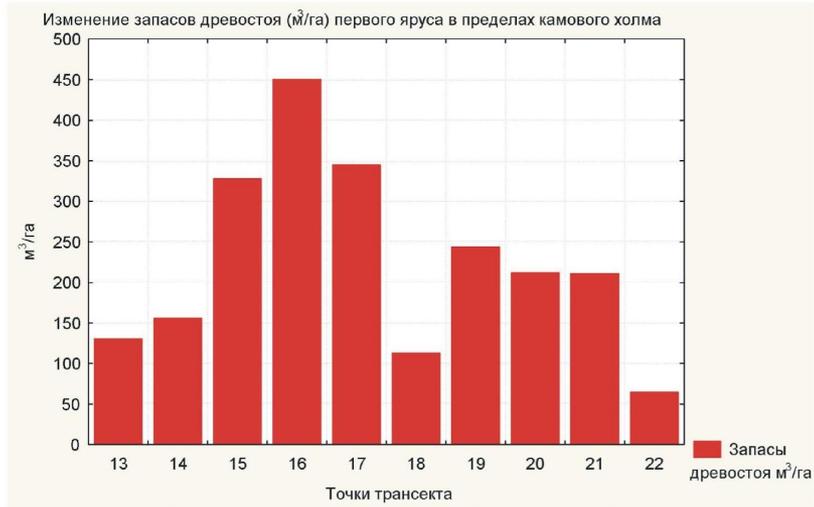
Изменение запасов древостоя 1-го яруса ($\text{м}^3/\text{га}$) в пределах озовидных камов



Параметры зондирования: $\epsilon=5$,
развертка – 800,
накопление – 160.

- достоверно определенный по данным зондирования уровень грунтовых вод
- границы палеомерзлотных трещин, унаследованных в виде заболоченных ложбин
- границы супесчаного каменистого "тела" камовых гряд

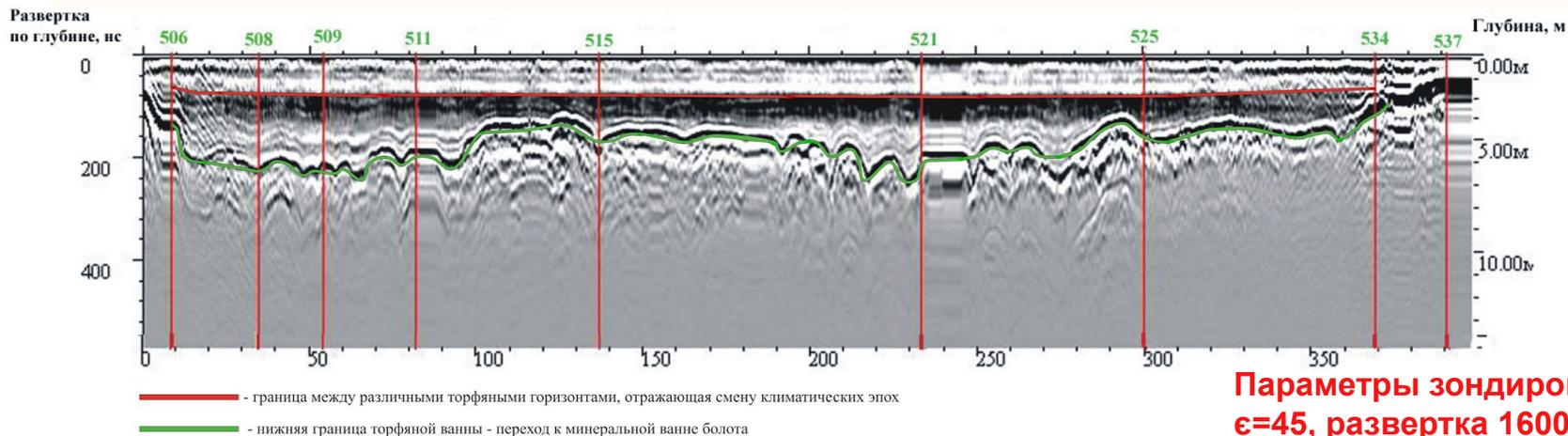
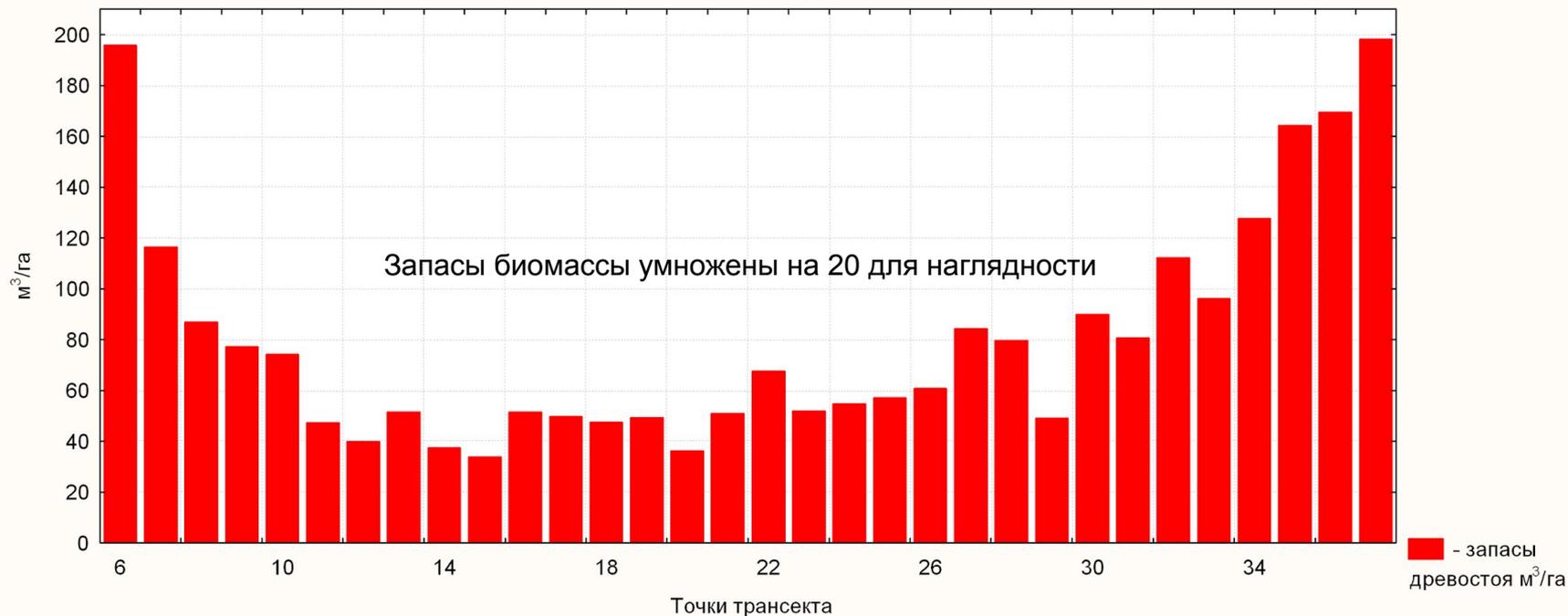
Сопряженный профиль изменения гидрогеологических условий и продуктивности древостоя ($\text{м}^3/\text{га}$) в камово-западинном ландшафте



Параметры зондирования:
 $\epsilon=4$,
развертка – 800,
накопление – 144.

Сопряженный профиль изменения гидрогеологических условий и продуктивности древостоя ($\text{м}^3/\text{га}$) на верховом болоте «Обловское»

Изменение запасов древостоя 1 яруса ($\text{м}^3/\text{га}$) по болоту "Обловское"

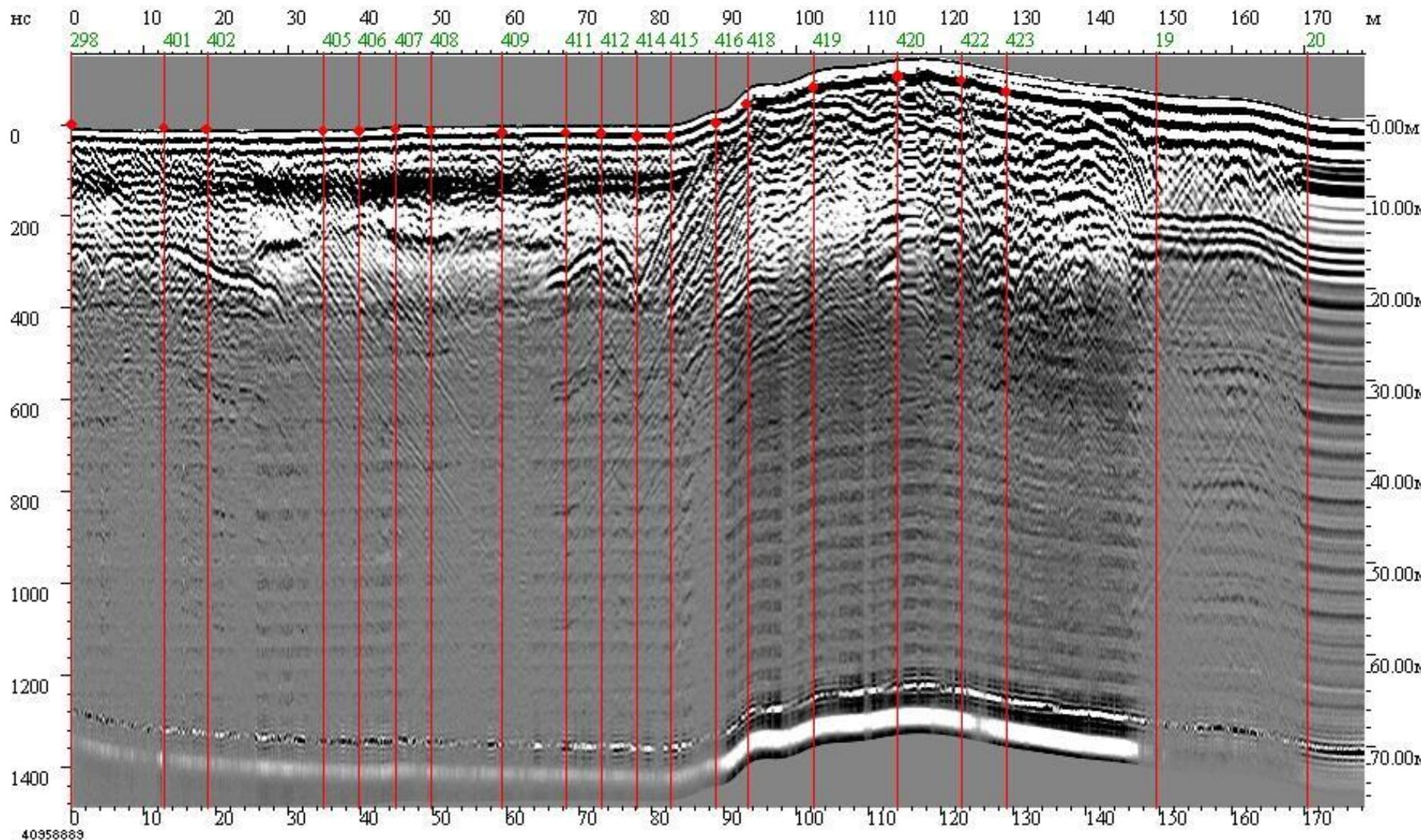


**Параметры зондирования:
 $\epsilon=45$, развертка 1600.**

Обнаружение кровли коренных пород (доломитов и известняков) под толщей четвертичных отложений на максимальной глубине зондирования

