

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛЬНОГО НАЛОЖЕНИЯ ГИДРАВЛИКИ В МОДЕЛЯХ ПУСТОТ КАК ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ

*А. В. Тимохин, В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов,
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Аннотация: Изучение закарстованных территорий на предмет их использования для оптимального размещения объектов недропользования, а также возведения на них инженерных сооружений является важной геотехнологической и эксплуатационной задачей. На основе расчета гидравлических параметров геологической среды показано, что карстовые объекты являются причиной формирования дренажного режима и водопонижения вплоть до осушения этой среды. Установлено, что даже малые размеры карстовых пустот приводят к колебаниям уровня глубинных вод и формированию слоев аэрации. Определено, что в обводненных глубинных толщах разведку и мониторинг карстовых объектов достаточно надежно в сочетании с анализом измеренных скоростей фильтрации по модели гидравлики обеспечивают методы резистивиметрии и термометрии скважин. Тогда как при картировании карстов выше уровня глубинных вод и в покрывающих толщах целесообразно опираться на идентификацию сигнальной аэрации и осушения среды с применением электрометрического метода на основе связи моделей гидравлики и полей электропроводности. Рассмотрены принципиальные возможности геофизических методов картирования карстов. Установлено, что глубина и охват разведки должны превышать размеры очага фильтрационных возмущений в исследуемых массивах. Показано, что регистрация высокочастотных сигналов не позволяет обеспечить достоверность оценки карстологической безопасности.

Ключевые слова: карст, планирование мероприятий безопасности, сигналы фильтрации, электрометрия, обоснование информационных решений, картирование, геотехнология.

Благодарности, финансирование: Авторы выражают особую признательность и большую благодарность коллегам из лаборатории управления качеством минерального сырья ИГД УрО РАН, а также коллективу редакции «Маркшейдерия и недропользование» за поддержку и помощь в написании и оформлении статьи. Работа выполнена в рамках НИР, темы 1 «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

Для цитирования: Тимохин А. В., Кантемиров В. Д., Титов Р. С. Исследование сигнального наложения гидравлики в моделях пустот как обоснование электрометрии для картирования карстопроявлений // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 104–111. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_104_111.

INVESTIGATION OF THE SIGNAL OVERLAP OF HYDRAULICS IN VOID MODELS AS A JUSTIFICATION FOR ELECTROMETRY FOR MAPPING KARST PHENOMENA

*A. V. Timokhin, V. D. Kantemirov, R. S. Titov,
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

Abstract: The study of the karst territories for their use for optimal placement of subsurface use facilities, as well as the construction of engineering structures on them, is an important geotechnological and operational task. Based on the calculation of the hydraulic parameters of the geological environment, the article shows that karst objects are the cause of the formation of drainage regime and water loss, up to the drainage of this environment. It has been established that even small sizes of karst voids lead to fluctuations in the level of deep waters (UGW) and the formation of aeration layers. It is determined that in watered, deep strata, exploration and monitoring of karst objects is sufficiently reliable, in combination with the analysis of measured filtration rates according to the hydraulic model, methods of resistivity and thermometry of wells provide. Whereas, when mapping karsts above the UGV and in the covering strata, it is advisable to rely on the identification of signal aeration and dehumidification of the medium using the electrometric method, based on the connection of models of hydraulics and fields of electrical conductivity. The principal possibilities of geophysical methods of karst mapping are considered. It is established that the depth and coverage of exploration should exceed the size of the focus of filtration disturbances in the studied arrays. It is shown that the registration of high-frequency signals does not allow to ensure the reliability of the assessment of karstological safety.

Keywords: karst, planning of safety measures, filtration signals, electrometry, justification of information solutions, mapping, geo-technology.

Acknowledgments, Funding: The authors express special gratitude and great gratitude to their colleagues from the Laboratory of Mineral Raw Materials Quality Management of the IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as to the editorial staff of «Surveying and Subsoil Use», for their support and assistance in writing and formatting the article. Methodological foundations of the strategy of integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamics of development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №. 1021062010531-8-1.5.1.

For citation: Timokhin A. V., Kantemirov V. D., Titov R. S. Investigation of the signal overlap of hydraulics in void models as a justification for electrometry for mapping karst phenomena. Surveying and subsoil use. 2024;(3):104-111. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_104_111.

Исследование в области снижения риска техногенных катастроф при недропользовании является актуальным практическим направлением изучения опасных явлений как для отдельных горных предприятий, так и для оценки риска реализации инфраструктурных проектов освоения территорий со сложными инженерно-геологическими условиями.

Потенциально опасные по угрозе карстопроявлений территории на осваиваемых землях соответствующего назначения в промышленных регионах РФ сравнительно обширны. Локализация карстов на этих территориях обусловлена двумя типами природы образования: геологической (естественной) и техногенной. Карстоопасное строение территории определяется наличием как отдельных типов этих карстов, так и их сочетаниями.

