

Анализ первого опыта применения геофизических методов при изучении карстового процесса

- Романов В.В., Рыжков В.И., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Воробьев М.А., Фаргиев И.И., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.

Аннотация: В статье анализируется опыт первого применения метода кажущегося сопротивления при выделении водоносных горизонтов в карстовом массиве. Немецкие геофизики впервые доказали эффективность и экономичность наземных геофизических методов при исследовании сложного геодинамического процесса.

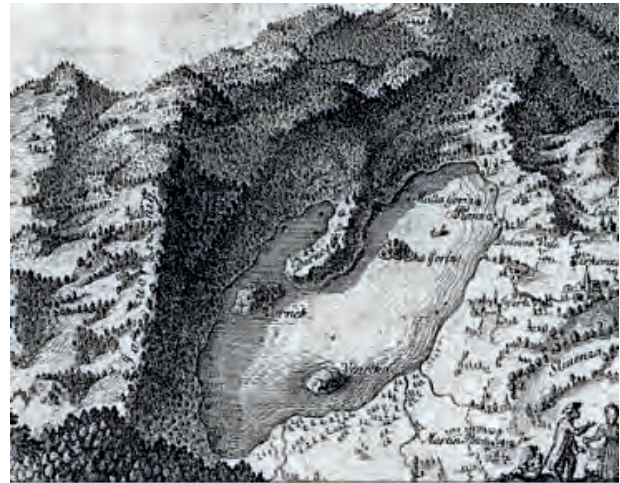
Ключевые слова: карст, электроразведка, установка Веннера.

Введение

Термин «карстовый процесс», означающий растворение подземных водами и последующее выщелачивание (вынос) осадочных горных пород, происходит от немецкой формы «Karst» названия словенского плато Крас исторической области Крайна (Карниола). Плато не только дало название процессу, но и стало своеобразным натурным полигоном для изучения особенностей проявлений карста, взаимодействия растворимых пород с потоками подземных вод и образования специфических форм рельефа. Одно из первых описаний геологии плато приведено в труде 1689 года «Die Ehre des Herzogthums Crain (Слава герцогства Крайна)» словенского учёного Янеза Вайкарда Вальвазора, где рассматриваются значимые проявления карстового процесса — натёчные минеральные образования, ныряющие реки и временные озёра, поноры (ponor), воронки (doline) и поля (polja) [7].

В 1778 году австрийский исследователь Балтазар Аке в работе «Oryctographia Carniolica Physikalische Erdbeschreibung des Herzogthums Krain (Физико-географический очерк герцогства Крайна)» дополнил описание форм карстового рельефа плато Крас (Рисунок 1) и сделал попытку объяснить их происхождение [3].

В работе Ф. Й. Г. фон Хоэнварта (Wegweiser für die Wanderer in der



▲ Рис. 1. Временное карстовое озеро Церкница на гравюре Аке.

berühmten Adelsberger und Kronprinz Ferdinands-Grotte bey Adelsberg in Krain, 1830-1832), где описывается пещера Адельсберг (Постояна Яма), этим словом Karst называется уже не регион, а геологический процесс и формы рельефа, с ними связанные [4]. В докторской диссертации сербского геолога Йована Цвийича «Das Karstphänomen» (1893) были заложены основы науки о карстовых процессах — карстологии и систематизирован перечень терминов в этой области.

Карстовые формы были разделены на поверхностные (эпикарст) и подземные (эндокарст).

В обиход мировой науки вошли названия поверхностных форм — карры (борозды), долины (воронки), увалы (котловины) и поля (впадины) и подземных — поноры (вертикальные каналы), пещеры и галереи, а также шахты.

На основании существующих теорий гидрогеологии карста (грунтовых вод А.Грунда и обособленных водотоков А. Катцера) в карстовом массиве выделяются субгоризонтальные или наклонные уровни подземных вод и отдельные изолированные каналы движения их потоков[5]. Для определения гидрогеологических условий в карстовом массиве необходимо установить параметры карстовых водоносных горизонтов — глубину, наклон и азимут простирания.