Параметры зондирования: $\epsilon=9.0$

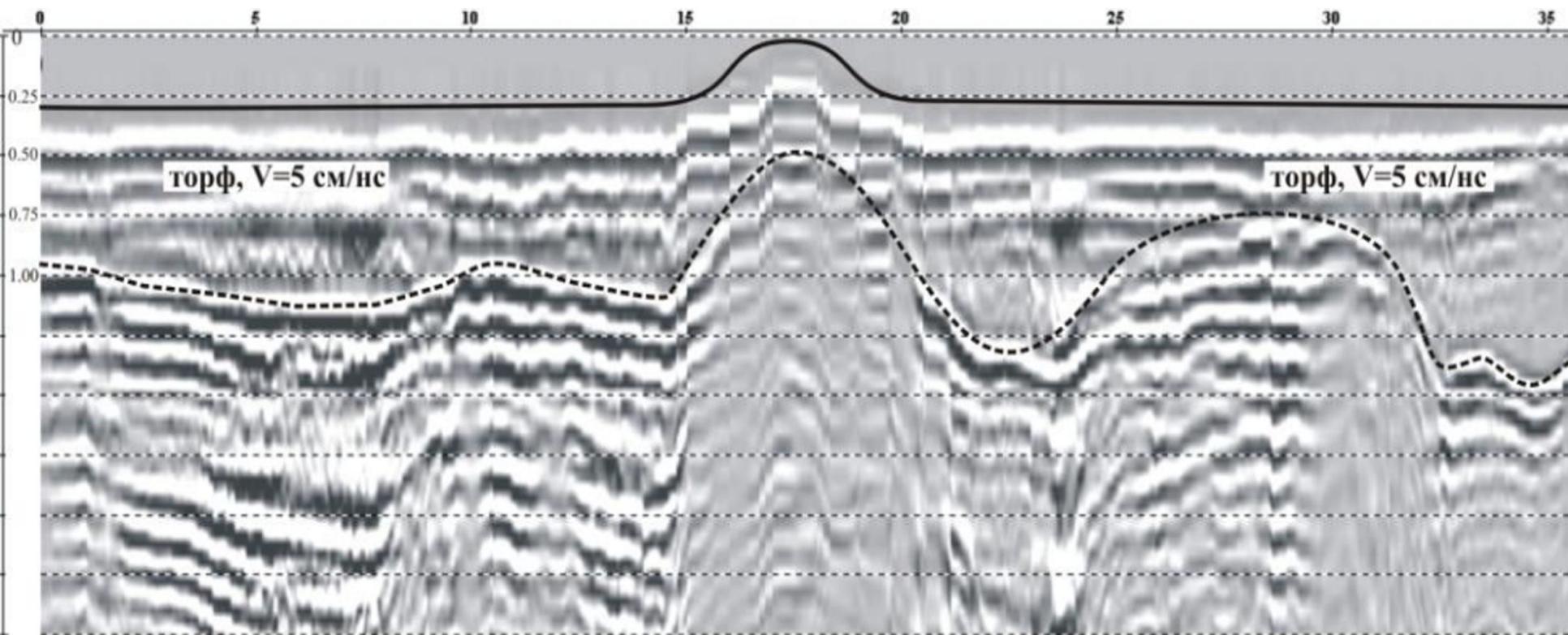
Развертка – 1600, накопление 144



Действенные приемы улучшения радарограмм: подготовка трассы с прорубанием профиля, расчисткой валежа и нивелированием поверхности



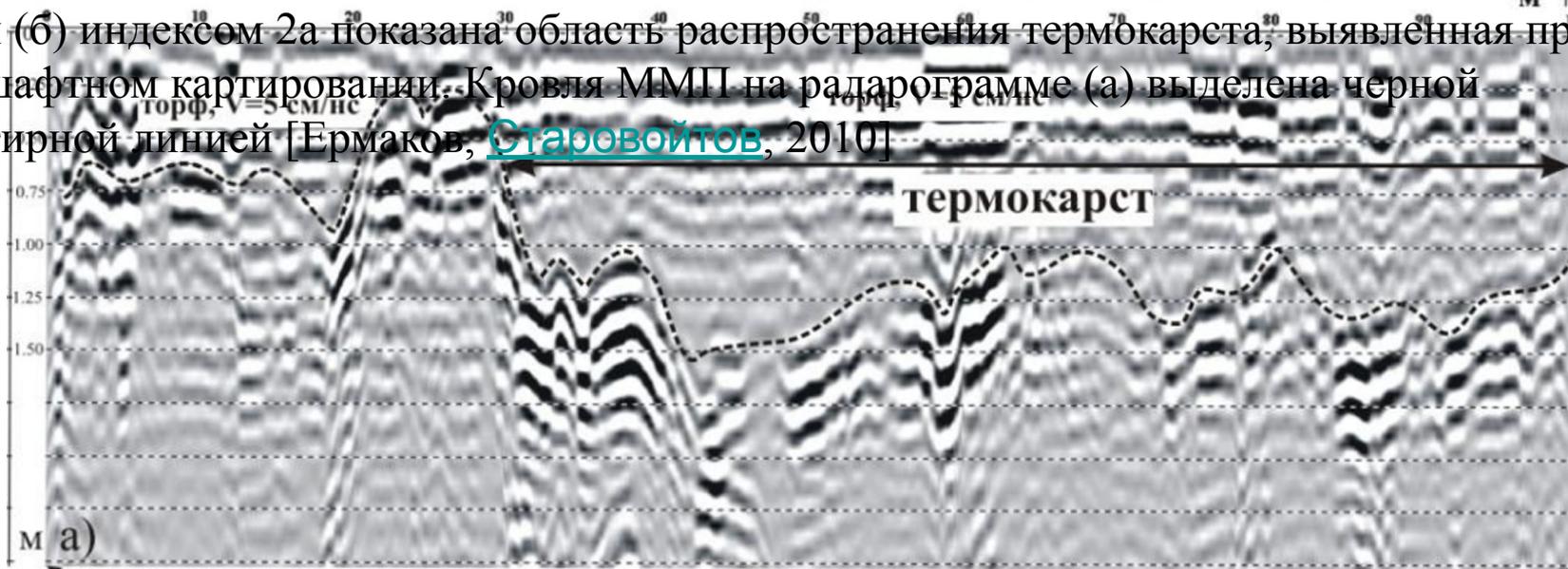
Исследование геокриологических условий при строительстве дорог и трубопроводов



Радарограмма по профилю, пересекающему бугры пучения, выраженные и не выраженные в рельефе дневной поверхности (показана сплошной черной линией). Использован георадар с антенной 300 МГц. Кровля ММП на радарограмме показана черной пунктирной линией. Бугор пучения в центре хорошо выражен в рельефе. На пикетах 25-30 метров показан зарождающийся бугор пучения [[Ермаков](#), выраженные и не выраженные в рельефе дневной поверхности (показана сплошной черной линией)].

Радарограмма по профилю, с участком проявления термокарста

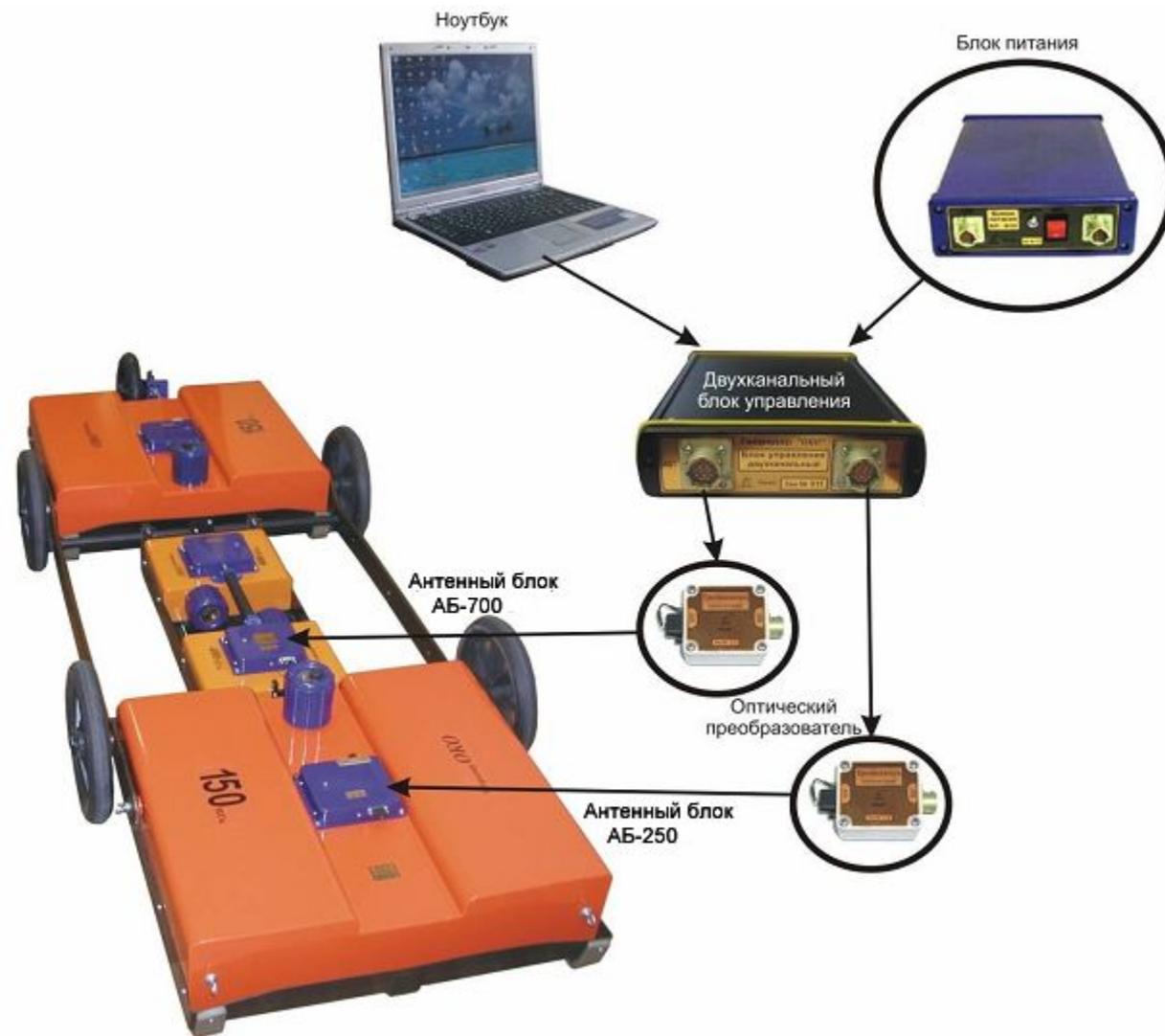
а) радарограмма; б) фрагмент инженерно-геокриологической карты. Использован георадар «Зонд-12с» с антенной 300 МГц. На фрагменте инженерно-геокриологической карты (б) индексом 2а показана область распространения термокарста, выявленная при ландшафтном картировании. Кровля ММП на радарограмме (а) выделена черной пунктирной линией [Ермаков] радарограмма; б) фрагмент инженерно-геокриологической карты. Использован георадар «Зонд-12с» с антенной 300 МГц. На фрагменте инженерно-геокриологической карты (б) индексом 2а показана область распространения термокарста, выявленная при ландшафтном картировании. Кровля ММП на радарограмме (а) выделена черной пунктирной линией [Ермаков, Старовойтов, 2010]