В строительных нормах и правилах территории развития карстов различают подработанные (техногенный карст) и сложенные карстующимися породами, образованными в процессе суффозии, растворения гипсо-известковистых минералов агрессивными подземными водами (геологическая природа) [1]. Наиболее известны карстопроявления геологической природы как явления карбонатно-терригенных толщ и опасных объектов, образованных суффозией известняка. На месторождениях магнетитов и бокситов естественная природа карстов включает литологический подтип и связывается с уплотнением руд и пород [2, 3]. Помимо природных форм, отмечены еще более существенные по угрозе факторы техногенного карста, связанные с наличием подземных выработанных пространств на отводах действующих, законсервированных и ликвидированных горнодобывающих предприятий [4].

Известно, что обнаружение и идентификация карстов и сплошных (безопасных) массивов лежит в области изучения сигнальных параметров геофизического картирования, где системы измерений служат информационным инструментом поддержки мероприятий по обеспечению безопасности ведения горных работ и строительства.

В настоящее время в связи с возможностью оценки сигналов карстопроявлений, которые характеризуют изменения поля фильтрации (гидравлических параметров), в целях идентификации карстов обсуждаются возможности применения методов электрометрии.

Цель исследований. Разработка инструмента обнаружения, идентификации и картирования карстов как в сплошных, так и в деструктивных (нарушенных) средах на основе геофизических измерений электрометрическим методом.

Методы и материал исследований

Уравнения гидравлики одиночного пустотного объекта в окружении сплошного массива позволяют произвести расчеты сложного влияния естественных карстов и техногенных образований, что реализуется аппаратом теории поля.

Наиболее известным и признанным в практическом использовании к настоящему времени является вывод о влиянии вертикальной гидродинамически совершенной (не изолированной обсадными колоннами и сетчатыми фильтрами) скважины на поток фильтрации. Представления о режиме фильтрации в среде с одиночной скважиной рассмотрены в прикладных решениях теории поля С. А. Коля, Б. К. Матвеева и А. А. Огильви. Изложенный в работе [5] фундаментальный вывод об удвоении в скважине скорости внешнего потока используется в алгоритмах интерпретации откачек и индикаторных методов: резистивиметрии и термометрии.

Оцениваемый массив в модели фильтрации одиночной скважины (одиночного пустотного объекта, выработки) был представлен как однородная фильтрующая среда с вложенной в ламинарный поток системой из двух цилиндров большого и малого радиуса, имеющих общую ось. Цилиндр большого радиуса задается полым, цилиндр малого радиуса является внутренним и задается сплошным (рис. 1).

Однако в силу гидрологических особенностей, формируемых естественным карстом и процессами проходки и выемки горной породы (техногенный карст), применение известного вычислительного аппарата, разработанного Б. К. Матвеевым [5] для наблюдаемой в скважине скорости фильтрации в методах откачек, резистивиметрии и термометрии, в исходном виде не представляется возможным.

Так как для карстов:

1) во внешнем цилиндре модели одиночной скважины практически всегда имеется фильтрующий или изоляционный материал (внутренний малый цилиндр модели);

2) природа формирования естественного карста и способы шахтной проходки (техногенный карст) не дают основания для существования единственно вертикальной модели. Практически все наоборот: чтобы учесть все нюансы, необходима модель наклонных к горизонту объектов.

Сечение большинства горных выработок имеет прямоугольную форму. Геометрией модели допущена аппроксимация сечения окружностью и эллипсом. При этом искажаемая допуском пространственная область, как было показано ранее в работе [6], не велика и на целевое качество решений практически не влияет, но существенно уменьшается объем вычислений. Влияние скважины и модель вертикального по-

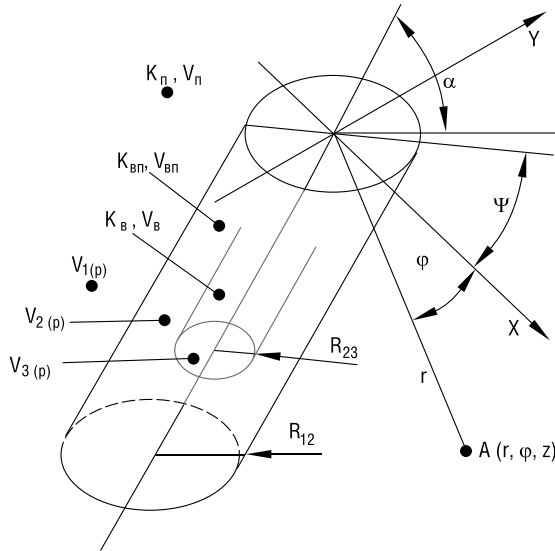


Рис. 1. Цилиндрическая модель фильтрации:

α – угол наклона единой оси цилиндров к горизонтальной плоскости; Ψ – угол между большой осью эллипсов (проекция системы на горизонтальную плоскость) и направлением фильтрации; R_{12} и R_{23} – радиусы соответственно большого и малого цилиндров; K_n , K_b и K_{bn} – коэффициенты фильтрации соответственно вмещающей среды (породы), среды, слагающей внутренний (малый) цилиндр, и полости между цилиндрами (абсолютно проницаемой $K_{bn} \rightarrow \infty$); V_n , V_b и V_{bn} – скорости фильтрации соответственно вмещающей среды, среды, слагающей внутренний цилиндр, и полости между цилиндрами

