

УДК 622.1:550.83

**Тимохин Александр Владимирович**

научный сотрудник  
сектора управления качеством,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, д. 58  
e-mail: [timohin.igduran.geo@mail.ru](mailto:timohin.igduran.geo@mail.ru)

**ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ  
ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ ТЕХНОГЕННОГО И  
ЕСТЕСТВЕННОГО КАРСТОВ\****Аннотация:*

Даны примеры геометризации карстопоявленных для решения задач капитального строительства (электрометрия). Описано влияние горно-геометрических и геологических факторов на методiku и последовательность измерений, интерпретации и регистрации как карстов, так и сплошных (безопасных) массивов. Полезный сигнал геометризации обеспечен необратимостью изменения полыми объектами естественного режима фильтрации как функции разнообразных строений, вмещающих пород и их удельной проницаемости. В принципиальной модели расширены условия и решения, выполненные Б.К. Матвеевым [1] при вычислении влияния скважины. Обоснованы перспективы в депрессионной области полевой электрометрии (электроразведка на постоянном токе, метод сопротивлений, зондирования и площадные съемки) и в глубокой, обводненной области методов геофизического исследования скважин (ГИС) – резистивиметрии и термометрии. Предложены методика и подходы к картированию в объемной постановке, учитывающие различные горно-геометрические параметры полых пространств, режимы фильтрации и проницаемость вмещающих пород. Фактический материал позволяет наглядно оценить особенности и прикладные схемы картирования.

*Ключевые слова:* техногенный и естественный карст, модель фильтрации, регистрация (измерение) геометрии полых объектов и сплошных участков, оценка безопасности

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.071

**Timokhin Alexander V.**

Researcher of Quality Management Sector,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075, Ekaterinburg,  
Mamina-Sibiryaka Str., 58  
email: [timohin.igduran.geo@mail.ru](mailto:timohin.igduran.geo@mail.ru)

**ELECTROMETRIC GEOMETRIZATION  
OF TECHNOGENIC  
AND NATURAL KARSTS***Abstract:*

The paper has given the examples of geometrization of karst effects for solving the problems of capital construction (electrometry). The paper describes the influence of mining and geometric and geological factors on the methodology and sequence of measurements, interpretation and registration of both karsts and solid (safe) rock masses. Useful signal of geometrization is provided by irreversibility of changes by hollow objects of the natural filtration conditions as a function of various structures, host rock masses, rocks and specific permeability. The conceptual model has expanded the conditions and solutions performed by B.K. Matveev [1] in calculating the borehole effect. The paper has justified the prospects of field electrometry (DC electric exploration, resistance method, sounding method and area surveys) in the depression area and the methods of geophysical well logging (GWL), such as resistivity and thermometry, in the deep watered area. The paper has proposed the method and approaches to mapping in a volumetric setting, taking into account various mountain and geometric parameters of hollow spaces, the filtration conditions and the permeability of host rocks. The actual material allows to visually assess the features and applied schemes of mapping.

*Keywords:* technogenic and natural karst, filtration model, registration (measurement) of geometry of hollow objects and solid areas, safety assessment

**Введение**

Изучение опасных процессов при подземной добыче актуально как для отдельного предприятия (необходимо обеспечивать устойчивость собственных капитальных выработок), так и для инфраструктуры на поверхности. На Урале горные работы ведутся под городами и поселками, в Екатеринбурге строится и эксплуатируется метрополитен. В то же время обсуждаются проекты использования земель в пределах

\* Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 11-05-00159) в рамках Государственного задания 007-00293-18-00, тема № 0405-2018-0015.

действующих и ликвидированных (оставленных с зонами техногенного карста) горных отводов.

Технические условия – это условия ведения горных работ под строительными объектами (подрабатываемые территории), условия нового строительства в зонах карста (подработанные территории) и сложившееся на территориях их сочетание [2, 3].

Для картирования целесообразны 2 схемы, отличающиеся по методу и подходу измерениями в статической и динамической постановке при ключевой роли формулы и параметров модели, характеризующей карстогенный режим фильтрации:

1. От параметров фильтрации → через поисковые признаки электрометрии → к параметрам геометрии карстов и сплошности.

2. От параметров, измеренных при резистивиметрии и термометрии в скважинах [1, 4] → через расчеты по модели фильтрации → к параметрам изменения геометрии карстов и сплошности.

### Модель фильтрации

В модели одиночной выработки рассмотрен массив как однородная фильтрующая среда с вложенной в ламинарный поток системой из двух цилиндров с общей осью (рис. 1).

