ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

УТВЕРЖДАЮ:
Зам.директора института
(И.НАСЕДКИН)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКАРСТОВАННЫХ УЧАСТКОВ

Москва 1972

gost.e-ecolog.ru

П Р Е Д И С Л О В И Е

Настоящие Указания предназначены в качестве методического пособия при проведении геофизических исследований на изысканиях дорог в районах распространения карста. Указания разработаны с учетом современного состояния геофизики и опыта применения ее на объектах транспортного строительства.

Работа выполнена в лаборатории инженерной геологии и геофизики ЦНИИСа канд.техн.наук В.А.Ряполовой при участии канд. геолого-минералогических наук П.И.Яковенко (Уралгипротранс).

Зам.директора института

(И.НАСЕДКИН)

Руководитель отделения
изысканий и проектирования
железных дорог

(Г.ВЕРЦМАН)

I. ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЗАКАРСТОВАННЫХ УЧАСТКАХ ПРИ ДОРОЖНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ

I.I. Карст относится к числу наиболее сложных физико-геологических процессов, особо опасных для устойчивости дорожных сооружений.

Под карстом понимаются процессы, обусловленные деятельностью подземных вод и выражающиеся в выщелачивании растворимых горных пород (известняков, доломитов, гипса, каменной соли); образовании пустот, сопровождающихся часто провалами и оседаниями кровли, воронок, озер и других впадин на земной поверхности (Ф.П.Саваренский).

П о д з е м н ы е п о л о с т и, формирующиеся за счёт выщелачивания растворимых пород на определенной глубине от поверхности земли, являются потенциальными факторами для образования провалов на дневной поверхности земли. Кроме того, наличие подземных полостей в значительной мере может осложнять проходку котлованов при устройстве фундаментов сооружений, а также работу сооружения в процессе эксплуатации.

П р о в а л ы - наиболее распространенные типы карстовых деформаций земной поверхности, поэтому при инженерно-геологической оценке закарстованных территорий должны быть выделены в первую очередь участки с развитием такого рода явлений.

I.2. Различаются следующие литологические типы карста:

а) карбонатный (с подтипами: известняковый, доломитовый, меловой);

б) сульфатный;

в) соляной.

К а р б о н а т н ы й к а р с т распространен наиболее широко, но скорость его развития значительно меньше, чем сульфатного и соляного. В естественных условиях растворение карбонатных пород происходит очень медленно и возможность образования и роста карстовых явлений за период эксплуатации дорожных сооружений практически может не учитываться. Поэтому основное направление инженерно-геологических исследований в районах развития карбонатного карста (кроме общепринятых видов исследований) должно сводиться к установлению положения и оценке возможного влияния на устойчивость проектируемых сооружений уже сформировавшихся подземных полостей.

С у л ь ф а т н ы й к а р с т распространен также достаточно широко. Растворение гипсов и ангидритов и рост карстовых полостей за период эксплуатации сооружений могут быть значительными. Провалы в районах развития сульфатного карста - обычное явление. При инженерно-геологической оценке территории в таких условиях необходимо учитывать не только явления и процессы, сформировавшиеся на момент проведения изысканий, но также должен быть дан прогноз развития карстовых процессов и влияния их на устойчивость сооружения в будущем.

С о л я н о й к а р с т ввиду высокой растворимости каменной соли (318 г/л при 25°С) развивается чрезвычайно быстро.

В естественных условиях развитие карста приурочивается к кровле и краевым частям соляных залежей. Соляной карст имеет ограниченное распространение.

I.3. По особенностям залегания карстующихся пород выделяют следующие типы карста(по Д.С.Соколову):

I. Открытый - карстующиеся породы лежат непосредственно на поверхности;

2. Покрытый:

карстующиеся породы перекрываются слоями нерастворимых водонепроницаемых пород;

карстующиеся породы перекрываются слоями нерастворимых водопроницаемых пород.

По отношению к уровню подземных вод карстующиеся породы залегают:

а) в зоне аэрации;

б) в зоне постоянного водонасыщения;

в) в зонах постоянного водонасыщения и аэрации.

Районы развития открытого карста характеризуются формированием провалов небольших размеров и оседанием пород над карстовыми полостями. Карстово-суффозионные процессы имеют подчиненное развитие.

Близкое залегание карстующихся пород к поверхности земли создает благоприятные предпосылки для эффективного применения геофизических и других видов разведочных работ при инженерно-геологических исследованиях.

Наличие водонепроницаемых пород в кровле карстующейся толщи (в условиях покрытого карста) предохраняет растворимые породы от воздействия особо агрессивных инфильтрующихся поверхностных вод и, таким образом, снижает активность карста. Однако наличие нерастворимых прочных пород в кровле выщелачивающихся пород способствует развитию крупных подземных полостей при обрушении сводов, над которыми формируются крупные провальные явления на поверхности земли(диаметром 100 м и более).