Fig. 1. Cylindrical filtration model:

α – the angle of inclination of the single axis of the cylinders to the horizontal plane; Ψ – the angle between the large axis of the ellipses (the projection of the system onto a horizontal plane) and the direction of filtration; R_{12} and R_{23} – the radii of the large and small cylinders, respectively; K_n , K_b and K_{bn} – filtration coefficients, respectively, of the host medium (rock), the medium composing the inner (small) cylinder and the cavity between the cylinders (absolutely permeable; V_n , V_b and V_{bn} – filtration rates, respectively, of the host medium, the medium composing the inner cylinder and the cavity between the cylinders

лого цилиндра, раскрываемые в работе Б. К. Матвеева [5], в частном случае оставлены.

По формуле скорости фильтрации жидкостей и газов в пористой среде от градиента напора (закон Дарси) имеем [5]

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

где V – скорость фильтрации, м/сутки; K – коэффициент фильтрации, м/сутки; $\partial H / \partial X$ – гидравлический градиент потока (напора), отн. ед.

Стандартное преобразование теории поля дает выражение функции потенциала скорости [5]

$$u = KH. \quad (2)$$

При этом u непрерывна и потенциальна, а значит, удовлетворяет уравнению Лапласа в цилиндрических координатах [5]:

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

Решение уравнения (3) устанавливает выражения для потенциалов скоростей, которые имеют следующий вид [5]:

✧ во вмещающей среде

$$u_n = V_n r \cos \varphi + \frac{B_1 \cos \varphi}{r}; \quad (4)$$

✧ в полости между цилиндрами

$$u_{bn} = A_2 r \cos \varphi + \frac{B_2 \cos \varphi}{r}; \quad (5)$$

✧ в малом цилиндре

$$u_b = V_b r \cos \varphi + \frac{A_3 \cos \varphi}{r}, \quad (6)$$

где B_1 , A_2 , B_2 , A_3 – постоянные коэффициенты в алгоритмах идентичных объектов (по наклону, размеру и строению); V_n и V_b – скорости фильтрации соответственно вмещающей среды и среды, слагающей внутренний цилиндр (см. рис. 1), м/сутки.

Модельные коэффициенты B_1 , A_2 , B_2 , A_3 вычисляются следующим образом.

На поверхностях цилиндров (эллипсах в проекции горизонта) имеют место равенства:

✧ для большого цилиндра

$$r = \frac{R_{12}}{\sqrt{\cos^2(\varphi - \Psi) \cos(90^\circ - \alpha) + \sin(\varphi + \Psi)}}; \quad (7)$$

✧ для малого цилиндра

$$r = \frac{R_{23}}{\sqrt{\cos^2(\varphi - \Psi) \cos(90^\circ - \alpha) + \sin(\varphi + \Psi)}}, \quad (8)$$

где R_{12} и R_{23} – радиусы соответственно большого и малого цилиндров (рис. 1), м.

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

$$\frac{\partial u_n}{\partial r} = \frac{\partial u_{bn}}{\partial r}, \quad \frac{\partial u_{bn}}{\partial r} = \frac{\partial u_b}{\partial r}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{K_n} u_n = \frac{1}{K_{bn}} u_{bn}, \quad \frac{1}{K_{bn}} u_{bn} = \frac{1}{K_b} u_b. \quad (10)$$

где K_n , K_{bn} и K_b – функциональные выражения коэффициентов фильтрации во взаимовлияющем поле, соответственно во вмещающей среде, в полости между цилиндрами и малом цилиндре.

Далее, решением уравнений (9, 10) для выражений (4–6) и граничных условий (7, 8) определяются постоянные коэффициенты B_1 , A_2 , B_2 , A_3 , подстановка которых в (4–6 при r , φ , $z = \text{const}$) дает выражения для вычисления потенциалов $u_{n(bn, b)}$, а с учетом (2) и (1) – скоростей фильтрации V_{1-3} .

Реальные объекты моделируются вариантами входных параметров:

I. $K_b \rightarrow \infty$, $R_{23} = 0$ – условия полого цилиндра;

II. $R_{23} / R_{12} = kR$ – условия проницаемого цилиндра;

III. $K_g = 0$, $R_{23} / R_{12} = kR$ – условия непроницаемого цилиндра.

Приведенные выше уравнения (1-6) даны в математических стандартах, заимствованных из прототипа [5]. Алгоритм вычисления коэффициентов B_1 , A_2 , B_2 , A_3 по уравнениям (7-10) является предметом новизны постановки решения задачи теории поля и ранее частично был представлен в работах [6, 8].

Расчет параметров объемного поля фильтрационных возмущений, вызываемых карстовыми структурами и подземными выработками, производится как сочетание полых разноориентированных объектов при выполнении вышеуказанных входных параметров (I, II и III).

Еще раз отметим, что полую область характеризует скорость фильтрации в два раза выше исходной скорости, имеющей место в потоке до модельного размещения полого цилиндра. Что ранее в целях вычисления поправок для скважинных гидрогеологических опытов для условия вертикальной выработки было изложено в работе Б. К. Матвеева [5].