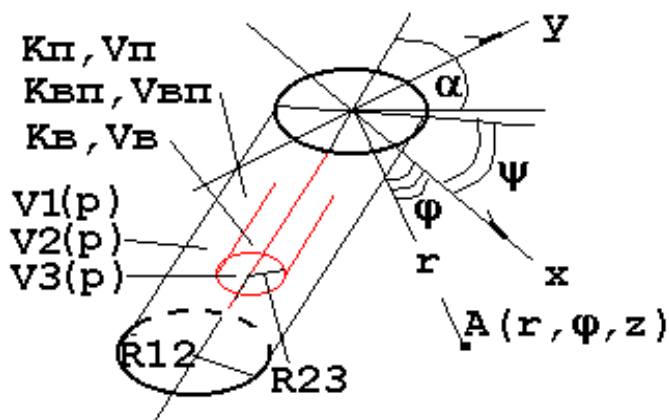


Рис. 1 – Цилиндрическая модель фильтрации

Цилиндр большого радиуса задается полым, а малый, внутренний – сплошным. Сечение выработки имеет, как правило, прямоугольную форму. Геометрией модели допущена аппроксимация сечения эллипсом и окружностью. Искажаемая допуском пространственная область, как ранее показано [5, 6], невелика, на целевое качество решений практически не влияет, но при этом существенно уменьшен объем вычислений. Имеется частный случай – модель Б.К. Матвеева [1, 4] для вертикального полого цилиндра-скважины.

Размеры, пропорции, фильтрационные свойства и ориентировка следующие:  $\alpha$  - угол наклона единой оси цилиндров к горизонтальной плоскости;  $\phi$  - угол между большой осью эллипсов (проекция системы на горизонтальную плоскость) и направлением фильтрации;  $R(1-2)$  и  $R(2-3)$  – радиусы, соответственно, большого и малого цилиндров;  $Kп$ ,  $Kв$ ,  $Kвп$  – коэффициенты фильтрации, соответственно, вмещающей породы; породы, слагающей внутренний цилиндр; полости между цилиндрами (абсолютно проницаемой  $Kвп \rightarrow \infty$ ).

По формуле закона Дарси имеем

$$V = -K \frac{\partial H}{\partial X}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость,  $K$  – коэффициент,  $(-\partial H/\partial X)$  – гидравлический градиент (напор) потока.

Функция потенциала скорости принимает следующий вид:

$$U = KH, \quad (2)$$

при этом  $U$  непрерывна и потенциальна, а значит, удовлетворяет уравнению Лапласа в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (3)$$

Решения уравнения Лапласа для потенциалов скоростей стандартны:

во вмещающей среде 
$$U1 = Vn \cdot r \cdot \cos \varphi + \frac{B1 \cdot \cos \varphi}{r}; \quad (4)$$

в полости между цилиндрами 
$$U2 = A2 \cdot r \cdot \cos \varphi + \frac{B2 \cdot \cos \varphi}{r}; \quad (5)$$

в малом цилиндре 
$$U3 = \frac{A3 \cdot \cos \varphi}{r} + V\epsilon \cdot r \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

где  $B1, A2, B2, A3$  – постоянные коэффициенты, вычисляемые следующим образом.

На поверхностях цилиндров (эллипсах в горизонтальной проекции) выполняется:

для большого цилиндра 
$$r = \frac{R(1-2)}{\sqrt{\cos^2(\varphi-\phi) \cdot \cos(90^\circ - \alpha) + \sin(\varphi+\phi)}}; \quad (7)$$

для малого цилиндра 
$$r = \frac{R(2-3)}{\sqrt{\cos^2(\varphi-\phi) \cdot \cos(90^\circ - \alpha) + \sin(\varphi+\phi)}}. \quad (8)$$

Выражения (7), (8) удовлетворяют граничным условиям, равенству скоростей фильтрации и гидравлических напоров:

$$\frac{\partial U1}{\partial r} = \frac{\partial U2}{\partial r}, \quad \frac{\partial U2}{\partial r} = \frac{\partial U3}{\partial r}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{K1} \cdot U1 = \frac{1}{K2} \cdot U2, \quad \frac{1}{K2} \cdot U2 = \frac{1}{K3} \cdot U3, \quad (10)$$

где  $K1, K2, K3$  – функциональные выражения во взаимовлияющем поле коэффициентов при индексах: 1 – во вмещающей среде, 2 – в полости между цилиндрами, 3 – в малом цилиндре.

При решении (9), (10) для выражений (4) – (6) и граничных условий (7), (8) получены постоянные  $B1, A2, B2, A3$ , подстановка которых в (4) – (6) дает выражения для вычисления потенциалов  $U1, 2, 3$ , а с учетом (2) и (1) – скоростей  $V1,2,3$  ( $r, \varphi, Z = \text{const}$ ).

Реальные объекты отличают входные параметры системы:

1.  $K\epsilon \rightarrow \infty, R(2-3) = 0$  – полый цилиндр: карст, выработка, скважина;
2.  $\frac{R(2-3)}{R(1-2)} = kR$  – проницаемый цилиндр; заполненная фильтрующим материалом подземная выработка; закладка песком и щебнем, закладка обрушением;
3.  $K\epsilon = 0, \frac{R(2-3)}{R(1-2)} = kR$  – условие непроницаемого цилиндра к расчету заполненной подземной выработки в моделях: закладка бетоном, тубинг метрополитена.

Полую область характеризует скорость в 2 раза выше исходной, поправка для скважинных гидрогеологических опытов – цель расчетов Б.К. Матвеева (рис. 2).