. Геокриологическое обследование участка строящейся грунтовой дороги Амга – Усть-Мая методом георадиолокации [Омельяненко, и др., 2010]

Функциональная схема георадара с двухканальным антенным блоком

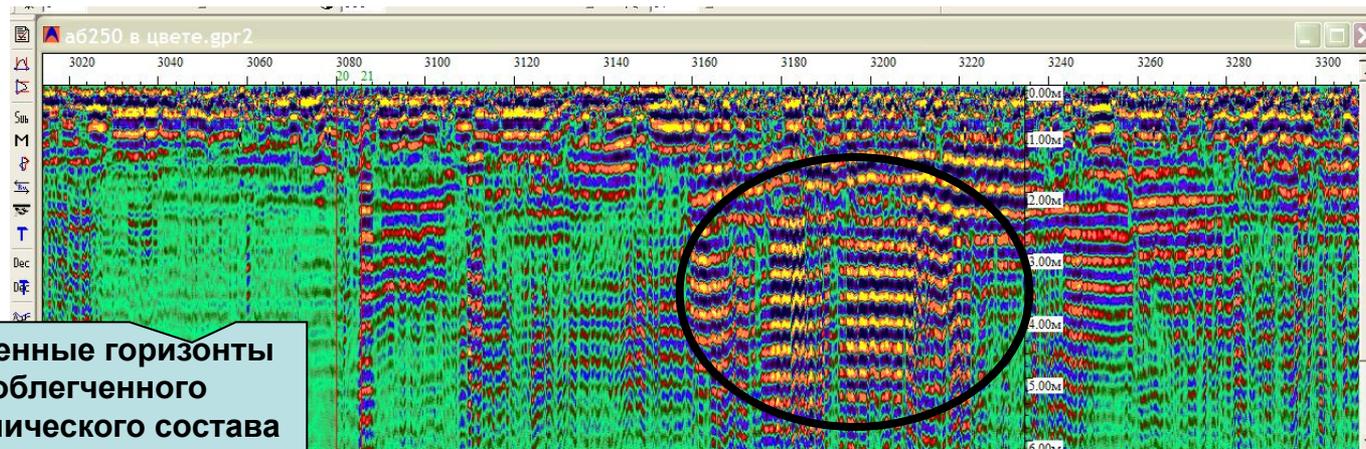


Площадная съемка структуры почвенного покрова и четвертичных отложений ландшафтов вторично-моренных равнин (Калужская область)



Автоматическая пространственная привязка профилей зондирования георадара “ОКО-2” с использованием дистанционных данных (Google Earth), одометра (---) и GPS (+)

Фрагменты радарограмм, полученных двухканальным антенным блоком (АБ 250+700)

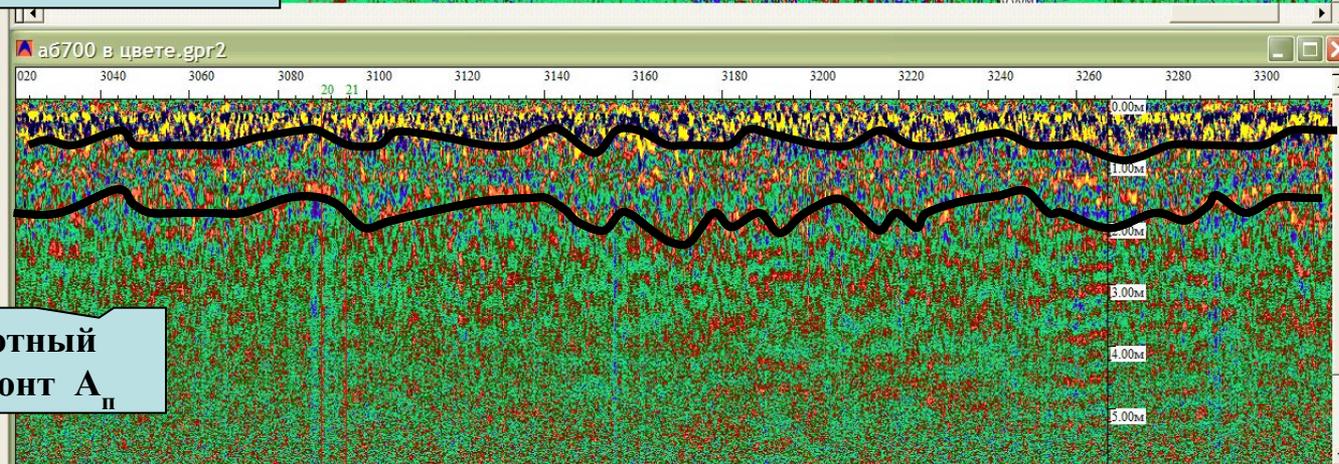


Радарограмма
канал 250 МГц

Линза водонасыщенных
песков

Покровные суглинки
делювиальные и
моренные суглинки

Почвенные горизонты
облегченного
механического состава



Радарограмма
канал 700 МГц

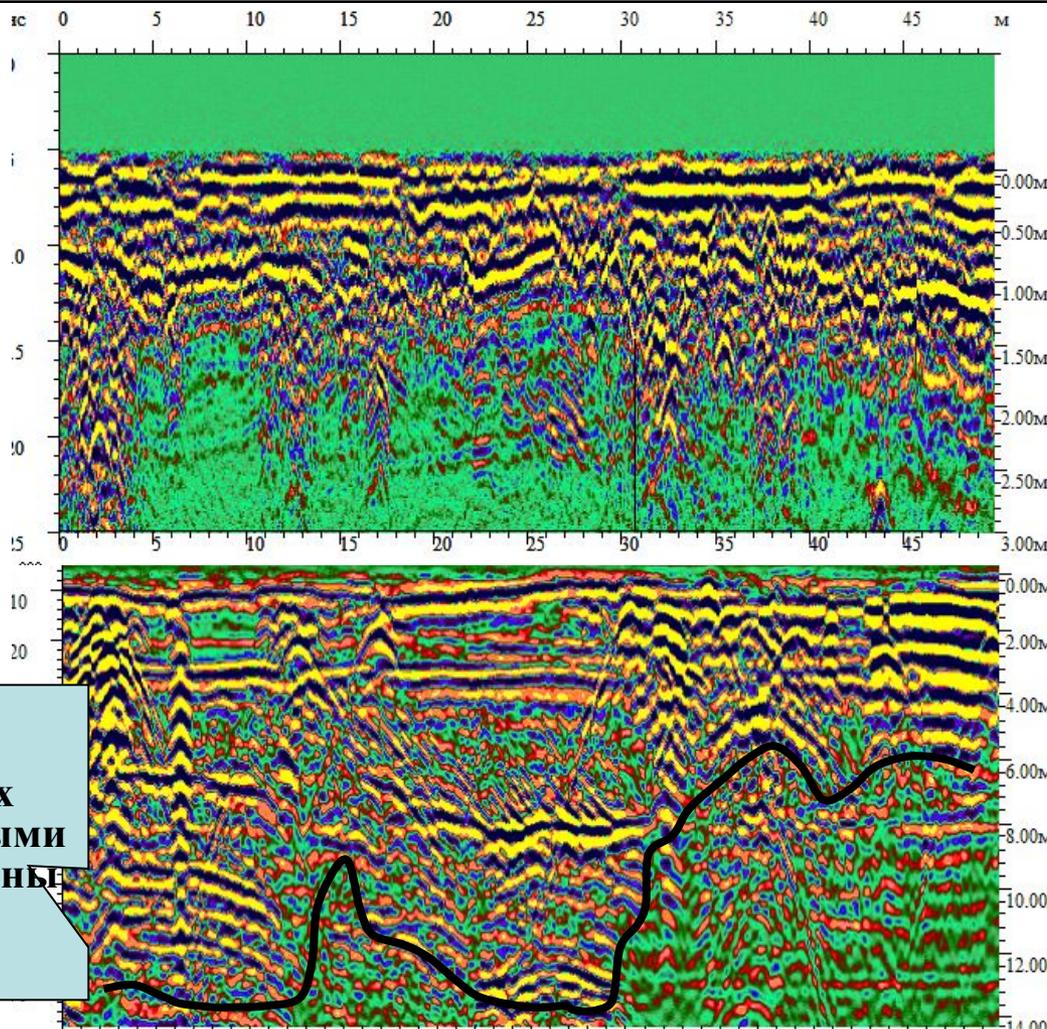
Элювиальный A_2B +
иллювиальный B_t
горизонты почв

Почвообразующий
покровный
суглинок

Пахотный
горизонт A_{II}

На радарограмме канала 250 МГц различаются три объекта: поверхностные почвенные горизонты облегченного гранулометрического состава; покровные и делювиальные суглинки; линза водонасыщенных флювиогляциальных песков. На радарограмме канала 700 МГц различаются горизонты пахотных дерново-подзолистых почв

Детализированные фрагменты радарограмм почв и четвертичных отложений ландшафтов вторично-моренных равнин