Вмещающая породная среда принимается как сплошной однородный массив с известной проницаемостью (конечные значения фильтрации V_n). В каждой координируемой точке горизонтального слоя среды от одиночных разноориентированных объектов вычисляется векторная сумма возмущений (рис. 2).

При расчетах влияния естественных карстов важным является соблюдение направления оценки объектов возмущений, требующее учета литологического строения и расположения их контактов. В моделях влияния подземных выработок особое внимание уделяется геометрической интерпретации исследуемой территории. Для этого используются маркшейдерские данные, при их отсутствии анализируются сведения о ранних способах ведения подземных горных работ, применяемых в исторический период на изучаемых массивах [7-9].

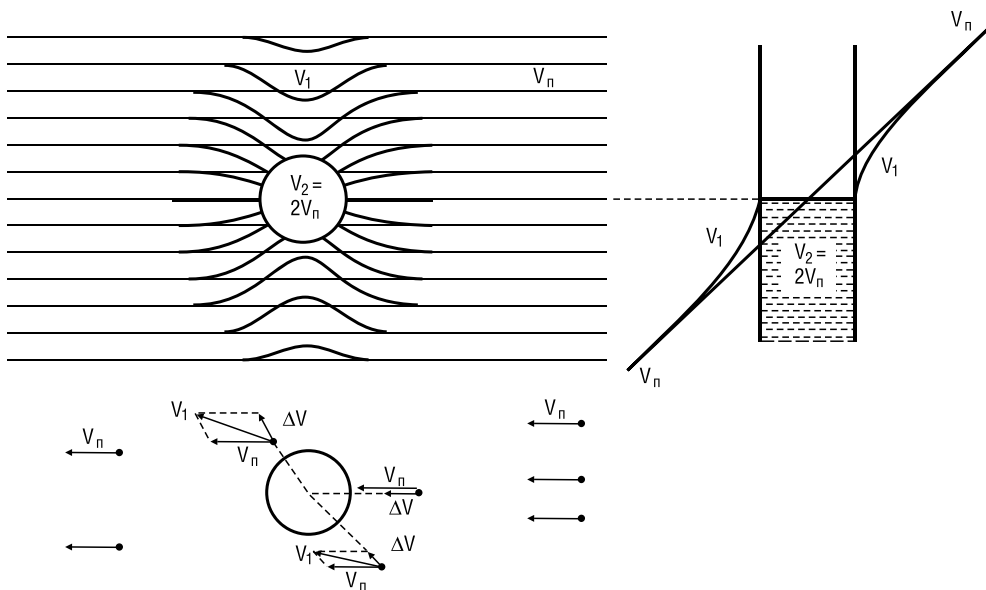


Рис. 2. Модель изменения исходного фильтрационного потока вертикальной выработкой: V_n – скорость потока в породной области (вмещающей среде) вне зоны влияния; V_1 , V_2 – скорости потока фильтрации в области влияния выработки, соответственно породная и полая

Fig. 2. A model for changing the initial filtration flow by vertical production: V_n – the flow rate in the rock region (host medium) outside the zone of influence; V_1 , V_2 – filtration flow rates in the area of production influence, respectively rock and hollow

Анализ фильтрационных возмущений показал, что максимум «вызванной» скорости фильтрации и скорости потока (рис. 2) наблюдается в горизонтальной выработке околоствольной одной трети общей протяженности шахтного поля, отдельного выработанного горного объема. Использование геометрических, входных параметров дало основание для обобщения технических моделей наиболее известных систем подземных горных работ.

Результаты исследований

Для формирования обширной базы иллюстрационных примеров сигнатур и сигналов карстопроявлений моделирование фильтрации позволило конкретизировать водный режим, получить представления о параметрах в послойной глубине проекции и предложить методы геофизических измерений для оценки безопасности – идентификации как сплошных сред, так и деструктивных зон. Расчеты гидравлических параметров геологической среды показали, что полые объекты выступают причиной формирования дренажа и режима водопонижения, вплоть до осушения массива. Первые стадии карстообразования и малые размеры пустот приводят к колебаниям уровня глубин подземных вод УГВ и формированию слоев аэрации [10].

Поскольку карсты представляют собой «очаги» фильтрационных возмущений, то их идентификация может быть реализована на основе геофизических измерений и оценки аномальных параметров. В глубинных обводненных толщах оцениваемого массива хорошие результаты разведки обеспечиваются каротажем скважин методами резистивиметрии и термометрии в сочетании с анализом скоростей фильтрации, измеренных и полученных по модели гидравлики [7]. Тогда как картирование карстов в покрывающих толщах (выше УГВ) целесообразно проводить с применением метода электрометрии с идентификацией сигнальной аэрации и осушения, на основе связи моделей гидравлики и полей электропроводности [8-9].