Модель шахтного поля во вмещающей среде, представляющая собой сплошные объемы пород с известной проницаемостью (конечные значения фильтрации), получается при последовательном и направленном от фронта притока к области расхода вложения выработок – координированных цилиндров 3-х типов при любом учитываемом их количестве. Сумма прототипов и достоверные входные параметры – гарантия учета всех

известных систем горных работ, принятых в подземном строительстве на месторождениях и в метрополитене. Послойным (сверху вниз), направленным расчетом достигается в модели соответствие любой природной сложности строения реальных геологических сред.

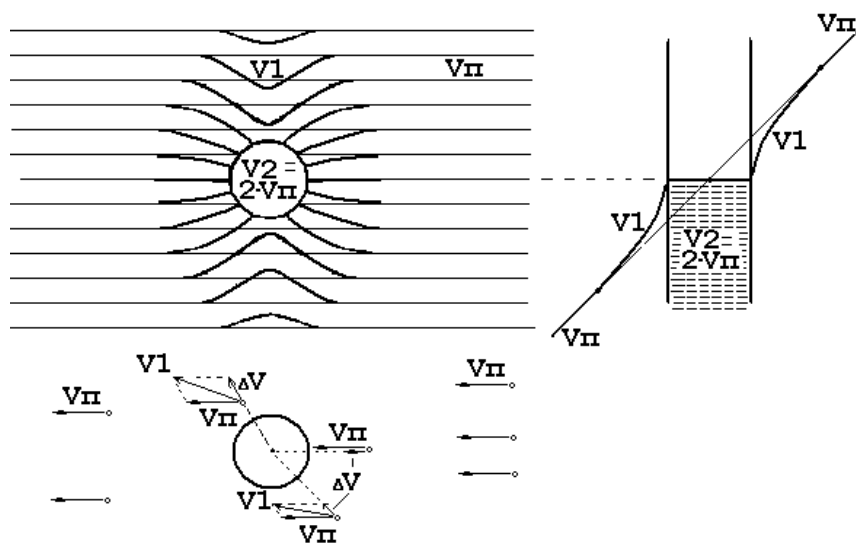


Рис. 2 – Модель изменения скважиной исходного потока фильтрации  
Схема изменения линий потока и разрез [1]; векторная схема [4, 5, 7];  
 $V_n$  – породная область вне зоны влияния,  
 $V_1, V_2$  – область влияния выработки, породная и поля

Максимум «вызванной» скорости  $V_1-3/V_n \sim 6,5 \div 8,5$  и скорости потока  $7,5 \div 9,5 \cdot V_n$  наблюдается в горизонтальной выработке одной трети околоствольной общей протяженности шахтного поля, отдельного выработанного горного объема.

Влияние шахтных полей на исходный режим фильтрации значительно настолько, что, если бы, например, карст был результатом горных работ, выполненных с применением минимизации водопритоков, для чего отдельно предложено применять часть полученных уравнений (смежное применение), выработки, которые, как принято считать, за прошедшие 60 – 150 лет должны бы быть заполнены водой (подтоплены), тем не менее остаются «сухими» и в области шурфа, и в припотолочной области близлежащих горизонтальных выработок [5, 8, 9].

#### *Термины и определения. Комментарий.*

Физический смысл «вызванных» скоростей  $V_1, V_2$ , введенных в вычисления [5, 9], никем ранее специально не рассматривался. Недр в гидрогеологии определяет геометрическое сочетание пород различной (конечной) проницаемости. «Скорость фильтрации» характеризует действующий поток, в каждой точке его фронта она равна скорости в направлении своего максимального размера. «Коэффициент фильтрации» является удельной, абсолютной мерой проницаемости пород, грунтов, а по сути – это скорость при логическом условии наклона уровня грунтовых вод  $45^\circ$ , т.е. при гидравлическом градиенте = 1,0. «Вызванная» скорость является мерой влияния на режим фильтрации выработок как абсолютно проницаемых объектов ( $K \rightarrow \infty$ ). Этим, в частности, обусловлено то, что к  $V_1$  и  $V_2$  понятие скорости в полной мере можно применить лишь в области сформировавшегося потока, поскольку выше по разрезу, как показывают расчеты, поток прерывается. «Вызванная» скорость является логической скоростью фильтрации (размерность скорости фильтрации, м/сут, см/мин, см/с), которая возникает как бы при мгновенном размещении на пути фильтрации отдельной выработки, шахтного

поля в виде векторного слагаемого (приращения и в области притока, и в области расхода) к исходной скорости  $V_n$ .

Поле пространства, в которых скорость равна удвоенной скорости фронта притока, формируют в породной области  $V_1$  неоднородное векторное поле скоростей. Изменение исходного потока депрессионное (водопонижение). Признаками картирования выступают:

1. Содержание воздуха в выработках верхней части массива вплоть до полного их «осушения».
2. Перераспределение скоростей у выработок в глубинной, обводненной части.

