

КУЭВАС КАСТЕЛЬЯНОС П., КРИВОШЕЯ К.В. (УНИВЕРСИТЕТ ШТАТА НУЭВО ЛЕОН, МЕКСИКА), ШЕВНИН В.А.\*(МГУ), ПАВЛОВА А.М. (МГУ), РЫЖОВ А.А. (ВСЕГИНГЕО), БОБАЧЕВ А.А. (МГУ)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОВАЛОВ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ

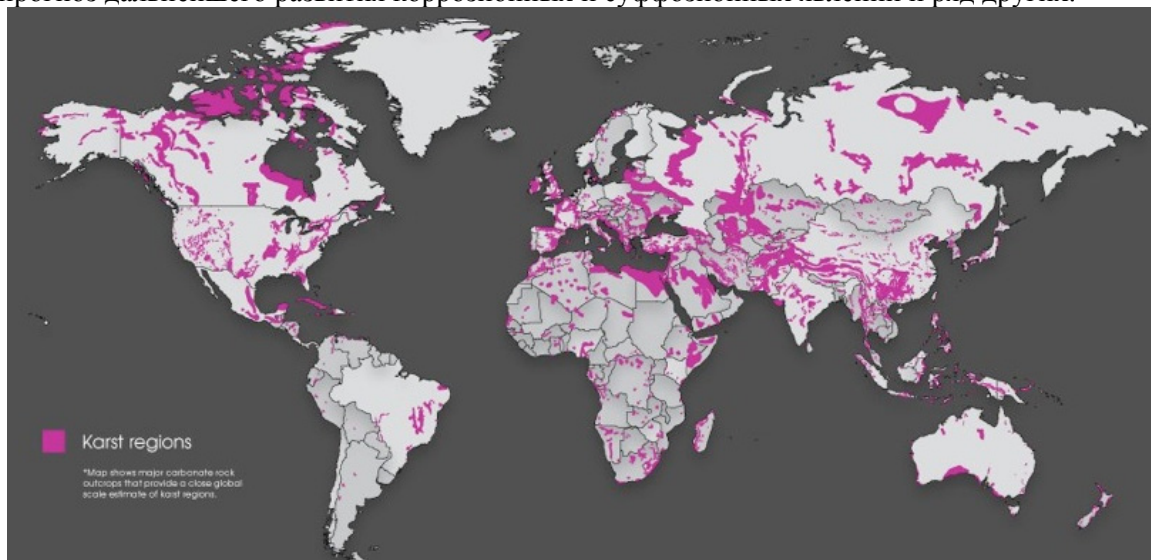
### Введение

Карстовые и суффозионные провалы, хотя вызваны разными процессами, имеют определенное сходство и причиняют немалый вред в городах, населенных пунктах и даже на отдельных участках в сельской местности. Неоднократно ставилась задача прогноза карстовых и суффозионных процессов до момента образования провала на поверхности. Авторы с помощью математического моделирования эффекта от вертикального цилиндра и ряда аналогичных моделей пытаются выявить возможности электроразведки для прогноза опасных подземных полостей до их обрушения.

### История вопроса

Слово "Карст" немецкого происхождения, а происходит оно от места в Словении - Крас - где сильно развиты карстовые явления. Свыше 1/3 земной поверхности сложены породами, в той или иной мере подверженными агрессивному воздействию поверхностных и подземных вод (Рис.1). Обнаженные и погребенные карбонатные породы, гипсы и ангидриты - это породы подверженные карстообразованию. Образование карста, т. е. системы полостей в растворимых породах приводит к резкому изменению поверхностных форм рельефа и, что самое главное, к нарушению внутреннего строения всего объема подвергшихся коррозии пород. Образование карста, т. е. системы полостей в растворимых породах, приводит к нарушению внутреннего строения всего объема подвергшихся эрозии пород и часто проявляется в изменении рельефа местности. Массив закарстованных пород приобретает совершенно иные геотехнические и гидрогеологические свойства в сравнении с массивом тех же пород, не затронутым растворяющим воздействием движущихся подземных вод.

При изучении карста приходится решать две группы тесно связанных друг с другом вопросов. К первой группе относится характеристика геолого-гидрогеологической обстановки, благоприятствующей развитию процессов растворения горных пород, ко второй - непосредственное выявление карстовых полостей и закарстованных зон, выяснение условий движения в них подземных вод, прогноз дальнейшего развития коррозионных и суффозионных явлений и ряд других.



*Рис. 1 Карта суши с зонами, где возможно развитие карста.*

Для возникновения карста необходимо: а) наличие растворимых пород; б) их проницаемость, являющаяся следствием главным образом тектонической трещиноватости; в) активное движение подземных вод, растворяющих горные породы и выносящих продукты растворения.