Развитие метода электрометрии дало возможность использования модели поля электропроводности в качестве инструмента обнаружения, идентификации и картирования карстов как в сплошных, так и в деструктивных (нарушенных) средах. Применение электрометрического метода в задачах поиска карстов позволяет производить их картирование в шахтном и карьерном пространстве.

Для реализации картирования карстов методом электрометрии решались две основные задачи:

1. Рассмотрение параметров гидравлики

и электропроводности как связанных геопотенциальных распределений и их интерпретация на базе математического аппарата теории поля.

2. Изучение и оценка карстогенного режима фильтрации (явлений аэрации, дренирования и осушения) с позиций формирования сигналов обнаружения в динамической постановке.

Принятый подход позволит от прогностических алгоритмов картирования карстов перейти к уровню верификаций геофизических измерителей.

Модель поля электропроводности

По модели объемного глубинного и периферийного поля электропроводности анализируется режим зон аэрации. Полыми объектами в среде сплошного массива обеспечивается снижение степени его влажности до 0,05-0,3 отн. ед., тогда как пустоты и каверны заполнены воздухом – электрическое сопротивление $\rho \rightarrow \infty$, ток не распространяется [10, 13]. Сплошной массив и грунты с естественной упаковкой влагу сохраняют – ток распространяется. Область влияния карста на фильтрационный поток представлена на рисунке 2.

Приближение горных работ обеспечивает попадание карстовых объектов в пространственную область более ярких сигналов обнаружения. Также условия появления ярких сигналов при рассеивании водной массы по очагам перетоков между полыми объектами и, напротив, в паводок, при наложении ламинарных слоев возникают в периоды дренирования и осушения. Пример поля двухточечных источников тока I+ и I- в сплошном и подработанном массивах и изменения электрического поля с охватом сигнального карстового объекта представлены на рисунке 3.

Пример А на рисунке 3 относится к анализу поля в сплошном массиве с природной геометрией и сопротивлением пород (ток распространяется). В примере Б на рисунке 3 анализируется присутствие пустот преимущественно внутри поля и в прилегающих породах – условия заполнения воздухом ($\rho \rightarrow \infty$, ток не распространяется). Пустоты находятся в изучаемой градиентной области поля (источники тока I+ и I- над сплошным массивом).

Для выбора методик измерений важен порядок применения уравнений теории поля:

- 1 – источники тока над проводящим полупространством;
- 2 – источники при различных изучаемых характеристиках геологической среды.

Напряженность E и потенциал U электрического поля связаны следующим уравнением [13]

$$E = -gradU, (11)$$

где U – потенциал электрического поля, В.

Потенциал электрического поля удовлетворяет уравнению Лапласа

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

Плотность тока j выражается через напряженность E и сопротивление ρ , а кажущееся сопротивление ρ_k через j :

$$j = \frac{E}{\rho}, \rho_k = j_{MN} \times \frac{\rho_{MN}}{j_0}, (13)$$

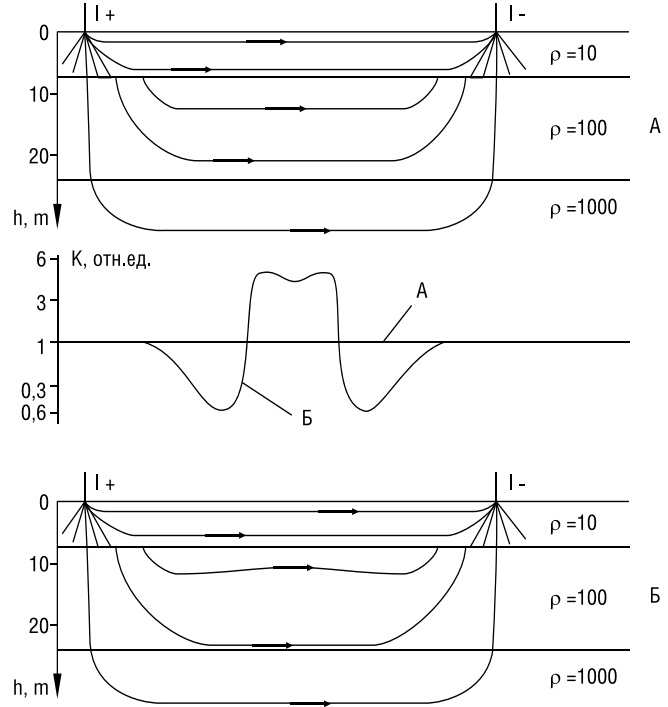


Рис. 3. Эскиз особенностей геометрии преломления силовых линий электрического поля:

А – источники тока над сплошным массивом горных пород; Б – источники тока над массивом с выработкой; ρ – удельные сопротивления слоев, Ом. м (модель); K – искажение плотности электрического тока, отн. ед.

Fig. 3. Sketch of the features of the geometry of refraction of electric field lines: А – sources of electric current over a solid rock mass; Б – sources of electric current above the array with generation; ρ – resistivity of layers, Ohms. m (model); K – distortion of the electric current density, rel. units

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

Граничные условия – равенство потенциалов электрического поля U и нормальных составляющих j :

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

Уравнения (11-14) показывают, что силовые линии электрического поля в массиве с выработкой ($\rho \rightarrow \infty$) по сравнению со сплошным массивом перераспределены (рис. 3) и устанавливают для картирования соответствующие этому параметры и пределы. Выбор существенного для интерпретации параметра дает итог предварительного анализа этих уравнений.