*Модель электрического поля (полевая электрометрия)*

Рассматривается поле двух точечных источников тока (рис. 3): А – в сплошном массиве с природной геометрией и сопротивлением пород (ток распространяется); Б – с пустотой, заполненной воздухом ( $\rho \rightarrow \infty$ , ток не распространяется). Пустоты находятся в изучаемой, градиентной области поля; источники – над сплошным массивом.

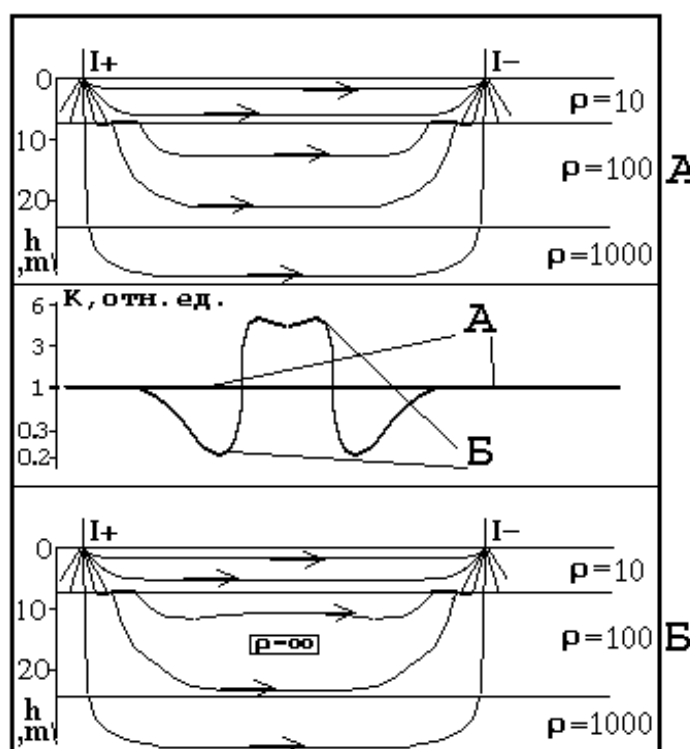


Рис. 3 – Особенности электрического поля:

А – в сплошном массиве горных пород; Б – в массиве с выработкой;  $\rho$  – удельные сопротивления слоев, Ом.м (модель); К – искажение плотности электрического тока, отн. ед.

Напряженность  $E$  и потенциал  $U$  электрического поля связаны уравнением [2]:

$$E = -gradU. \tag{11}$$

Потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \tag{12}$$

Плотность тока  $j$  выражается через напряженность  $E$  и сопротивление  $\rho_1$ , а кажущееся сопротивление  $\rho_k$  через  $j$ :

$$j = \frac{E}{\rho}, \quad \rho_k = jMN \times \frac{\rho MN}{j0}, \tag{13}$$

где  $j_{MN}$ ,  $\rho_{MN}$  – плотность тока и сопротивление вблизи приемных электродов  $MN$ ,  $j_0$  – нормальная плотность в однородной среде.

Граничные условия – равенство потенциалов  $U$  и нормальных составляющих  $j$ :

$$U_1 = U_2, \quad \frac{1}{\rho_1} \times \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \times \frac{\partial U_2}{\partial n}. \quad (14)$$

Силовые линии электрического поля в массиве с выработкой ( $\rho \rightarrow \infty$ ) по сравнению со сплошным массивом перераспределены. За характеристику трансформации электрического поля, вызванной выработкой, принимается «искажение плотности тока»  $K$ :

$$K = \frac{j(\infty)}{j_n} = \frac{\rho_k(\infty)}{\rho_{kn}}, \quad (15)$$

где  $j(\infty)$ ,  $j_n$  – плотности тока;  $\rho_k(\infty)$ ,  $\rho_{kn}$  – кажущиеся электрические сопротивления с индексом  $(\infty)$  – над подработкой, с индексом « $n$ » – над сплошным массивом.

#### *Термины и определения. Комментарий.*

В уравнении (15), как и в модели фильтрации (анализируется  $V1-3/Vn$ ), применена подобная дробь. Сопротивление  $\rho_k(\infty)$  обусловлено влиянием выработки и, подобно скоростям  $V1-3$ , поставлено в числитель. Оно измеряется при профилировании или съемке по методике площадного срединного градиента (ПСГ), перемещается приемная линия  $MN(x, y)$  постоянной длины. Сопротивление  $\rho_{kn}$  характеризует сплошной массив, поэтому поставлено в знаменатель (15). Для его расчета необходимы вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) на удалении от выработок, что гарантируется соблюдением дистанции от участков высоких градиентов ПСГ. Решается «проекционная задача» по специальному алгоритму латеральной (линейной) и глубинной интерполяции, при котором каждой расстановке  $MN(x, y)$  съемки ПСГ ставится в соответствие сопротивление по графикам 4-х ближайших к  $MN(x, y)$  ВЭЗ.

Вычисляемое  $\rho_{kn}$  как на сплошном массиве, так и на дистанции от выработок (в области « $Vn$ ») равно измеряемому  $\rho_k(\infty)$ . Если приемная линия  $MN(x, y)$  установки  $AMNB$  располагается в зоне проекции на земную поверхность области влияния выработок (породной  $V1$  и полый  $V2$ ), фиксируется максимальное отличие этих сопротивлений.