Суффозия (от лат. *suffosio* — подкапывание) - вынос мелких минеральных частиц породы фильтрующейся через неё водой. Процесс близок к карсту, но отличается от него тем, что суффозия является преимущественно физическим процессом и частицы породы не претерпевают дальнейшего

разрушения. При механической суффозии наблюдается увеличение пористости и уменьшение механической прочности пород.

Суффозия приводит к проседанию вышележащей толщи и образованию западин (суффозионных воронок, блюдец, впадин) диаметром до 10 и даже 100 метров, а также пещер. Другим следствием может быть изменение гранулометрического состава пород как подверженных суффозии, так и являющихся фильтром для вынесенного материала.

Наиболее широкое развитие суффозия получает в области распространения лессов и лессовидных суглинков, под склонами долин рек, часто по ходам роющих животных. Одним из необходимых условий суффозии является наличие в породе как крупных частиц, образующих неподвижный каркас, так и вымывающихся мелких. Вынос начинается лишь с определенных значений напора воды, ниже которых происходит только фильтрация.

В карбонатных и гипсоносных песчано-глинистых отложениях и мергелях карст и суффозия могут проявляться одновременно. Это явление носит название глинистый карст или глинистый псевдокарст.

Для образования подземных пустот необходимо сочетание трех условий:

1. Породы склонные к разрушению (химически или механически).
2. Движение подземных вод.
3. Эвакуация (вынос) продуктов разрушения.

Образование провала (проседания) может являться завершающим этапом нескольких похожих сценариев. Первый - образование подземной пустоты относительно большого размера (пещеры) и обрушение свода; второй - объемная деградация горного массива (образование многочисленных каверн и трещин, уменьшение несущей способности горного массива), механическое разрушение массива и обрушение приповерхностной толщи; третий - деградация минерального скелета (увеличение пористости, уменьшение механической прочности) и уплотнение массива под весом вышележащей толщи.

Карстовые и суффозионные провалы обнаруживаются во многих районах мира. Они не раз отмечались в Москве, в Пермской области (Березняки), в Мексике (и в городе Мехико), в Гватемале (события в которой послужили стимулом для данной работы), в работах в Гватемале участвовала студентка UANL P. Cuevas Castellanos, а их организовал Gerardo Cifuentes Nava (UNAM, Mexico) [Zúñiga-Lara et al., 2011, a, b].

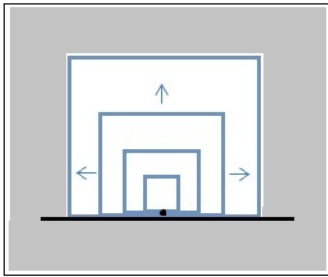


*Рис. 2 Два провала в Гватемале. Расстояние между провалами около 1,5 км.*

Гравиразведка, сейсморазведка, георадар и электроразведка методом сопротивлений могут обнаруживать растущие карстовые провалы, постепенно движущиеся к поверхности земли. С помощью моделирования можно выявить величины аномалий геофизических полей над провалами. Однако практическая реализация геофизического прогноза все еще встречает большие сложности. Провалы могут образоваться в любом месте на огромной территории. Наибольшую опасность они представляют в городах. Но на застроенных территориях мало места для их изучения и велик уровень разнообразных помех. Авторам не известно ни одного случая точного обнаружения провалов до момента их обрушения.

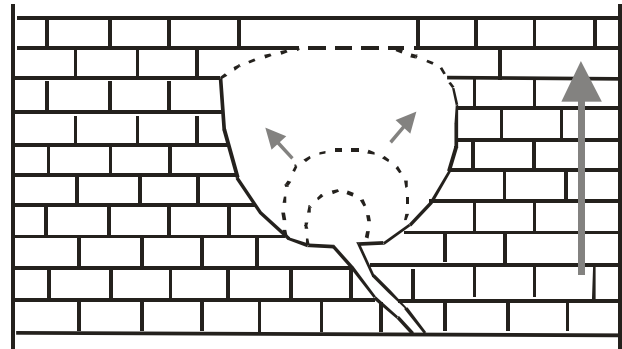
## **Упрощенная статическая модель подземной пустоты**

Разные виды исследования проблемы провалов продолжают, и оценка возможностей электроразведки для их обнаружения представляет интерес.