Горизонты почв

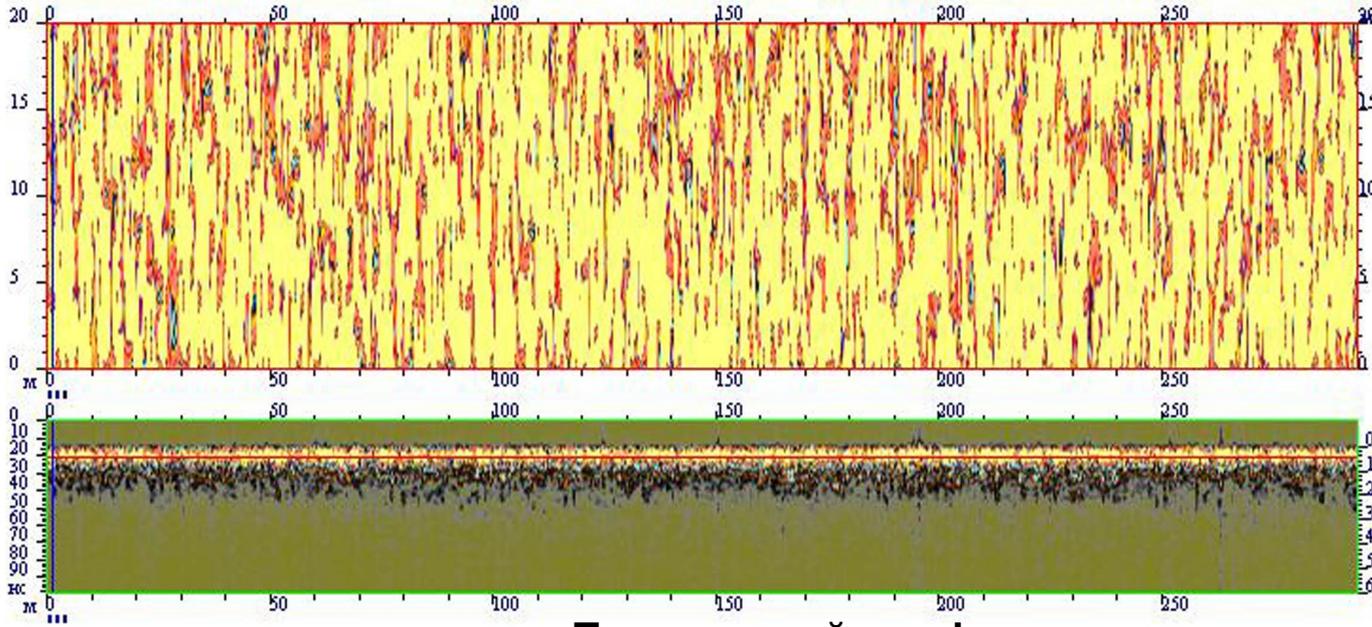
Палео-мерзлотные трещины в покровном суглинке до глубины 3,0 м

Линза водонасыщенных флювиогляциальных песков под покровными суглинками до глубины 6-14 м

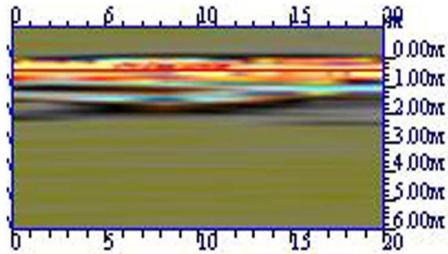
Радарограмма канал 700 MHz

Радарограмма канал 250 MHz

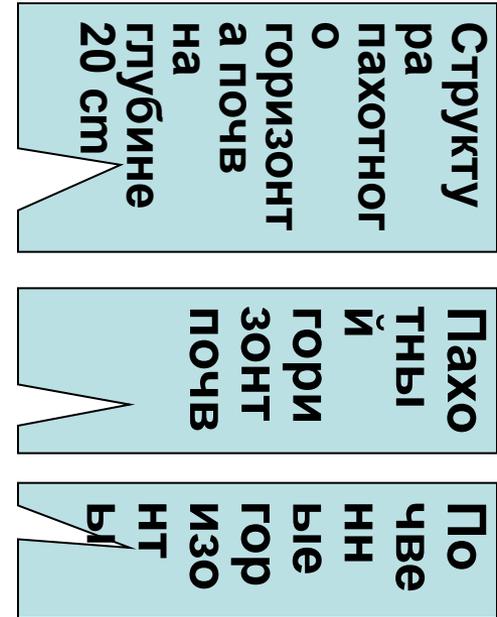
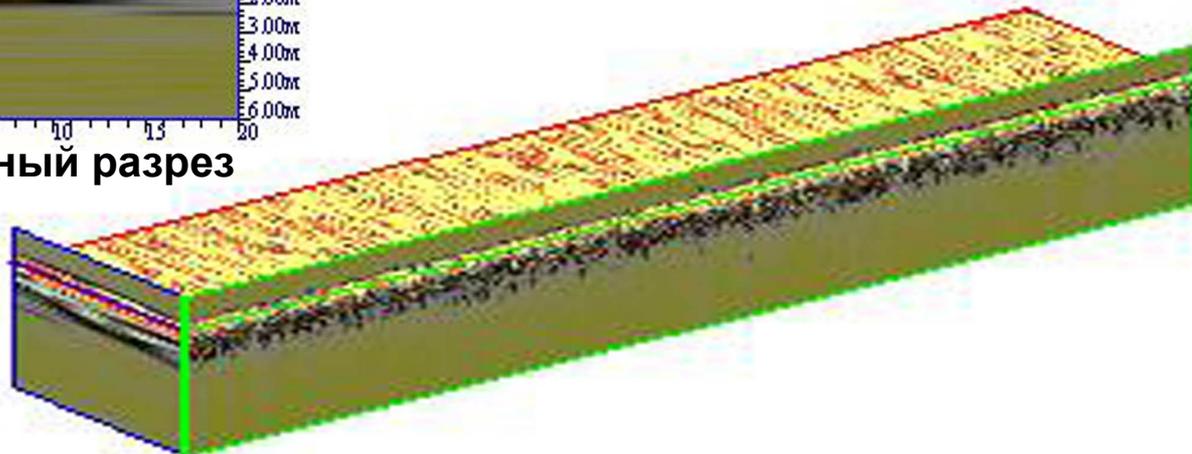
Трехмерная структура почвенного покрова по данным радарограмм канала 700 MHz