Поля искажений  $K(x, y)$  потенциальны, отображают объемную геометрию карстов и сплошности, вычисления оправданы технологически: решают проблему унификации. Если массив сплошен, то наблюдается  $K$  около 1 и его монотонное изменение. Различные параметры подработки при всем разнообразии геологических условий распознаются на рисунках  $K(x, y)$  по особенностям участков аномальных, абсолютных и дистанционных градиентов.

#### *Условия, опыт применения и результаты полевой электрометрии*

Существенным препятствием инновационного развития средств измерений долгое время служил стереотип о достаточности определенного (т.е. ограниченного) нормативами состава специальных мероприятий. Формальное следование СНиП, отраслевым нормативам (ОСТ, указаниям и инструкциям) дает ложное ощущение полноты противоаварийного обеспечения.

Пик аварийности отмечен в 1990 – 1995 гг. В период 1992 – 2015 гг. информационное окружение изменялось точно. Был утвержден регламент промышленной безопасности, но смежные нормативы обновлены незначительно. В тематической литературе, наряду с продвижением экзотических методов, таких как «лозоходство», привычно активно обсуждается обособленное применение методов изучения деформаций, сохранивших в нормативах максимум ссылок. Малозатратная массовая практика применения

микроразноглубинных георадаров, поверяемая в ходе накопления архивов без успешных корреляций уже почти 20 лет, в нормах не отмечена. Новизну аппаратуры и элементной базы надо подтверждать методикой и техническими решениями.

Картирование и деформационная оценка нормами не предусмотрены или рекомендуются без определения состава работ и порядка применения: не исключаются, но и не затребованы. Бурение над выработками запрещено (в том числе в целях картирования) так же, как на искусственных, неконсолидированных сооружениях: отвалах, шлако- и шламохранилищах, насыпях – поскольку небезопасно (возможно прочтение «не доказано, что безопасно»). Режим периодических наблюдений за деформациями оснований вводится как обязательный:

1. Тогда, когда объект уже построен.
2. Бывает, что момент обнаружения деформаций совпадает с моментом сдачи объекта.
3. Наблюдения за деформациями прекращаются в момент достижения предельного норматива.

Эффекта от применения «отраслевых» данных о геометрии выработок ожидать не приходится. В маркшейдерских архивах имеются сведения лишь о 12 – 30 % площадей, в пределах которых велись горные работы за весь исторический период. Возникают сомнения в достоверности, в правильности ориентировок и положений, накладываемых на современное состояние схем и планов. В выработках зачастую имеют место визуально не диагностируемые (т.е. не вышедшие на поверхность) самообрушения, поэтому практически невозможно определить фактическое положение выработок.

Методика объемного картирования и параметры электротомии были опробованы в ходе измерительных экспериментов, начиная непосредственно с объектов аварий (рис. 4, 5).

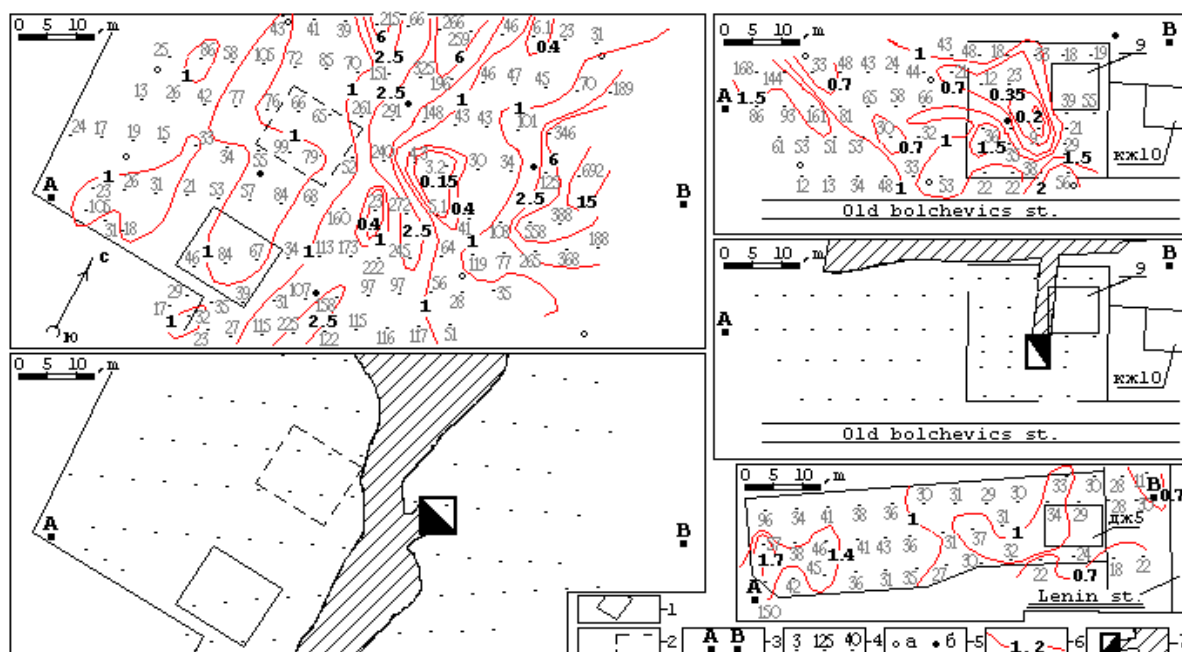


Рис. 4 – Результаты измерений в г. Березовский (1993 – 1999 гг.):