**Рис. 3** Модель провала, начинается с полости внизу и растет вбок и вверх.

Упрощенная механическая модель полости может быть представлена в виде «цилиндра» (полость) и «поршня» (свод полости). Полость может устойчиво расти до тех пор, пока сдвиговое напряжение на



**Рис. 4** Растущая полость и канал, выводящий продукты разрушения.

стенках «поршня» не превышает предел прочности пород на сдвиг. Если предел роста в стороны достигнут, «поршень» соскальзывает вниз – происходит коллапс с образованием открытого провала. Или происходит частичное обрушение свода с переходом структуры в устойчивое состояние.

Численные оценки могут быть выполнены на основании следующих выражений. Объем «поршня» - свода (Рис.5).

$$V(r) = 2\pi \int_0^r r (H - h(r)) dr$$

Вес «поршня» - свода.

$$P(r) = m \cdot g = V(r) \rho g$$

И его боковая поверхность

$$S(r) = 2\pi r (H - h(r))$$

Сдвиговое напряжение на боковой поверхности.

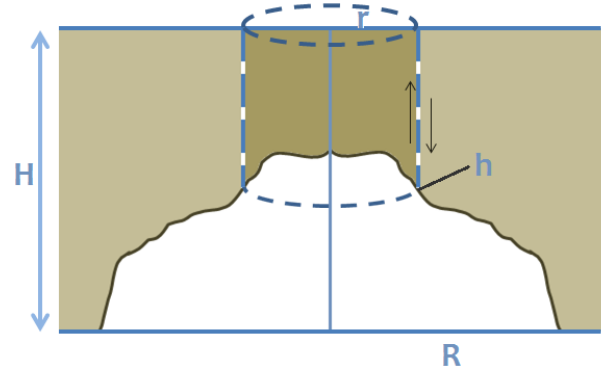
$$\sigma(r) = \frac{P(r)}{S(r)}$$

В простейшем случае плоской поверхности свода цилиндрической (осесимметричной) полости (Рис. 6).

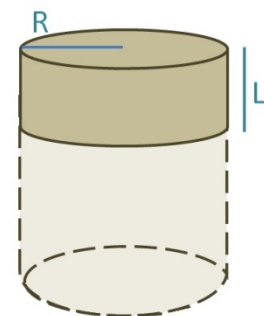
$$\sigma_{\max} = \frac{P}{S} = \frac{\pi R^2 L \rho g}{2\pi R L} = \frac{R \rho g}{2}$$

Максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$ , которое еще поддерживает крышу над пустотой перед ее обрушением зависит от веса крыши  $P$  и площади боковой опоры  $S$ , которая определяется, прежде всего, радиусом  $R$ . Вертикальная мощность крыши  $L$  уходит из формулы и остается только радиус  $R$ .

Таким образом, если известны прочностные свойства горного массива, можно примерно оценить максимальные размеры устойчивой полости. Этот результат, в свою очередь, может использоваться для моделирования и планирования методики электроразведочных исследований.



**Рис. 5** Модель для вывода формулы устойчивости свода.



**Рис. 6** Растущая полость и ее свод.

## Моделирование провала в методе сопротивлений и анализ результатов

Как отмечалось ранее, информации о провалах в столице Гватемалы послужила стимулом для того, чтобы обратиться к задаче 3D моделирования в задачах электроразведки.

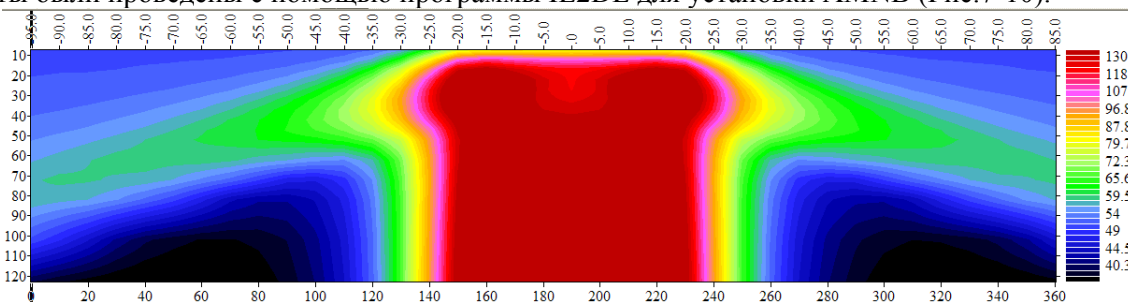
В качестве базовой модели подземной пустоты был выбран вертикальный цилиндр, диаметром 40 м, что примерно соответствуют диаметру «гватемальских» провалов. Нижнее основание взято на глубине 100 м. Верхняя кромка на разной глубине от 6 до 60 м. Сопротивление вмещающей среды взято равным 50 Ом.м, а цилиндра - 5000 Ом.м.