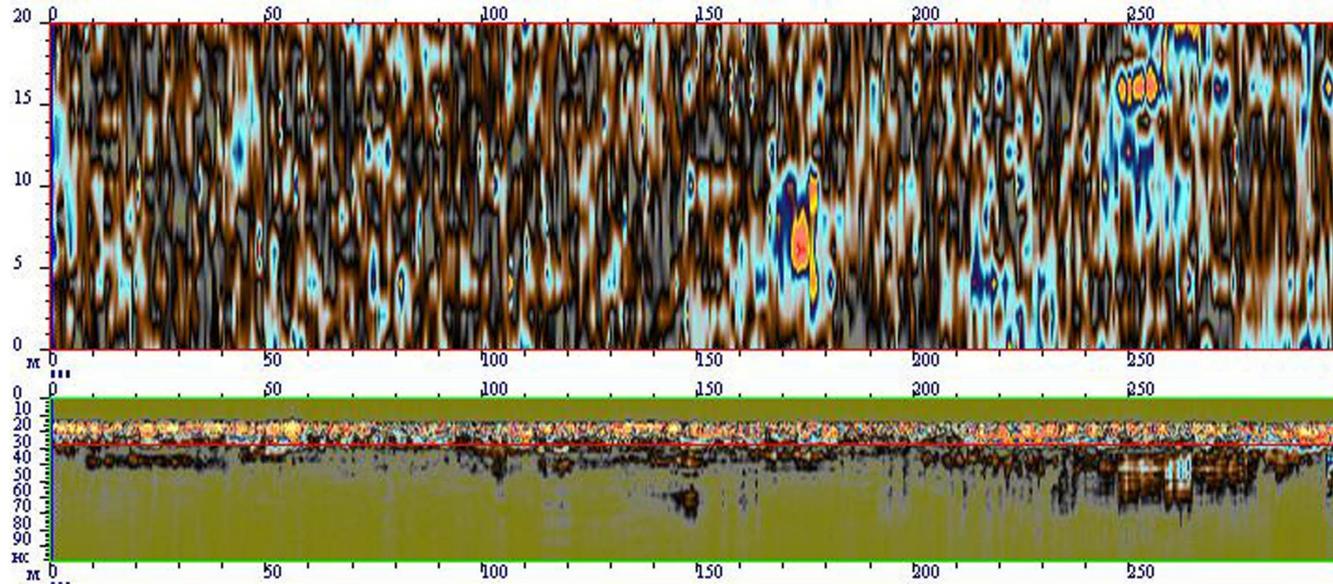
Продольный профиль склона



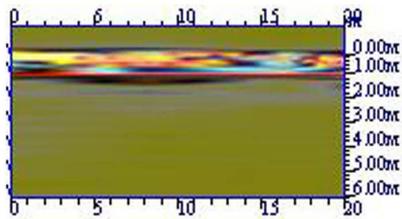
Поперечный разрез



Трёхмерная структура отложений по данным радарограмм канала 250 МГц



Продольный профиль склона



Поперечный разрез

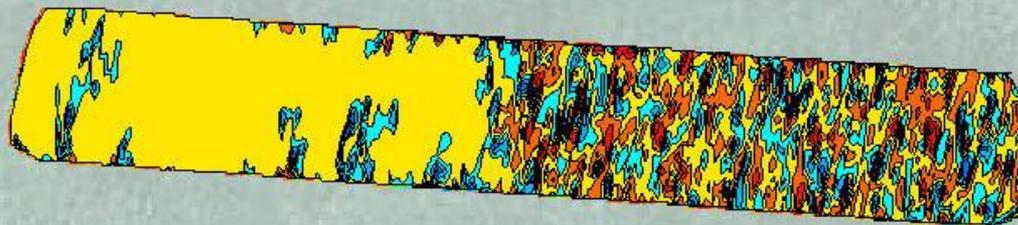


Структура
уровня
покровного
суглинистого
каменного
глубинного
е 2 м

Водоносная
сыщенная
песчаная
глубинная
е 2,5-6 м

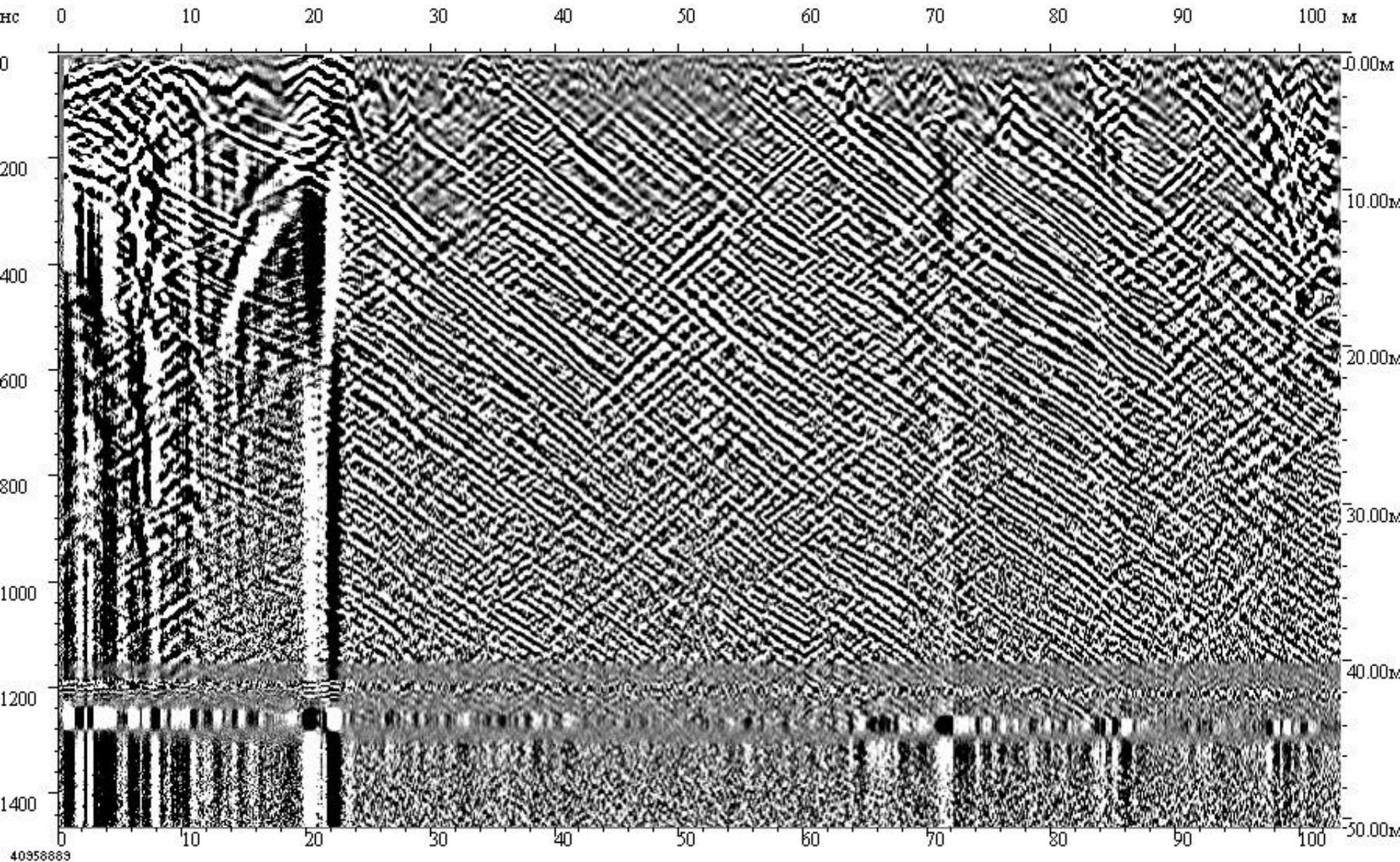
Геология
по ЧВ

Пространственная привязка линзы водонасыщенных флювиогляциальных песков, обнаруженной георадарной съемкой под покровными суглинками (площадной разрез на глубине 2,5 м)

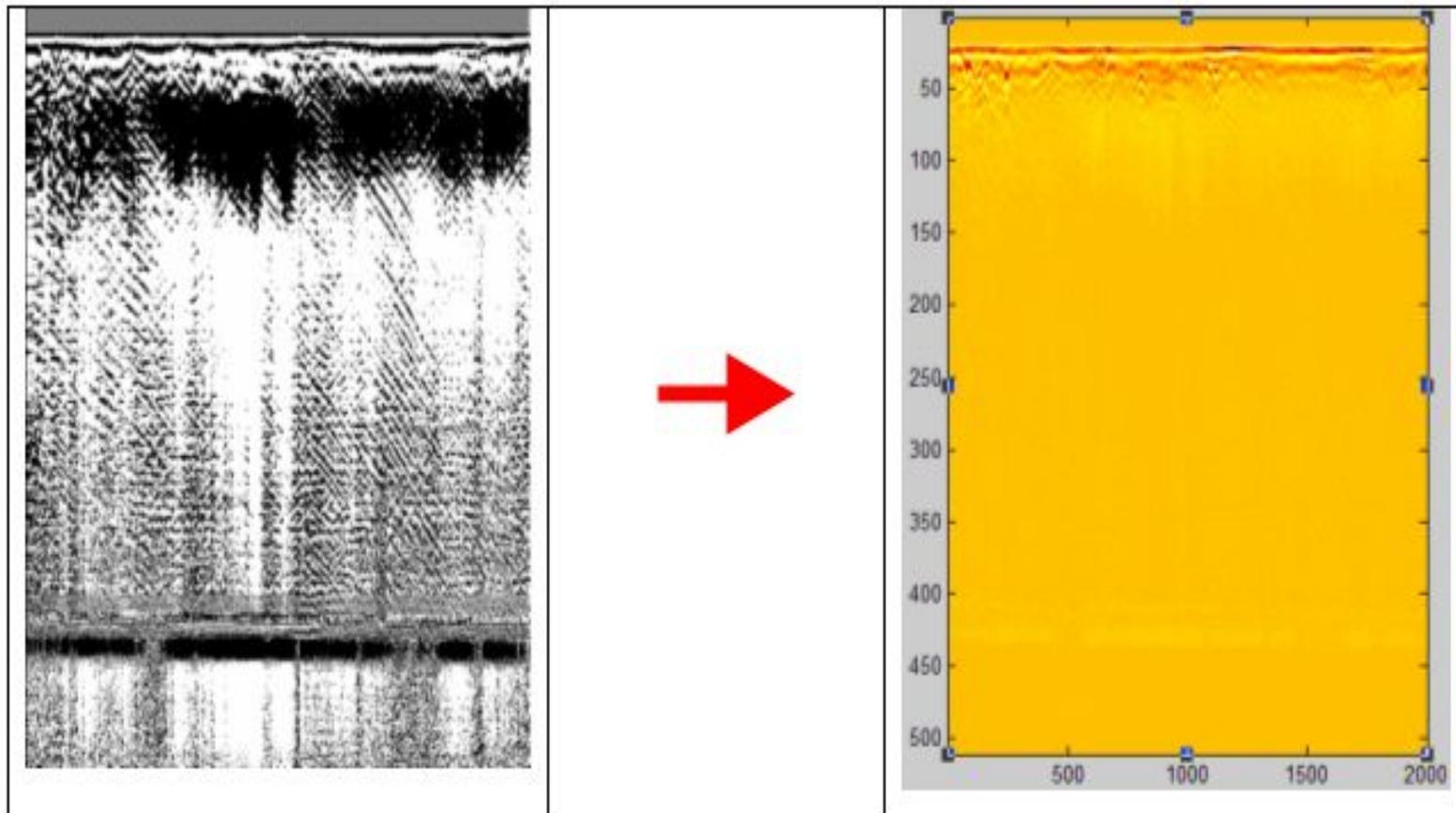


-  Водонасыщенные флювиогляциальные пески
-  Моренные суглинки и их делювий

Помехи от деревьев в густом лесу - «ёлочка», связанные с неэкранированностью антенны георадара



Пример преобразования радарограммы с сильно затухающим сигналом в моренных суглинках.

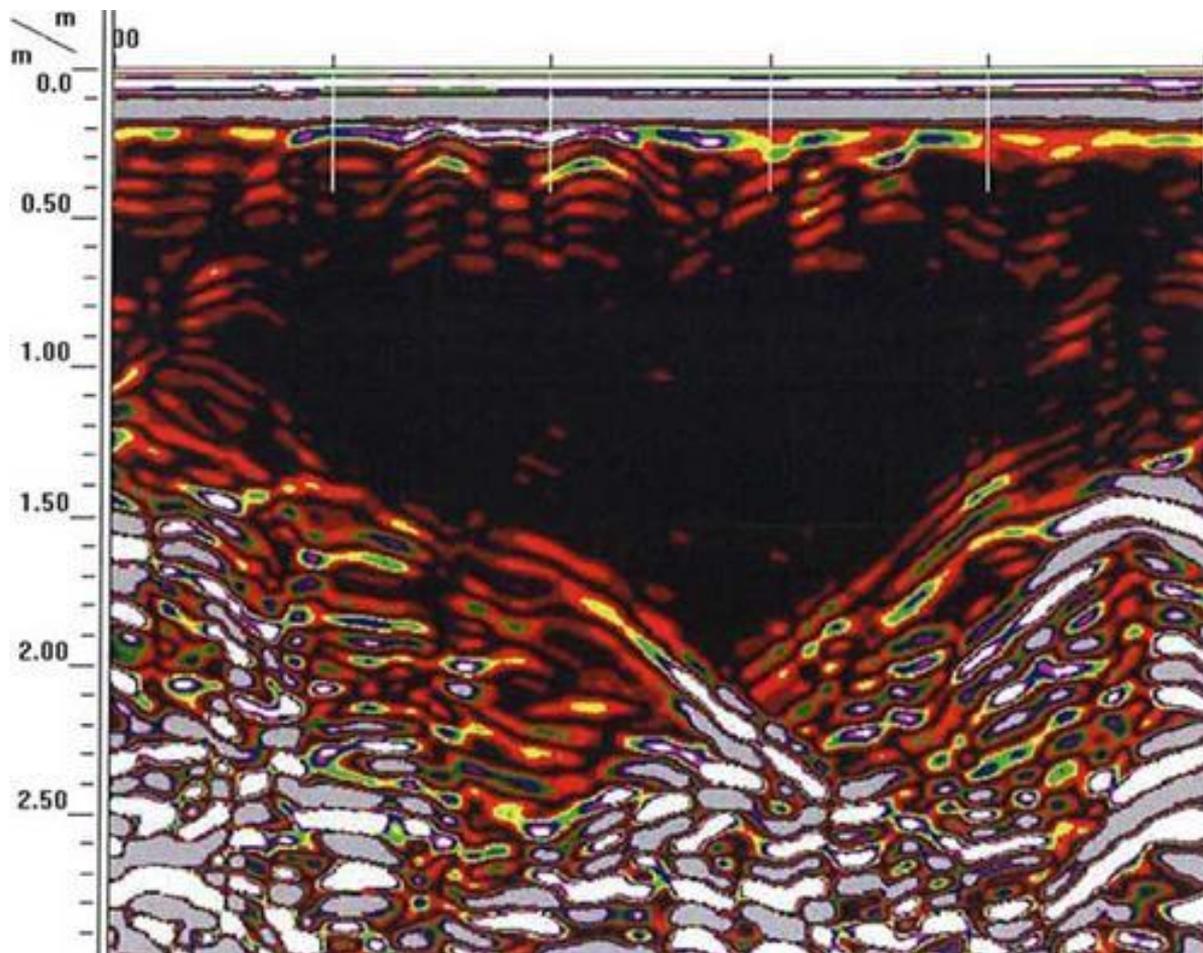


Улучшается дешифрируемость верхних элювиальных горизонтов почв, имеющих облегченный легкосуглинистый механический состав