Моделированием установлено, что за характеристику трансформации полым объектом (выработкой и т. п.) электрического поля следует принять специально введенный коэффициент «искажение плотности тока» K_m :

$$K_r = \frac{j_{(\infty)}}{j_n} = \frac{\rho_{k(\infty)}}{\rho_{kn}}, (15)$$

где $j_{(\infty)}$, j_n – плотности тока;

$\rho_{k(\infty)}$, ρ_{kn} – кажущиеся электрические сопротивления соответственно над подработкой и над сплошным массивом.

Уравнение (15) как выражение сигналов электрического поля позволяет связать результаты электрометрических измерений с параметрами гидродинамических моделей, приращениями скорости фильтрации $V_{1-3} / V_n \sim 6,5 \div 8,5$ и скоростями потока $7,5 \div 9,5 V_n$ (рис. 2).

Модели оцениваемых объектов

Модели полых объектов и подземных выработок формулируются на основе цилиндрической модели фильтрации как совокупность цилиндров трех видов при их размещении во вмещающих породах с задаваемыми свойствами фильтрации. Выше указано, что для цилиндрической модели фильтрации (рис. 1) определения модельных коэффициентов B_1, A_2, B_2, A_3 и решения с учетом (2) и (1) уравнений (4-6) дадут определения соответствующих скоростей фильтрации V_{1-3} .

Таким образом, для реальных объектов, моделируемых тремя вариантами входных параметров, будем иметь:

♦ I вариант — вложенный полый цилиндр (рис. 1) при коэффициенте фильтрации $K_g \rightarrow \infty$ и $R_{23} = 0$ характеризует полые объекты, карсты, скважины и горные выработки:

$$\frac{V_1}{V_n} = \cos(\varphi) \cdot \quad (16)$$

$$\cdot \left\{ 1 + \frac{R_{12}^2}{r^2 \cdot (\cos^2(\varphi - \phi) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) + \cos^2(\varphi - \phi))} \right\};$$

$$\frac{V_2}{V_n} = 2 \cdot \cos(\varphi), \quad (17)$$

где V_n — скорость потока во вмещающей среде (в породной области) (рис. 1), м/сутки; V_1, V_2 — скорости фильтрации в области влияния выработки, соответственно вмещающей среды и полости между внутренним и внешним цилиндрами (рис. 1), м/сутки; R_{12} — радиус большого цилиндра (рис. 1), м.

♦ II вариант — вложенный проницаемый цилиндр (рис. 1) характеризует карсты с засыпкой и горные выработки, заполненные фильтрующими материалами, закладкой, песками, щебнем:

выражения для V_1 / V_n варианта соответствуют (16);

$$V_2 = \frac{2 \cos(\varphi)}{1 - kR^2} \cdot$$

$$\left\{ (V_n - V_b kR^2) + \frac{(V_b - V_n) \cdot R_{23}^2}{r^2 \cdot (\cos^2(\varphi - \phi) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) + \cos^2(\varphi - \phi))} \right\}; \quad (18)$$

$$\frac{V_3}{V_b} = \cos(\varphi) \cdot$$

$$\left\{ 1 + \frac{R_{23}^2}{r^2 \cdot (\cos^2(\varphi - \phi) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) + \cos^2(\varphi - \phi))} \right\}, \quad (19)$$

где V_b — скорость потока среды, слагающей внутренний цилиндр (рис. 1), м/сутки; R_{23} — радиусы малого цилиндра (рис. 1), м; V_3 — скорости фильтрации в области влияния выработки, среды, слагающей внутренний цилиндр (рис. 1), м/сутки.

♦ III вариант — непроницаемый цилиндр (рис. 1) при коэффициенте фильтрации $K_g = 0$ и $R_{23} / R_{12} = kR$ характеризует карсты и выработки с закладкой бетоном, туннинг метрополитена:

выражения для V_1 / V_n варианта соответствуют (16);

$$V_2 = \frac{\cos(\varphi)}{1 - kR^2} \cdot$$

$$\cdot \left\{ 1 - \frac{2R_{23}^2}{r^2 \cdot (\cos^2(\varphi - \phi) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) + \cos^2(\varphi - \phi))} \right\}. \quad (20)$$

В породной области, где скорость фильтрации равна V_1 , функция потенциала скорости u_1 непрерывна и потенциальна, выполняется принцип суперпозиции, тогда вектор скорости фильтрации в области влияния примет следующий вид:

$$\vec{V}_1 j(r, \varphi) = \vec{V}_n + \Delta \vec{V} j(r, \varphi), \quad (21)$$

где j — индекс соответствия объекта одной из трех моделей принимает значения 1, 2 и 3;

$\vec{V}_n$ — вектор исходной скорости, м/сутки;

$\vec{V}_1 j(r, \varphi)$ — вектор скорости во вмещающей среде в области влияния соответствующего объекта (длина вектора, т. е. скорость, вычисляется по уравнению (16), м/сутки;

$\Delta \vec{V}_1 j(r, \varphi)$ — «векторный функционал объекта», приращение скорости фильтрации, обусловленное соответствующим объектом. Направленный по течению к центру выработки в области притока и от центра в области расхода.