Для расчетов были использованы программы, разработанные на кафедре геофизики МГУ в конце 80-х годов на основе метода интегральных уравнений: IE2DL, IE2DP1 и IE3D1 [Электрическое зондирование..., 1992]. Программа IE2DL (Модин И.Н., Яковлев А.Г.) является аналогом моделирования на электропроводящей бумаге или расчетом поля линейных питающих электродов вблизи двумерных неоднородностей. Программа IE2DP1 (Модин И.Н., Яковлев А.Г., Бобачев А.А.) рассчитывает поле точечных электродов для двумерных объектов при ориентации установки вкрест

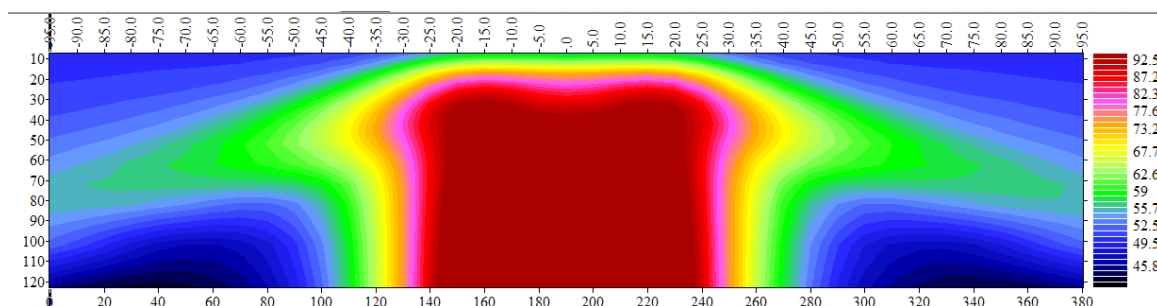
неоднородностей. Программа IE3D1 (Модин И.Н., Яковлев А.Г., Бобачев А.А.) считает поле точечных источников вблизи 3D неоднородности. Эти три программы могут выполнять расчеты для электротомографии.

Три другие программы разработаны А.А.Рыжовым, одна 3DMod считает поле точечных источников вблизи 3D неоднородности, другая Cylinder считает поле горизонтального кругового цилиндра с оболочкой для точечного источника, третья Sphere считает поле шара для точечного источника. Эти программы выполняют расчеты для режима электропрофилеирования с неподвижными питающими электродами. Режим электротомографии для этих трех программ требует огромных затрат труда и поэтому он не применялся.

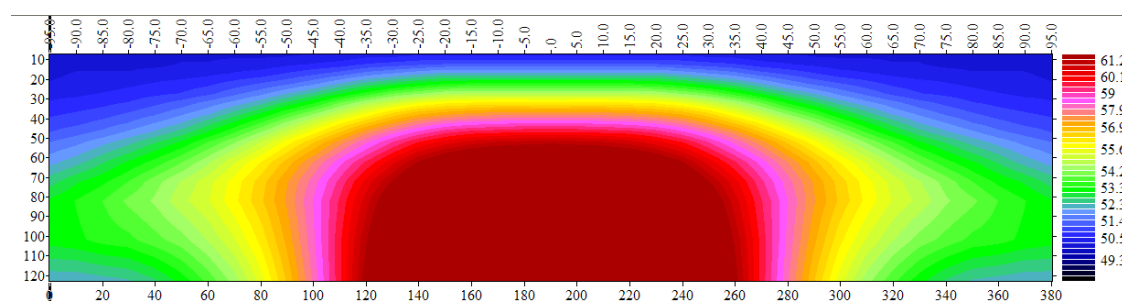
Хотя модель провала требует расчета для вертикального цилиндра и этой задаче ближе соответствуют программы IE3D1 и 3DMod, другие программы, как показывает многолетний опыт их использования, вполне могут применяться для изучения эффектов локальных неоднородностей. Удобство программы IE2DL в быстром создании модели и малом времени расчета. Поэтому первые расчеты были проведены с помощью программы IE2DL для установки AMNB (Рис.7-10).