Некоторые рекомендации к работе с георадаром «ОКО-2»

1. Длина профилирования должна соответствовать длине, фиксируемой прибором – это необходимо для измерения диэлектрической проводимости. В противном случае последующие измерения и выводы будут неверны.
2. Работа в условиях пересеченного рельефа с лесной растительностью, сильно осложненной ветровалами, требует подготовки трассы зондирования с нивелированием трансект, прорубкой визиров и расчисткой упавших деревьев.
3. При работе с незранированной антенной особенно важно отсутствие на объектов, которые вызывают помехи, накладывающиеся на радарограмму и осложняющие её интерпретацию. Деревья создают диагональную полосчатость (рефракция типа "ёлочки"), строения – прямоугольные помехи, источники электромагнитного излучения – «засвечивают» сигнал в радиусе 5-15 метров.
4. При работе необходимо верифицировать радарограммы по данными разрезов и бурения. Необходимо выбирать глубокие скважины со сменой контрастных по составу грунтов (пески-глины, торф-песок, пески-известняки и др).
5. Наиболее сложная интерпретация радарограмм на суглинистых и глинистых отложениях, в связи с тем, что отложения такого характера сильно «гасят» волну благодаря высоким значениям ϵ . Дешифрируется лишь самый верх отложений.
6. Наиболее достоверная и хорошо интерпретируемая информация получается при зондировании на отложениях легкого и грубого гранулометрического состава (песчано-супесчаных, песчано-гравелистых) и на торфах.
7. Использование георадара необходимо сочетать с другими данными об отложениях. Особенно важно наличие представлений о структуре и генезисе отложений, нивелирование поверхности профилирования.

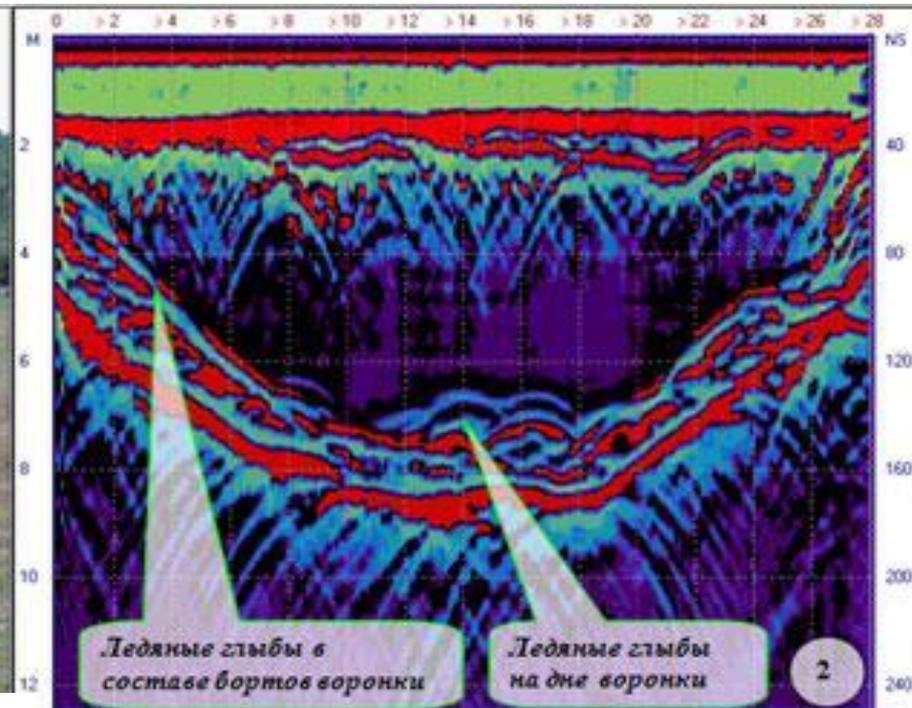
GPR в историко-археологических исследованиях



Заполненная грунтом воронка от разрыва артиллерийского снаряда, обнаруженная 2D георадарной съемкой на историческом кладбище в Стонингтоне, штат Коннектикут США [Fisher, 2013].

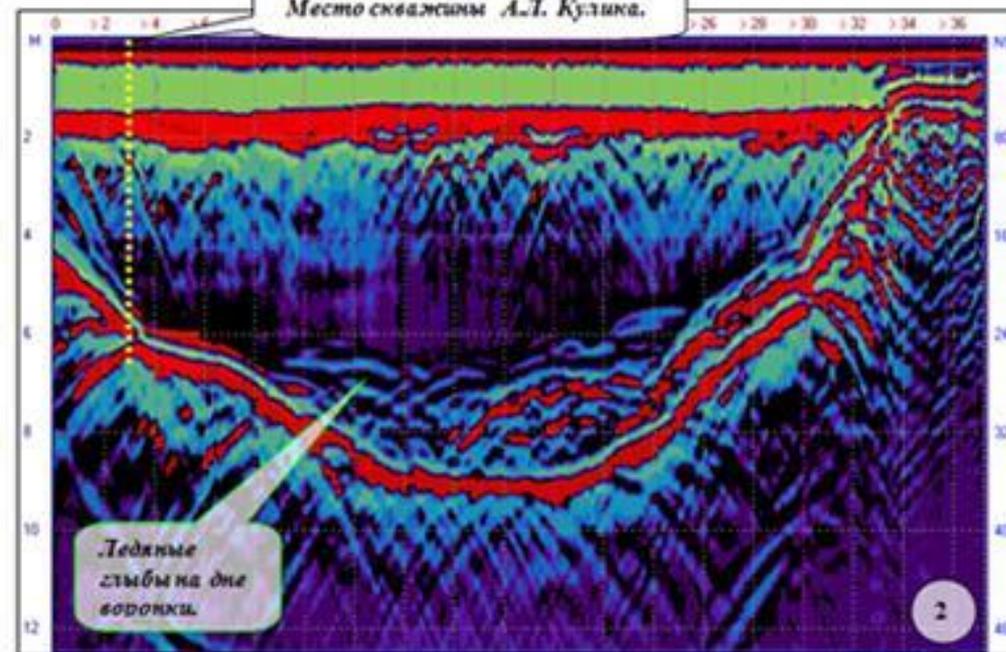


1



2

Место скважины А.Т. Кулика.



2

Радарограмма воронки падения Тунгусского метеорита.

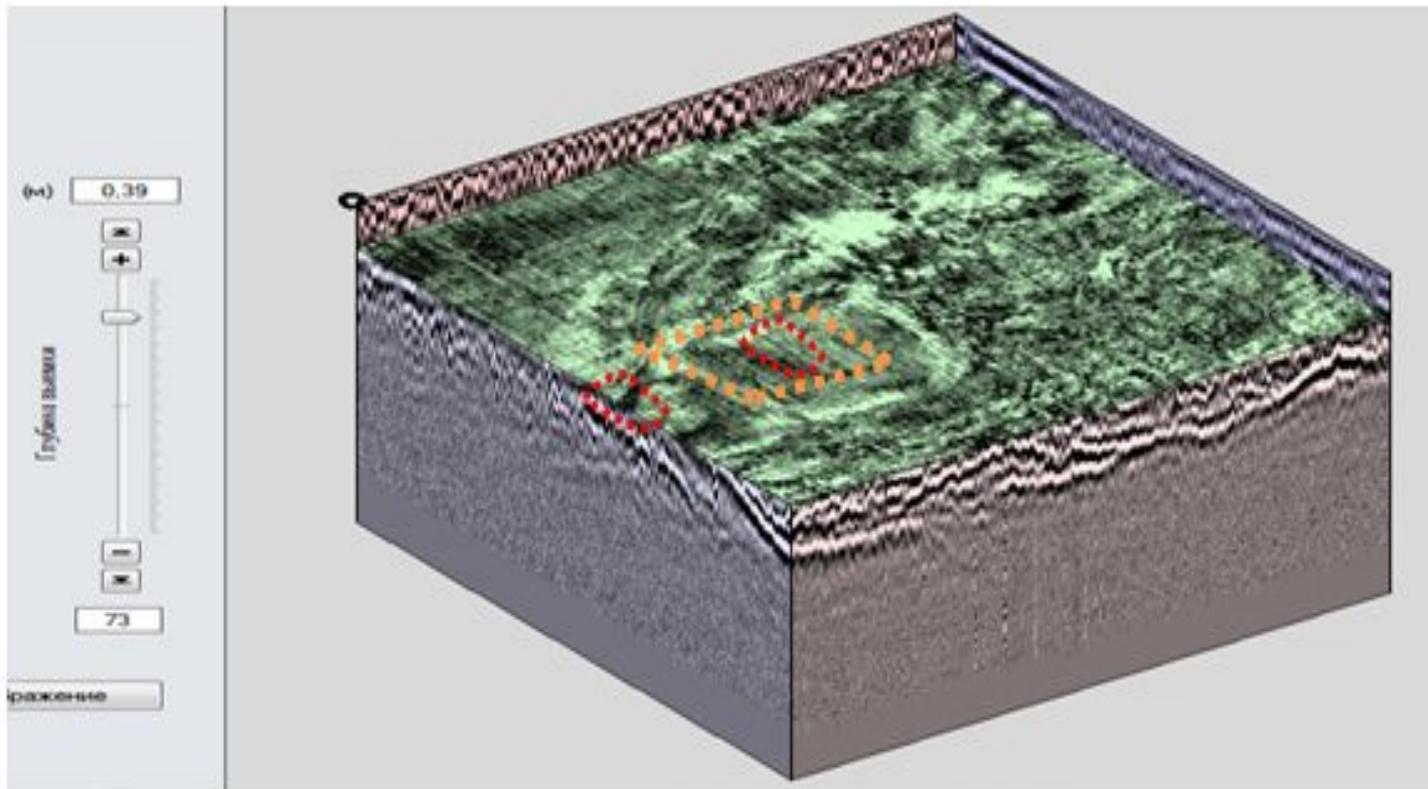
1 - вид Сусловской воронки;
 2 - георадарный разрез З-В, ВЧ фильтрация;
 3 - георадарный разрез С-Ю, ВЧ фильтрация. На вертикальной оси с правой части рисунков задержка сигнала в наносекундах, на оси с левой части рисунка указана глубина в метрах [Алексеев, Копейкин, 2011]