Любое количество координированных карстовых объектов и выработок, для которых действует принцип суперпозиции, можно выразить через так называемый векторный суммарный функционал объекта:

$$\Delta \vec{V} j(r_0, \varphi_0) = \sum_{n=1}^N \Delta \vec{V}_n j(r_n, \varphi_n). \quad (22)$$

где n — порядковый номер учитываемых объектов от 1 до N ; (r_0, φ_0) — координаты в системе карстовых объектов и горных выработок (шахтного поля); (r_n, φ_n) — координаты относительно центра сечения n -го объекта.

Представленные уравнения являются методической основой для оценки строения реальных геологических сред любой природной сложности и условий ведения подземных горных работ и строительства метрополитена.

Обсуждение результатов. Полые пространства, в которых скорость фильтрации равна удвоенной скорости фронта притока, формируют в породной и пустотной областях общее неоднородное векторное поле скоростей (V_{1-3} / V_n) при депрессионном изменении исходного потока (водопонижении). Особенности вычислений состоят в том, что к V_1 и V_2 физический смысл и понятие скорости в полной мере можно применить лишь в области сформировавшегося потока, поскольку выше по разрезу, как показывают расчеты, поток прерывается.

Анализ поля геологической гидравлики установил, что каждый из параметров V_{1-3} послойных и глубинных проекций является логической скоростью фильтрации, которая возникает как бы при мгновенном размещении на пути потока отдельного объекта, карста или выработки, учитываемых в виде векторных слагаемых (приращений в области притока и области расхода) к исходной скорости V_n .

В изучении карстов верхней части массивов, затронутых водопонижением, накопление сигнальных данных ожидает-

ся в связи с применением измерений методом электрометрии в его объемной постановке [9, 12]. Таким образом, будет пополнена информационная база примеров и сигнальных данных карстопроявлений.

Выводы

1. Установлены принципы измерительных систем картирования карстов. Посредством площадных и периферийно-сгущаемых съемок электрометрии методом сопротивления в сочетании с вертикальными электрозондированиями и преобразования данных измерений в геопотенциальные поля электропроводности были получены алгоритмы и методическая практика оценки закарстованных территорий.

2. Наиболее эффективная оценка исследуемых объектов производится при выполнении условия, где глубина и периферийный охват разведки должен превышать размеры очага фильтрационных возмущений. Однако для развития и совершенствования метода электрометрии в настоящее время не-

обходимо комплексное изучение следов сигнала в незначительном интервале покрывающих толщ.

3. Нежелательны в оценках закарстованности результаты малоглубинной регистрации, не преобразуемые к геопотенциальным полям охвата. Ограничения включают использование в интерпретации высокочастотных сигналов, характеризующих приповерхностные покровные отложения.

4. За период 1992-2022 годов на Среднем и Южном Урале авторами изучено более 600 га площадей с карстоопасными участками при общем их распространении, по разным оценкам, от 54 до 280 тыс. га. На сплошных массивах, ранее отнесенных без должных оснований к подработанным (около 147 га) и «подозрительным» (более 200 га), сняты ограничения. На территориях проведено картирование, документирование и подтверждение геометрии карстов, обеспечены меры безопасности, оценены возможности вариантов предостроительной и эксплуатационной реабилитации. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Свод правил. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. СП 21.13330.2012 [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094386> (дата обращения: 01.05.2024).
2. Wright, V. P. A revised Classification of Limestones / V. P. Wright. // *Sedimentary Geology*. - 1992. - Vol. 76, № 3-4. - P. 177-185.
3. Тимохин, А. В. Руды магнезитов и бокситов как петрофизические объекты спектрально-сортовой оценки на основе электрометрии (из архивов оксид-метрической разведки на месторождениях Урала) / А. В. Тимохин, Р. С. Титов, М. В. Козлова // *Литосфера*. - 2021. - Т. 21, № 3. - С. 431-443.
4. Frank, U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges / U. Frank // *Software & Systems Modeling*. - 2014. - Vol. 13, № 3. - P. 941-962.
5. Матвеев, Б. К. Геофизические методы изучения движения подземных вод / Б. К. Матвеев. - М.: Госгеолтехиздат, 1963. - 133 с.
6. Мельник, В. В. Решение задач безопасности ведения подземных горных работ при отработке угольных лав с использованием современных методов геофизики / В. В. Мельник, Т. Ш. Далатказин, А. Л. Замятин // *Проблемы недропользования*. - 2022. - № 4 (35). - С. 122-131.
7. Тимохин, А. В. Решение проблемы карстологической безопасности Урала с применением измерительных средств картирования и геометризации геолого-техногенных сред / А. В. Тимохин // *Золотодобывающая промышленность*. - 2010. - № 2 (38). - С. 26-29.
8. Харисов, Т. Ф. Геофизические поисково-оценочные исследования в условиях подземного рудника / Т. Ф. Харисов, В. В. Мельник, А. Л. Замятин // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. - 2020. - № 7. - С. 49-55.
9. Шевченко, М. Д. Определение закономерностей расположения тектонических нарушений для прогноза проницаемости массива горных пород / М. Д. Шевченко // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. - 2021. - № 5-2. - С. 174-180.
10. Соколов, Д. С. Основные условия развития карста / Д. С. Соколов. - М.: Госгеолтехиздат, 1962. - 322 с.
11. Хмелевской, В. К. Электроразведка / В. К. Хмелевской. - М.: Изд-во МГУ, 1984. - 422 с.
12. Редозубов, А. А. Специальный курс электроразведки / А. А. Редозубов. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. - 416 с.
13. Бурсиан, В. Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке / В. Р. Бурсиан. - Л.: Недра, 1972. - 368 с.
14. Хмелевской, В. К. Основы геофизических методов / В. К. Хмелевской, В. И. Костицын; Перм. ун-т. - Пермь, 2010. - 400 с.
15. Recent advances in Karst Research: from Theory to fieldwork and Applications / M. Paris, F. Gabrovsek, G. Kaufman, N. Ravbar // *Geological Society*. - 2018. - Vol. 466. - P. 1-24.