Бурение плотной сети скважин является самым точным методом решения этой проблемы, но оно связано с высокими затратами и применяется редко. Вместе с тем, горизонты сильноминерализованных карстовых вод по отношению к вмещающему карбонатному массиву выделяются как хорошо дифференцированные по удельному сопротивлению низкоомные интервалы с резкими границами. Указанные обстоятельства в первой половине XX века предопределили эффективность методов электроразведки при изучении карстового процесса.

Первый опыт применения разведочной геофизики при исследовании карстового процесса изложен в статье немецких учёных Альфреда фон Леонберга и Валтера Стерна[2]. Исследователи впервые применили метод кажущегося сопротивления, запатентованный Конрадом Шлюмберже в 1915 году, для изучения временного озера Церкница (Рисунок 2), представляющего собой карстовую впадину(поле)[5].

Результаты

Электроразведочные работы методом вертикального электрического зондирования были выполнены по сети ортогональных наземных профилей, часть измерений производились повторно, что позволило выполнить мониторинг

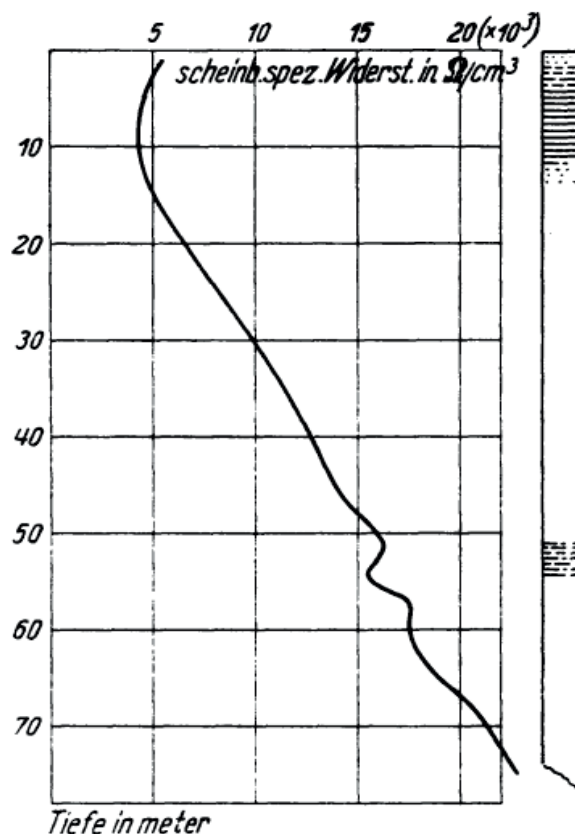


▲ Рис. 2. Поноры озера Церкница.

сезонного колебания уровня грунтовых вод. Результаты измерений представлены в виде кривых зависимости кажущегося удельного сопротивления (*Scheinbar spezifischer Widerstand*) от глубины (*sic!*) (Рисунок 3).

Примечательно, что на диаграммах удельное сопротивление выражено в некорректных единицах (1000 Ом/см^3), правильное обозначение ($1 \text{ кОм}\cdot\text{см}=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), для перевода к СИ значения сопротивления на диаграммах ($1000\cdot\text{Ом/см}^3$) умножаются на 10, в таблицах (Ом/см^3) делятся на 100.

▼ Рис. 3. Кривая ВЭЗ.