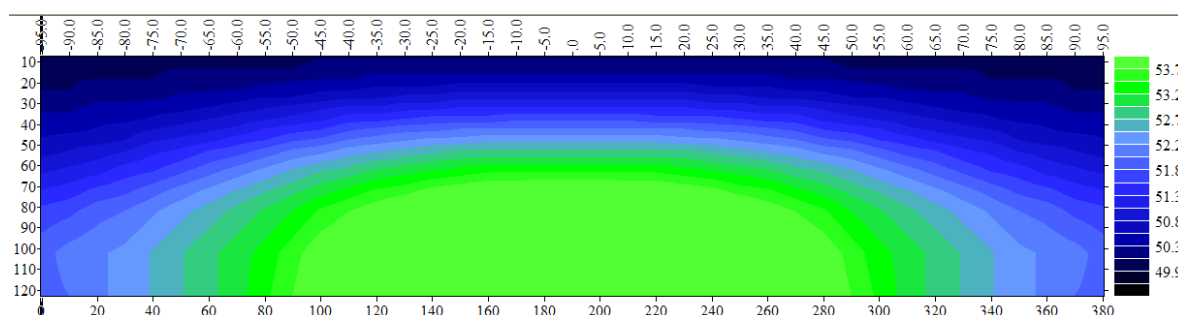
**Рис. 7** Разрез кажущихся сопротивлений для глубины верхней кромки - 6 м. На профиле 39 точек ВЭЗ с шагом 5 м. Разносы 7.5 - 122.5. Линейный масштаб по оси разносов АВ/2.



**Рис. 8** Разрез кажущихся сопротивлений для глубины верхней кромки - 13 м.



**Рис. 9** Разрез кажущихся сопротивлений для глубины верхней кромки - 37 м.

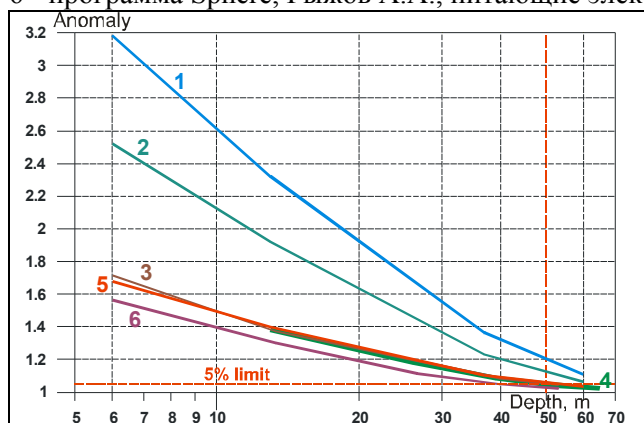


**Рис. 10** Разрез кажущихся сопротивлений для глубины верхней кромки - 60 м.

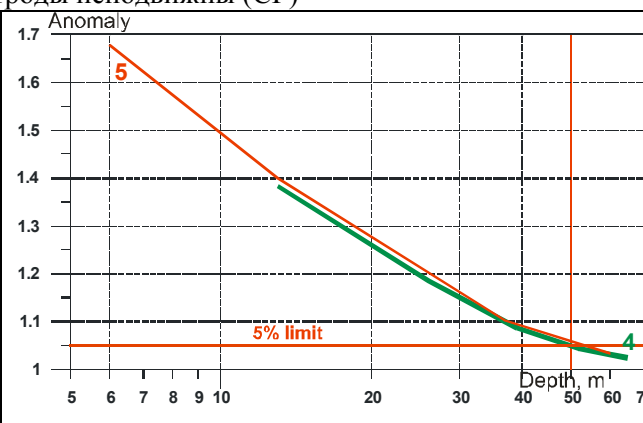


На этих рисунках видно, как убывает поле кажущихся сопротивлений с погружением объекта. Дальнейший анализ можно проводить выявляя максимальное значение кажущегося сопротивления над объектом и нормируя его на сопротивление вмещающей среды (50 Ом.м). Такие графики величины аномалии от глубины были получены для всех программ (Номера на рис. 11,а,б).

- 1 - программа IE2DL (Модин И.Н., Яковлев А.Г.), методика электротомографии (ЭТ)
- 2 - программа IE2DP1 (Модин И.Н., Яковлев А.Г., Бобачев А.А.), методика ЭТ
- 3 - программа А.А.Рыжова Cylinder (горизонтальный круговой цилиндр), питающие электроды неподвижны (СГ)
- 4 - программа 3D моделирования А.А.Рыжова, питающие электроды неподвижны (СГ)
- 5 - программа IE3D1 (Модин И.Н., Яковлев А.Г., Бобачев А.А.), методика ЭТ
- 6 - программа Sphere, Рыжов А.А., питающие электроды неподвижны (СГ)