REFERENCES

1. A set of rules. Buildings and structures in workable areas and subsidized soils. Buildings and structures on moonlit territories and subsidized soils. SP 21.13330.2012. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200094386> (In Russ.).
2. Wright VP. A revised Classification of Limestones. *Sedimentary Geology*. 1992; №76(3-4):177-85.
3. Timokhin AV, Titov RS, Kozlova MV. Ores of magnesites and bauxites as petrophysical objects of spectral grade assessment based on electrometry (from the archives of oxide-metric exploration in the deposits of the Urals). *Lithosphere*. 2021;21(3):431-43 (In Russ.).
4. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014;13(3):941-62.
5. Matveev BK. Geophysical methods for studying motion groundwater. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1963 (In Russ.).
6. Melnik VV, Dalatkazin TSh, Zamyatin AL. Solving problems of safety of conducting underground mining operations during mining of coal lavas using modern methods of geophysics. *Problems of subsurface use*. 2022;4(35):122-31 (In Russ.).
7. Timokhin AV. Solving the problem of karstological safety of the Urals using measuring tools for mapping and geometrization of geological and man-made environments. *Gold mining industry*. 2010;2(38):26-9 (In Russ.).
8. Kharisov TF, Melnik VV, Zamyatin AL. Geophysical prospecting and evaluation studies in an underground mine. *News of higher educational institutions. Mining journal*. 2020;7:49-55 (In Russ.).

9. Shevchenko MD. Determination of the regularities of the location of tectonic disturbances for forecasting the permeability of a rock mass. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;5-2:174-80 (In Russ.).
10. Sokolov DS. Basic conditions of karst development. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1962 (In Russ.).
11. Khmelevskoy VK. *Elektrorazvedka*. Moscow, 1984 (In Russ.).
12. Redozubov AA. Special course of electrical exploration. Ekaterinburg, 2010 (In Russ.).
13. Bursian VR. Theory of electromagnetic fields used in electrical exploration. Leningrad: Nedra, 1972 (In Russ.).
14. Khmelevskaya VK, Kostisyn VI. Fundamentals of geophysical methods. Perm, 2010 (In Russ.).
15. Paris M, Gabrovsek F, Kaufman G, et al. Recent advances in Karst Research: from Theory to fieldwork and Applications. *Geological Society*. 2018;466:1-24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Тимохин Александр Владимирович:
научный сотрудник,
лаборатория управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: timohin.igduran.geo@mail.ru,
ORCID 0000-0003-1246-0672



Кантемиров Валерий Данилович:
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: ukrkant@mail.ru,
ORCID 0000-0001-6486-2740



Титов Роман Сергеевич:
старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: ukr07@mail.ru,
ORCID 0000-0002-3569-2743

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timokhin Aleksandr Vladimirovich:
researcher,
Laboratory of Quality Management of Mineral Raw Materials,
Institute of Mining, Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia,
e-mail: timohin.igduran.geo@mail.ru,
ORCID 0000-0003-1246-0672

Kantemirov Valery Danilovich:
Ph.D.,
Quality management laboratory chief, Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia,
e-mail: ukrkant@mail.ru,
ORCID 0000-0001-6486-2740

Titov Roman Sergeevich:
senior researcher,
Quality management laboratory,
Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia,
e-mail: ukr07@mail.ru,
ORCID 0000-0002-3569-2743

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



КАЗАНСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Информируем Вас



Подготовка студентов в Институте геологии и нефтегазовых технологий ведется по 2-м направлениям:
05.03.01 Геология и 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Контакты : 420008, Казань, Кремлевская 4/5, Институт геологии нефтегазовых технологий
Тел/факс: (843) 233-71-61. E-mail: geofak@kpfu.ru

WWW.N-GN.RU