Трехмерная георадиолокационная реконструкция Успенского собора на территории Южного городища Старой Рязани [Клочко, Шишков, 2010]



Послойный срез 3D куба на глубине более 1 м. Реконструированы четкие контуры постройки; заметны малококонтрастные неоднородности (следы археологических раскопок 1949 г), локальные интенсивные аномалии (фрагменты некрополя?). Стороны участка детальной съемки – 60 на 50 м. Ориентировка слайса – север внизу

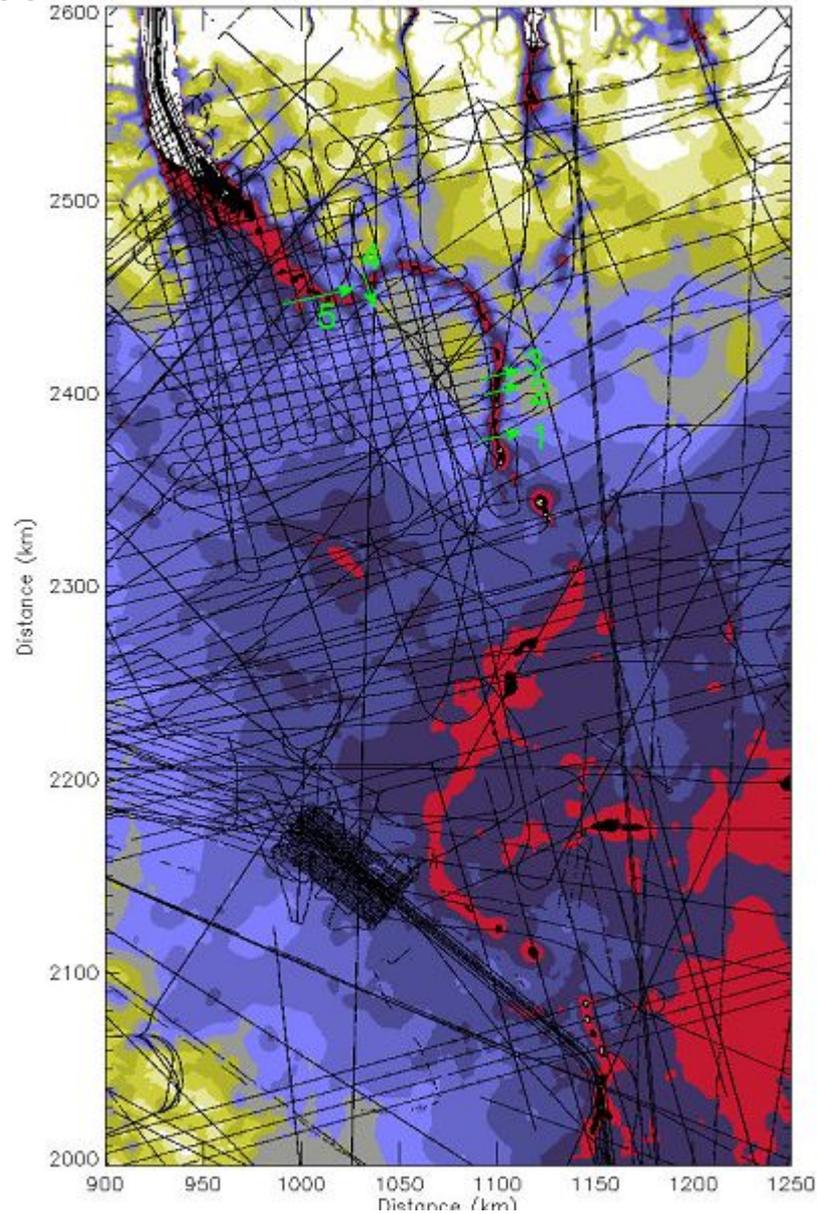
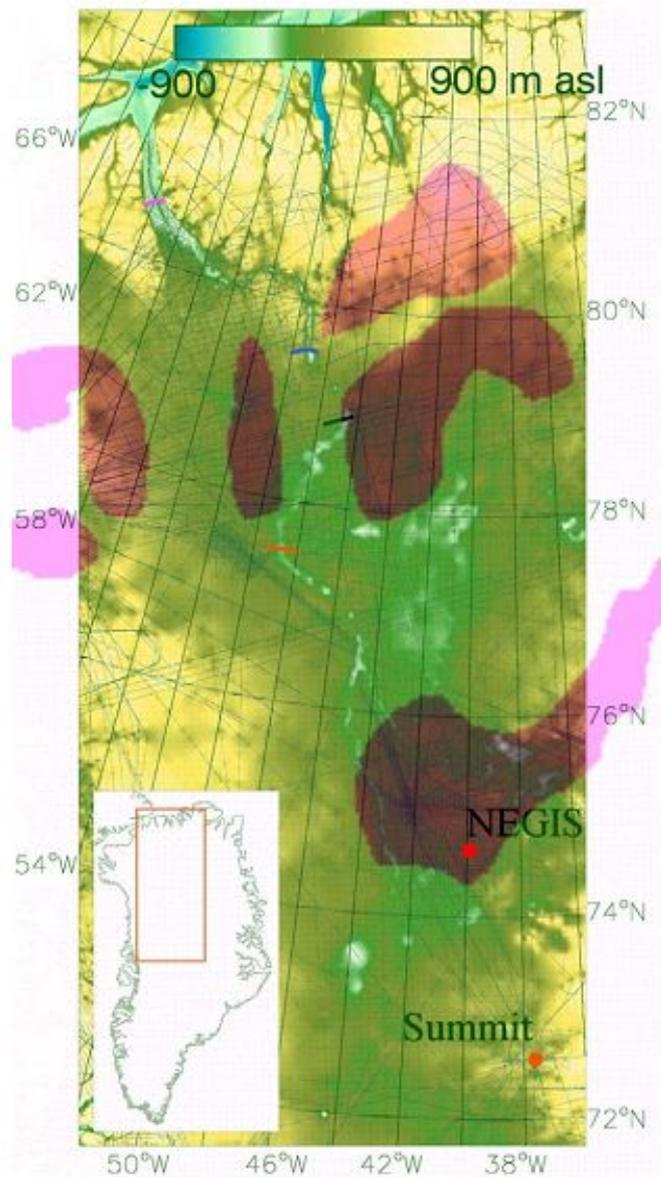
Площадное георадарное зондирование Аланских катакомбных погребений в Карачаево-Черкесской Республике [Марчук и др., 2013].

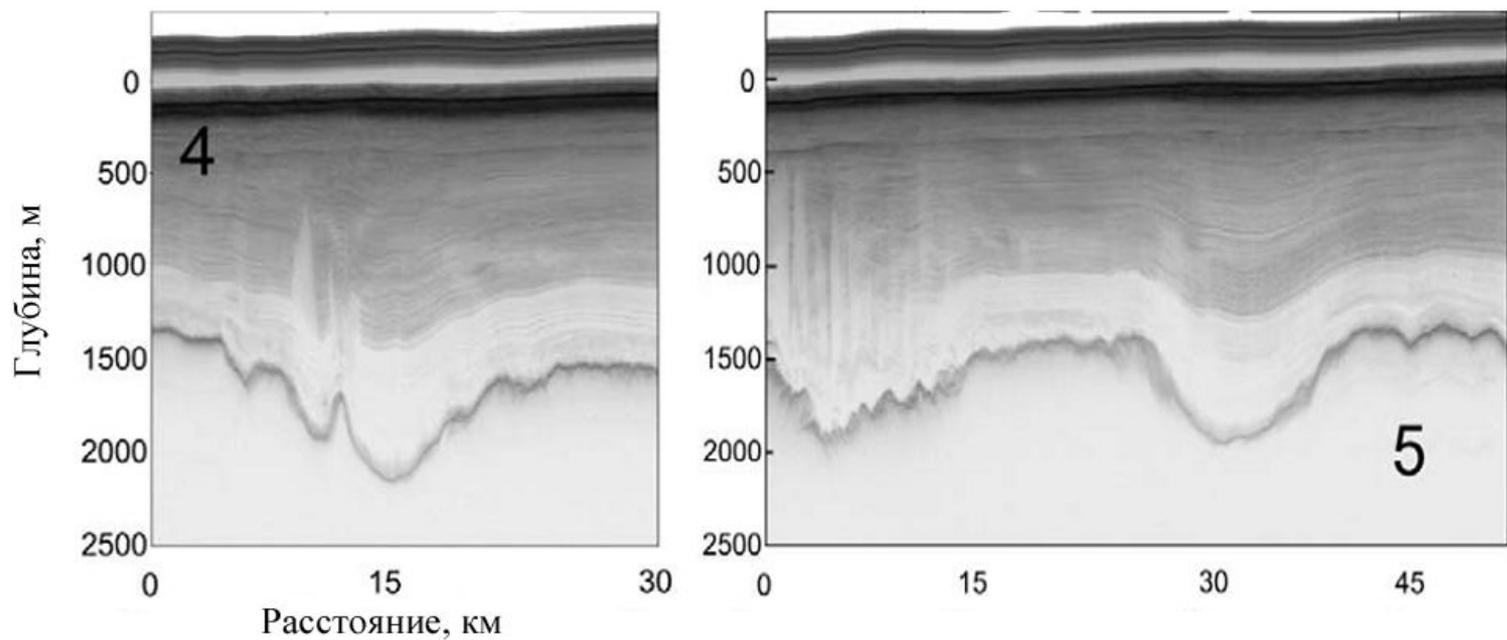
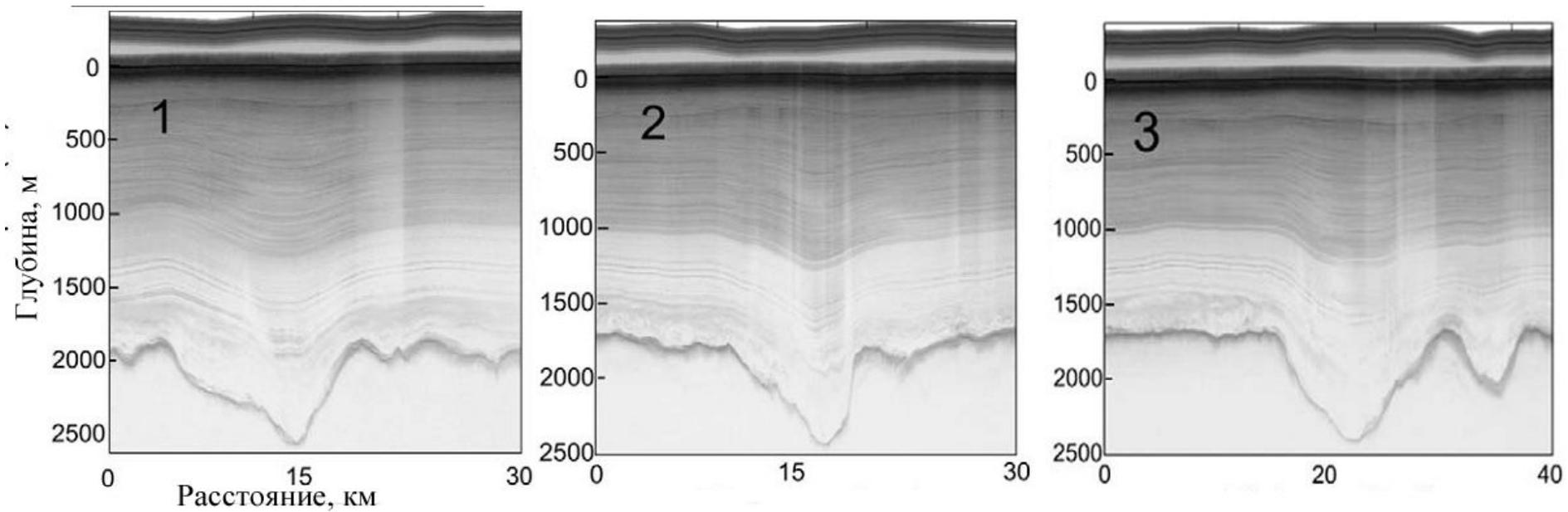