**Рис. 11,а.** Зависимости величины аномалии от глубины верхней кромки для шести алгоритмов.

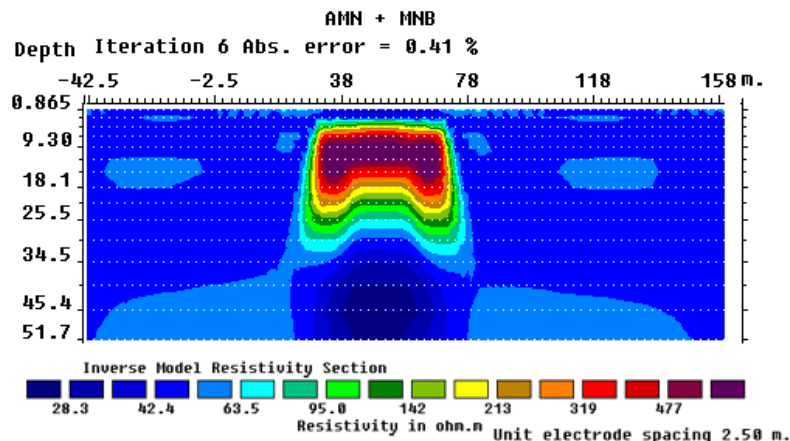


**Рис. 11,б.** Зависимости величины аномалии от глубины верхней кромки для двух алгоритмов.

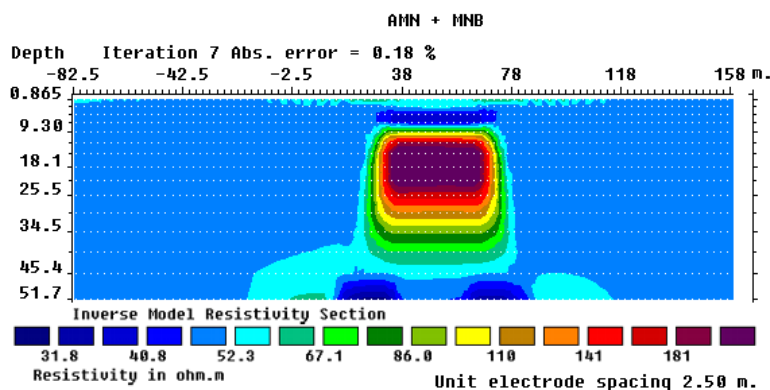
На рисунке 11,а наибольшие аномалии получены для программы IE2DL (для моделирования на листе) (1); моделирование для точечного источника и вертикального пласта (2) дает чуть меньшие аномалии; результаты расчетов для вертикальной призмы по программам МГУ (5) и по Рыжову (4) образуют одну группу, очень близок к ним результат для горизонтального цилиндра по Рыжову (3), наименьшая аномалия получена для шара по Рыжову (6). Расчеты для горизонтального кругового цилиндра и шара Рыжов выполнил для радиуса цилиндра и сферы не 20, а 28.3 м, чтобы добиться эффекта влияния кругового цилиндра и сферы, равных объекту квадратного сечения со стороной 40 м.

На рис.11, б оставлены лишь два графика из шести для модели вертикальной призмы по программам МГУ (5) и по Рыжову (4), практически идентичные. По этим графикам вертикальная призма квадратного сечения со стороной 40 м обнаруживается при глубине верхней кромки до 50 м.

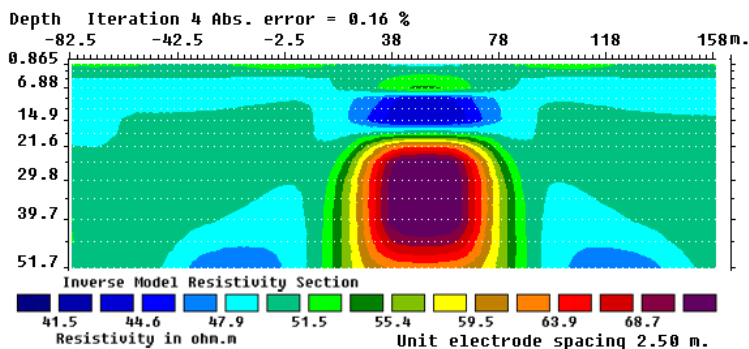
Результаты расчетов по программам МГУ в режиме электротомографии подвергались 2D инверсии по программе Res2DInv (Geotomo Software). Ниже приведены четыре результата расчетов по программе IE3D1 для разной глубины верхней кромки, нижняя кромка всегда находится на 100 м (Рис.12-15).