- 1, 2 – построенные и проектируемые здания;
- 3, 4 – расположение питающих электродов и центров линий (=6 м), приемных в съемках ПСГ (цифры- сопротивление рк, Ом.м);
- 5 – ВЭЗ без искажения выработкой (а) и с искажением (б); 6 – изолинии  $K(x, y)$ ;
- 7 – откартированный шурф и зона подработки (штриховка)

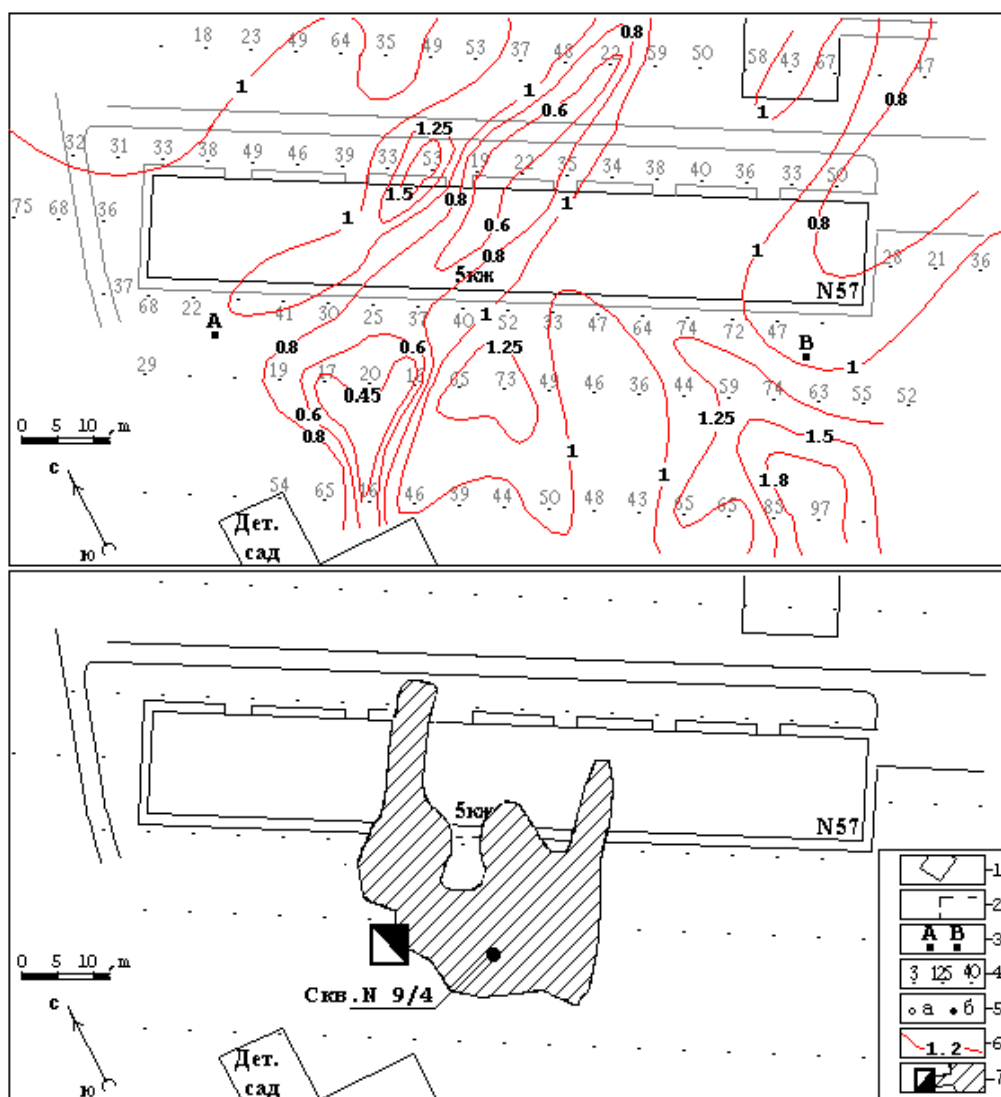


Рис. 5 – Результаты измерений в г. Каменск-Уральский (1994 г.).  
Условные обозначения приведены на рис. 4

Принцип линейной и глубинной регистрации – это сочетание зондирований ВЭЗ (от 2 до 5 на площадь) и ПСГ (съёмка всей площади). Оптимальные линейные размеры расстановок, питающих А, В и приемных М, N электродов, установлены экспериментально.