Табелла 1. Меßreihen für Meßpunkt II

Sonden- abstand m	Potential- gefälle Millivolt	Stärke des Bodenstromes Milliamp.	Scheinbarer spez. Widerstand	
			Einzelwerte Ω/cm^3	Mittelwerte Ω/cm^3
1	2226	90	15600	17200
1	2371	80	18600	
1	2226	81	17300	
2	694	105	8310	9050
2	737	103	9000	
2	1142	146	9830	
3	320	134	4500	4750
3	343	142	4560	
3	369	133	5230	

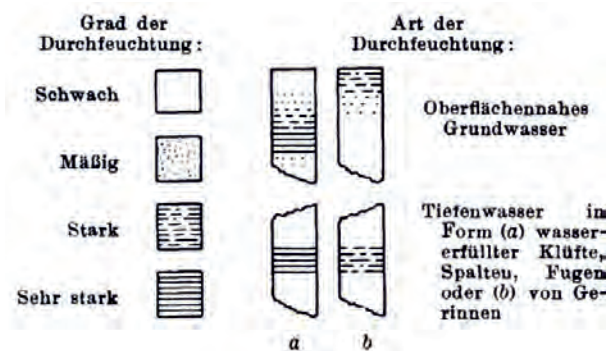
▲ Рис. 4. Фрагмент полевого журнала.

Для понимания исторического контекста следует отметить, что решение прямой задачи ВЭЗ на основе интеграла Ханкеля нулевого порядка было опубликовано только в 1930 году [6], а палетки А.М. Альпина в 1935 году [1].

Поэтому интерпретация на уровне кривых ВЭЗ в 1932 году исторически оправдана, но в любом случае непонятен знак равенства между разносом (Sondenabstand) и глубиной, подразумеваемый авторами. Полевой журнал, приведённый авторами в статье, указывает на особенности измерения кажущего удельного сопротивления в то время — высокие погрешности в определении разности потенциалов, нестабильность генератора по току, линейный шаг разноса питающей линии. Кроме того, данные полевых журналов указывают на применение практически неудобной четырёхэлектродной установки Веннера [8].

Выводы

Несмотря на несколько наивные (с современной точки зрения) подходы к интерпретации результатов электроразведки и несовершенство аппаратуры, полученные авторами результаты дали толчок к началу широкого применения электроразведки в исследовании и мониторинге развития карстового процесса.



▲ Рис. 5. Обозначения при интерпретации кривых ВЭЗ.

Литература

1. Альпин Л. М. Заметки по теории электрической разведки. — М. : ОНТИ. Главная редакция геолого-разведочной и геодезической литературы, 1935. — 44 с.
2. Рекомендации по геофизическому исследованию закарстованности территорий, предназначенных для строительства. — Москва : Стройиздат, 1971. — 43 с.
3. Hacquet B. Oryctographia Carniolica, oder Physikalische Erdbeschreibung des Herzogthums Krain, Istrien, und zum Theil der benachbarten Länder : in 4 Bd. — Leipzig : Johann Gottlob Immanuel Breitkopf, 1778–1789. — URL: dlib.si (дата обращения: 27.05.2026).
4. Hohenwart, F. J. H. von. Wegweiser für die Wanderer in der berühmten Adelsberger und Kronprinz Ferdinands-Grotte bey Adelsberg in Krain. — Laybach : Kleinmayr, 1830–1832. — 3 Bft.
5. Leonberg. A. und W. Stern Ein neuer Weg der karsthydrologischen Forschung durch Anwendung geoelektrischer Methoden. Zeitschrift. f. Geophysik, 6/7. Braunschweig, 1932.
6. Stefanescu S., Schlumberger C., Schlumberger M. // Journal de Physique et le Radium, 1930, Vol. 1, No. 4, P. 132–140. DOI: 10.1051/jphysrad:0193000104013200
7. Valvasor, J. W. Die Ehre deß Herzogthums Crain [Electronic resource] / J. W. Valvasor. — Laybach ; Nürnberg, 1689. — URL: dlib.si (date of access: 28.04.2026).
8. Wenner, F. A Method of Measuring Earth Resistivity / F. Wenner // Bulletin of the Bureau of Standards. — 1915. — Vol. 12, No. 4. — P. 469–478.