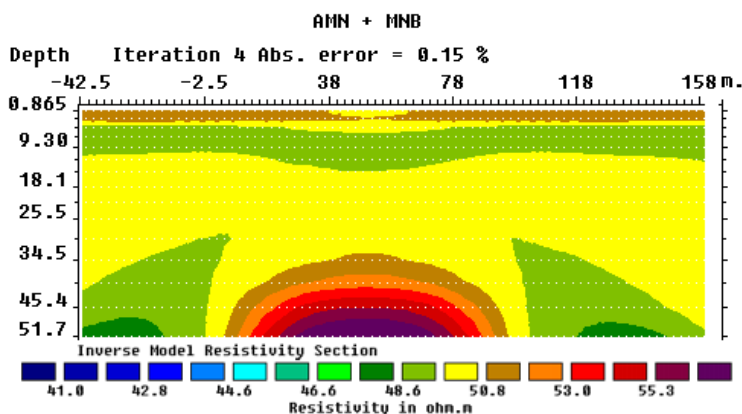
**Рис. 12** 2D инверсия. Глубина верхней кромки 6 м.



*Рис. 13 2D инверсия. Глубина верхней кромки 13 м.*



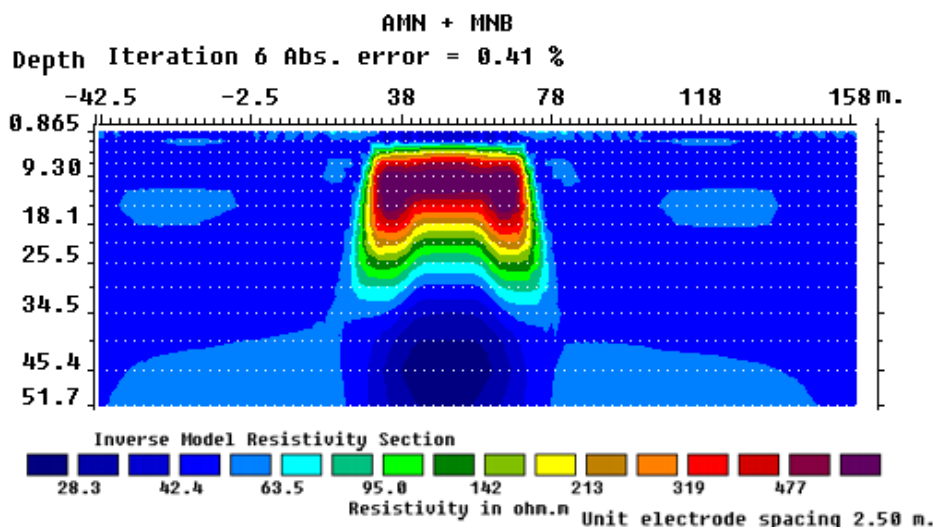
*Рис. 14 2D инверсия. Глубина верхней кромки 37 м.*



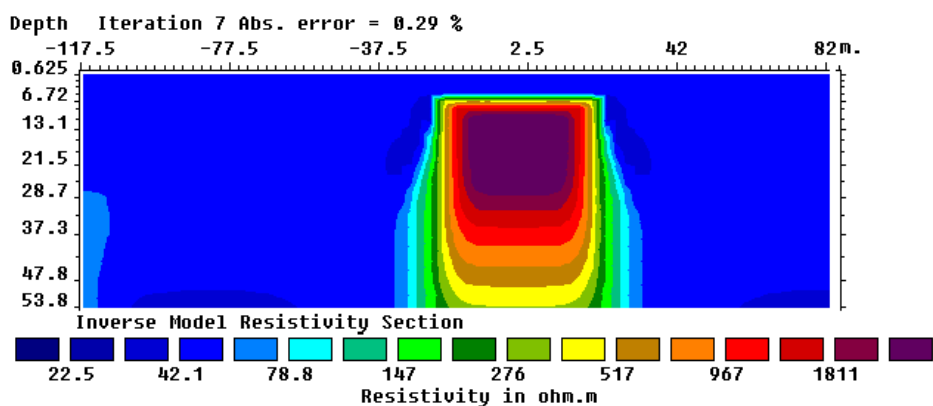
*Рис. 15 2D инверсия. Глубина верхней кромки 60 м.*

Удивительный результат, что объект для глубин нижней кромки 6 и 13 м кажется ограниченным на глубину (Рис.12 и 13). Из-за трехмерности ток обтекает вертикальный цилиндр и с глубиной перестает чувствовать продолжение призмы и ее нижнюю кромку, хотя верхнюю кромку отлично чувствует. После резкого максимума на инверсии появляется сопутствующий ему минимум (Рис. 12), или два минимума (Рис. 13). Когда верхняя кромка находится на глубине 60 м, то размыва нижней кромки нет (просто глубинности не хватает, чтобы этот размыв проявился). Точность оценки глубины верхней кромки с ростом глубины падает.