В г. Березовский, г. Каменск-Уральский техногенный карст – следствие горных работ неглубокого, приповерхностного заложения, которые велись ориентировочно с начала – середины XIX века до 20 – 30-х годов XX века. Добывалось золоторудное (жильное золото в коренных кварц-гранитоидных породах) и железорудное сырье (лимониты в осадочном массиве, приуроченном к зоне разлома).

Извлекалась золоторудная масса на порядок меньше, чем лимониты. Но в условиях близости рудника и горных работ на глубинах 400 – 1500 м за счет усиления фильтрации в надшахтной кровле и на удалении фиксируется воздух в больших сравнительных объемах.

При субвертикальном расположении пустот, если над выработкой не имеется породной кровли (например, на шурфе), наблюдается максимальная частота изолиний, при  $K$  намного меньшем 1, с минимальным непосредственно на шурфе ( $K$  – 0,45; 0,4 и 0,2; 0,15), наклон шурфа всегда соответствует направлению максимального градиента (максимум  $K$  – 1,2; 1,5 и 2,5; 3,0).



В г. Березовский для проектируемого коттеджа необходима дистанция от подработки, хотя построенный и признан безопасным. На ул. Старых Большевиков фундамент возведен непосредственно на шурфе, что является причиной разрушения частного домовладения. Застройщик не запросил данные о выработках, которые имеются в службах рудника и предоставляются по первому требованию архитектурного отдела муниципалитета. Признаков опасных пустот под фундаментом дома по ул. Ленина не выявлено.

Угроза провальных явлений в основном связана с «попаданием» имеющейся застройки в зону воздействия подземных сооружений рудника, с неверной или несвоевременной оценкой развития горных работ, развития пустот в надшахтной кровле.

Для вывода о благополучном размещении фундамента достаточно при объемной интерпретации карстологических рисунков показать, что до глубины 40 – 80 м не имеется горизонтального полого объекта сечением 1,5 x 1,5 м. Запрет на размещение над выработкой несущих элементов, как и на строительство объекта в целом, оправдан, если не доказано, что обрушение за счет естественного процесса разрыхления (объем разрушаемых пород увеличивается по крайней мере в 1,3 – 1,6 раз) выработку заполнит и что на поверхности в виде деформаций обрушений и провальных явлений не отобразится.

При наличии достоверных данных о геометрии пустот и сплошности необходимость деформационных методов неочевидна. В этом преимущество объемного зондирования как основы для горно-геометрического стандарта достоверных и надежных заключений о безопасности и сплошности грунтов и пород под основанием строений.

В г. Каменск-Уральский в панельном 5-этажном доме были выявлены деформации в юго-восточной части одной четвертой протяженности фундамента. В целях картирования по периметру были пробурены скважины, ~ 1800 погонных метров, но документировался сплошной массив. Геометрия подработки, как показали измерения, отличалась от первых предположений. Шурф был выявлен на удалении. Бурение на шурфе недопустимо. По результатам интерпретации разреза был задан сектор, в котором имелась кровля пород, достаточная для устойчивости кондуктора и безопасной проходки. Скважина № 9/4 под плотными породами мощностью 8 м вскрыла выработку до глубины 16 м, на 25 – 40 % заполненную водой. Вертикальный, круглого сечения шурф, называемый «дудкой», выявлен на территории детского сада, вблизи был разбит незатейливый огород, имелись грядки овощей, клубники. Позже говорили, что стало понятно, почему при всем усилии персонала и нескольких поколений воспитанников не удавалось полноценно поливать растения, т. к. почва вскорости была опять сухой.

В районе г. Каменск-Уральский карстогенные причины провальных явлений и деформаций – территории исторической добычи лимонитов, углей и гораздо реже собственно карстующиеся известняки. В настоящее время горные работы не ведутся.

На месторождениях магнетитов вмещающие породы представлены доломитами, карсты естественной природы – угроза устойчивости рабочих зон в карьерах. Измерения выполнялись в рамках эксплуатационной, рудничной разведки (рис. 6). Полые объекты и их геометрия обусловлены морфологией залежей. В силу прироста Mg магнетиты обладают большей плотностью, имеется связь объема пустот с разницей плотности доломита и магнетита. Карст классифицируется как «литологический» [5]. Природа отличается от суффозионной [10]. Наклонные полости имеют «каплевидную» форму, выступают поисковым признаком оруденения в обширной области Саткинской группы месторождений, уверенно картируются, поэтому рисунки *K* имеют выраженное подобие.

Полости не имеют выхода на поверхность, в отличие от выработки с шурфом. Если имеется мощная кровля пород над пустотой с полувертикальным наклоном, то также наблюдается высочайший градиент, но минимальное искажение составляет от 0,8 до 1,0; 1,2 и наблюдается в области минимальной мощности породной кровли над полостью. Наиболее глубинная часть карста характеризуется максимумом искажения  $K=3 \div 3,8$ . Скважина (см. рис. 6, сектор  $K=1,1 \div 1,3$ ) вскрыла полость в интервале глубин от 23 до 28 м.