Планиметрический 3D разрез, участка георадарного исследования 80x80м. Красным и оранжевым пунктиром обозначены выявленные ровики вокруг катакомбных погребений. Могильник "Левоподкумский" в Малокарачаевском районе КЧР

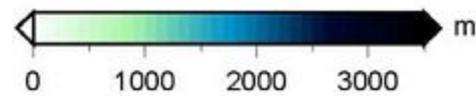
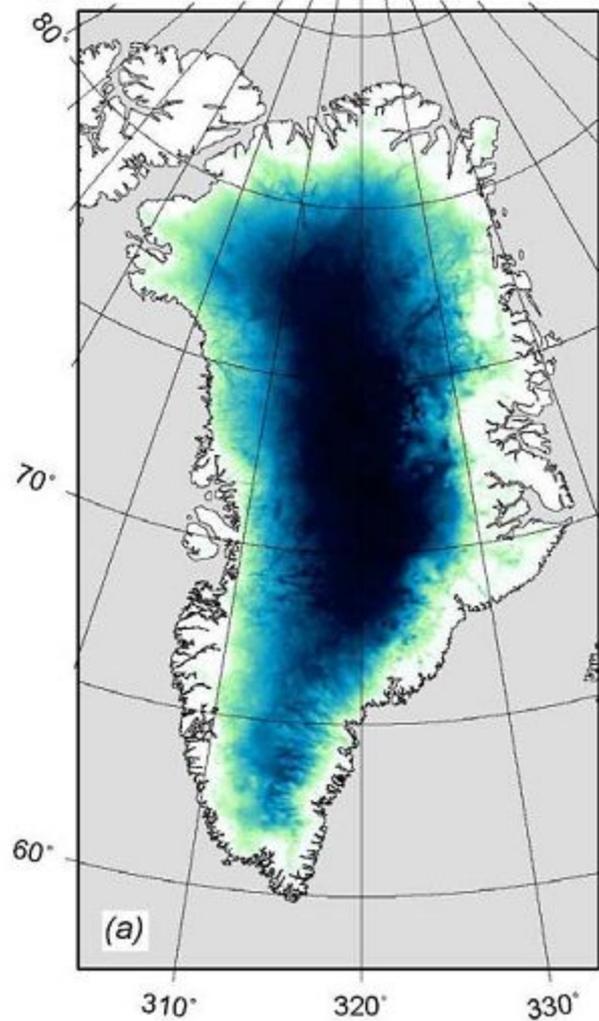
ОТКРЫТИЕ КАНЬОНА ПОД ЛЕДНИКОВЫМ ЩИТОМ

методами **Ice Penetration Radar** и математического моделирования в Гренландии
[Bamber, Siegert, Griggs, et al., 2013]

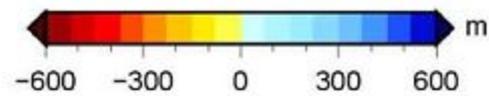
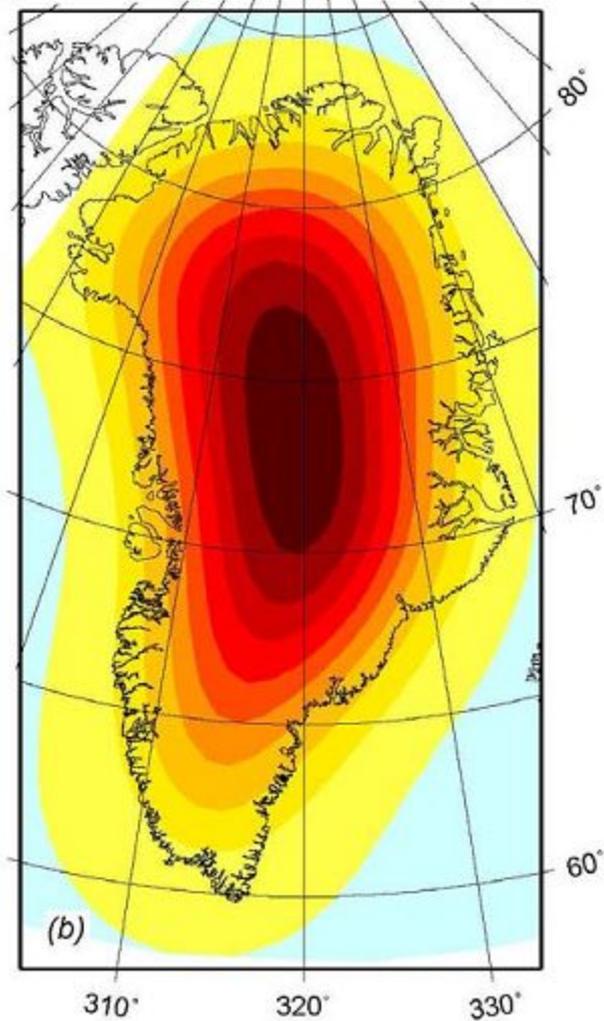


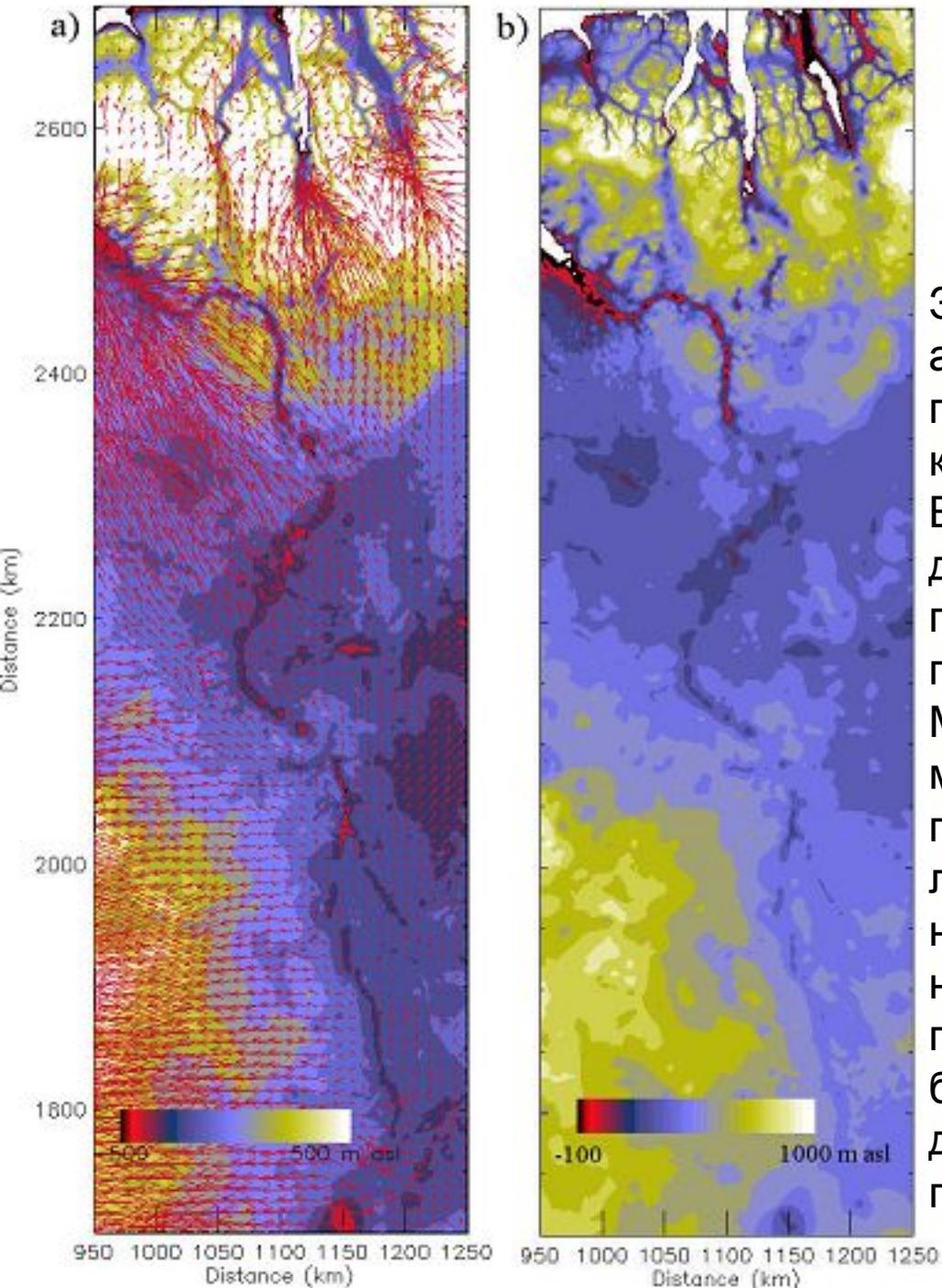


a) *Ice thickness*



b) *Isostatic correction*





Закрашенные контуры (сечение 100 м)
 а) современная поверхность рельефа горных пород региона, показанного красной рамкой на предыдущем слайде. Векторы скорости поверхности льда (по данным SAR-интерферометрии на 2005 год [Spada, Ruggieri, Sørensen, et al 2012]) показаны красными стрелками. Максимальные скорости составляют 50 м/год и показывают направление поверхностного потока современного ледникового щита вблизи каньона. Они не могут быть таким же, как направление и скорость потока на глубине.
 б) изостатически компенсированная доледниковая поверхность рельефа горных пород .