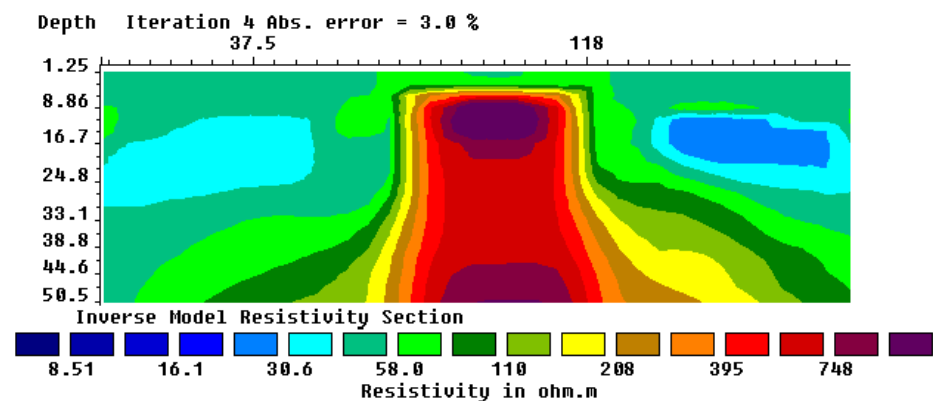
## Сравнение инверсий трех моделей провала в трех программах IE3D1, IE2DP1, IE2DL



**Рис. 16** Результаты инверсии модельных данных для программы IE3D1 - вертикальный цилиндр квадратного сечения до глубины 100 м.



**Рис. 17** Результаты инверсии модельных данных для программы IE2DP1 - вертикальный пласт до глубины 100 м перпендикулярный профилю ЭТ.



**Рис. 18** Результаты инверсии модельных данных для программы IE2DL (чистая двумерная модель - лист бумаги).

ложного ограничения глубины нижней кромки.

Верхняя кромка в показанных трех примерах (Рис.16-18) проявляется близко к 6 м.

## Выводы

Моделирование показало, что вертикальный цилиндр высокого сопротивления диаметром 40 м можно обнаружить электротомографией при глубине верхней кромки до 50 м.

Новым результатом является эффект кажущегося ограничения вертикального цилиндрического объекта по глубине нижней кромки на электротомографии, который сильно проявляется для 3D объекта и значительно слабее для 2D объекта.

Модель IE3D1 после инверсии (рис.16) резко ограничена по глубине. Ток начинает обходить модель цилиндра сбоку и не чувствует продолжения на глубину. Это эффект трехмерного объекта. Опыта работы с подобными объектами в электротомографии пока недостаточно, но видно, что объект с большой глубиной нижней кромки может быть принят за объект резко ограниченный по глубине.

Модель IE2DP1 после инверсии (Рис.17) показывает начало ограничения по глубине. Так как модель это стенка, то обойти ее сбоку нельзя, можно лишь сверху и снизу (на 100 м).

На рис. 18 для модели IE2DL нет явного ограничения по глубине (реальная нижняя кромка на 100 м, на разрезе глубина до 50 м). Невысокое качество инверсии связано с тем, что это не кривые ВЭЗ в 3D среде, это растекание тока в проводящем листе. Форма кривых другая. (Строго говоря, эти результаты IE2DL нельзя подвергать инверсии по программе Res2DInv). Обойти этот объект снизу или сбоку нельзя, поэтому нет

## Литература

Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование: Учебник. Изд. МГУ, 2006 г. 248 стр.

Огильви А.А. Основы инженерной геофизики, Глава 8. М., Недра, 1990.

Огильви А. А. Геоэлектрические методы изучения карста. Изд. МГУ, 1957.

Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003.

Электрическое зондирование геологической среды. 1992. Часть 2. Интерпретация и практическое применение (Хмелевской В.К., Шевнин В.А. Модин И.Н. Яковлев А.Г., .и др.). Изд. МГУ, 200 с. ISBN 5-211-02848-1

Zúñiga Lara R., Chavez R., Cifuentes G., Hernandez E., Tejero A. and Monzon A. Determination of High Risk Zones in Urban Areas. Near Surface Geophysics, EAGE conference, 2011, Leicester, United Kingdom. P31.

Zúñiga Lara R. Detección de zonas de riesgo a lo largo del colector de drenaje poniente de la Ciudad de Guatemala. Tesis de Ingeniero Geofísico, asesor Gerardo Cifuentes Nava, Rene Efraín Chávez Segura. 2011, 102 pp.

## Контактная информация

Шевнин Владимир Алексеевич [shevninvlad@yandex.ru](mailto:shevninvlad@yandex.ru)