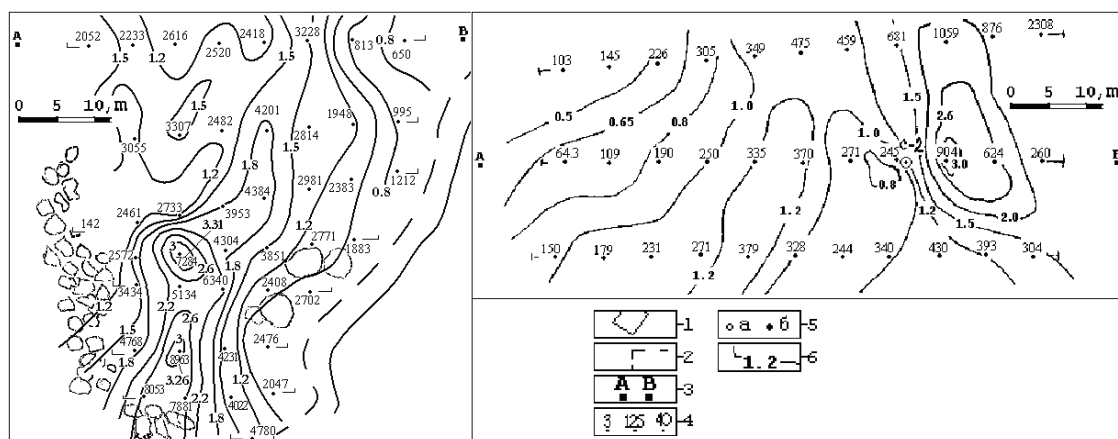


Рис. 6 – Результаты измерений в пределах Саткинской группы месторождений магнетитов (Мельнично-Паленихинский карьер 2004 г., Степной участок 2005 г.)  
Условные обозначения приведены на рис. 4.

### Заключение

Проблема карстовой угрозы застройке и жилым микрорайонам для сырьевых регионов типична и понятна. Проблема развития промышленности и городской среды шире: необходимы инженерные решения, а для принятия решения – информация. За период 1992 – 2015 гг. на Среднем и Южном Урале изучено из числа карстоопасных землеотводов (по общим оценкам от 54 до 280 тыс. га) более 600 га площадей. На территориях обеспечены картирование карстов, документирование их геометрии, меры безопасного бурения (подтверждения); на сплошных массивах, включая ранее отнесенные к подработанным (147 га) без должных оснований и «подозрительные» (более 200 га), сняты запреты. Объекты построены, освоены или находятся в различных стадиях строительства. Выбор графического представления данных в виде карт геометризации (1-я методическая схема) оказался удачным. Персоналу отделов архитектуры, застройщикам для интерпретации карстологических рисунков специальной подготовки не требовалось. В компетенции геофизиков оставлены измерения, соответствие методике, преобразование в формат потенциальных распределений, т. е. построение рисунков изолиний.

### Литература

1. Матвеев Б.К. Геофизические методы изучения движения подземных вод / Б.К. Матвеев. - М.: Госгеолтехиздат, 1963. - 133 с.
2. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология: Учебное пособие для вузов / В.Д. Ломтадзе. - Л.: Недра, 1978. - 496 с.
3. Хаустов А.П. Устойчивость подземной гидросферы и основы экологического нормирования / А.П. Хаустов. - М.: Изд-во: ГЕОС, 2007. - 174 с.
4. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики / А.А. Огильви. - М.: Недра, 1990. - 501 с.
5. Карстогенный режим фильтрации как фактор полезного сигнала электрометрии для регистрации геометрии пустот и сплошности / А.В. Тимохин, Ю.В. Лаптев, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев // Инженерная защита. - 2015. - спецвыпуск № 1. - С. 116 - 126.
6. «Влагомерная» методика электрометрии как принципиальное решение формирования устойчивой, безопасной геометрии добычных блоков на разрабатываемых карьерах месторождениях титаномагнетитов и хризотиласбеста / А.В. Тимохин, Ю.В. Лаптев, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев // Глубинное строение, геодинамика,

тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: VIII научные чтения памяти Ю. П. Булашевича / ИГФ РАН. - Екатеринбург, 2015. - С. 331 - 334.

7. Ратькова Е.И. Подземные воды / Е.И. Ратькова. - Петрозаводск: Изд-во Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ), 2018. - 50 с.

8. Patra H. P. Groundwater Prospecting and Management / H. P. Patra, S. K. Adhikari, S. Kumar.- Springer, 2016.- 234 p.

9. Новые методические возможности инженерной электротометрии в составе эксплуатационной разведки на месторождениях рудных полезных ископаемых / А.В. Тимохин, Ю.В. Лаптев, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев // Geophysics2015 – 11th Eage International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics = Инженерная геофизика 2015. Глава «Теория и практика малоглубинной электроразведки»: Материалы конф. - Геленджик: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2015.

10. Соколов Д.С. Основные условия развития карста / Д.С. Соколов. - М.: Госгеолтехиздат, 1962. - 322 с.