В условиях покрытого карста при наличии в кровле водопроницаемых пород интенсивность развития этого процесса особенно высокая. При этом карстовые деформации земли носят как провальный, так и карстово-суффозионный характер. Следует подчеркнуть, что территории с развитием данного типа карста относятся к числу особенно неблагоприятных в инженерно-геологическом отношении.

Инженерно-геологическое изучение территорий с развитием покрытого карста затруднено в связи с глубоким залеганием карстующихся пород. Поэтому исследования и оценка такого рода площадей будут эффективны при условии применения комплекса методов разведки, геологической съемки, геофизических исследований, бурения, опытно-гидрогеологических работ и др.

I.4. При дорожных изысканиях в карстовых районах основными задачами инженерно-геологических исследований являются:

I. Определение общих закономерностей развития карста в исследуемом районе.

2. Определение границ зон активного карстования в полосе проектируемой дороги.

3. Определение вероятных размеров карстовых провалов на поверхности.

4. Определение интенсивности развития карстового процесса.

5. Определение размеров подземных карстовых полостей.

В результате решения указанных задач:

I. Должна быть дана инженерно-геологическая оценка изучаемой территории.

2. Произведено районирование ее по условиям развития карста.

3. Получены расчетные показатели вероятных размеров провалов и частота их появления на поверхности.

4. Даны рекомендации по борьбе с карстом.

Естественно, что различия условий формирования карста (различные виды карста) в каждой конкретной обстановке вызовут и различные сочетания применяемых методов разведки.

I.5. Решение первой задачи ведется на основе изучения литературных и фондовых материалов, дешифрирования материалов аэросъемки, ознакомления с картографическим материалом, рекогносцировочного обследования в натуре и постановки геофизических исследований.

В результате решения первой задачи дается принципиальная оценка закарстованности изучаемого района и рекомендации по оптимальному положению проектируемой трассы дороги.

Решения остальных задач изучения карста ведутся уже по выбранным вариантам дороги, а при проектировании второго пути - в полосе существующей железнодорожной линии.

I.6. Определение границ зон активного карстования - главная задача инженерно-геологических исследований в карстовых районах.

Как известно (Д.С.Соколов, Н.М.Кухарев и др.), для развития карста необходимы четыре обязательные условия:

наличие растворимых пород;

водопроницаемость горных пород;

наличие подземных вод;

агрессивная способность подземных вод по отношению к растворимым породам.

Отсутствие хотя бы одного из указанных условий исключает возможность развития карстового процесса. Поэтому в пределах территорий, сложенных растворимыми породами, развитие карста наблюдается только на тех участках (зонах), где имеется сочетание всех вышеуказанных условий. Обнаружение зон активного карстования и определение их границ должно вестись с применением комплекса методов: карстово-геоморфологической съемки, геофизических исследований, бурения, опытно-гидрогеологических работ, гидрохимических наблюдений, геохимических исследований.

I.7. Определение вероятных размеров карстовых провалов на поверхности может решаться по известному способу И.А.Саваренского (1963) на основе данных карстово-геоморфологической съемки. Кроме того, ориентировочные размеры провалов могут быть рассчитаны, исходя из теорий горного давления и сдвижения горных пород над подземными выработками (В.Д.Слесарев, С.Г.Аверкин, Бриго).

I.8. Интенсивность карстового процесса важно знать для оценки скорости формирования подземных полостей выщелачивания и соответственно частоты появления карстовых провалов на поверхности. Необходимо отметить, что этот вопрос нуждается в серьезных исследованиях. При решении данной задачи существующими методами (Г.А.Максимович и В.А. Балков, Г.Г.Скворцов, П.И.Яковенко) исходным параметром для расчета расхода потока в интересующем сечении является скорость движения подземных вод.

I.9. Для правильного учета расхода материалов по заполнению карстовых полостей необходимо определить их объем. Важно также знать пространственное положение подземных полостей, форма которых, как правило, весьма причудливая.

2. ИЗУЧЕНИЕ ОБЩЕГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЗАКАРСТОВАННОГО УЧАСТКА И УСЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ КАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОД

2.I. Для уяснения закономерностей развития карстового процесса необходимо получить общее представление об особенностях геологического строения закарстованного участка. Прежде всего следует оценить глубину залегания коренных пород. Как известно, при наличии карстовых явлений она может резко меняться по площади даже на весьма небольших расстояниях. При этом особое внимание должно быть уделено картированию древних эрозионных врезов, которые в значительной мере определяют направление карстовых процессов. Затем надо выявить характер залегания коренных пород, который может существенно влиять на степень активности карста. На тех участках, где породы падают более круто, следует ожидать более интенсивного развития карста. Далее важно определить степень однородности карстующего массива, локализовать в нем участки наиболее растворимых пород и выделить нерастворимые водоупорные слои, которые могут служить защитой от воздействия на нижележащие породы агрессивных атмосферных вод. Наконец, необходимо зафиксировать в массиве все крутопадающие контакты и крупные дизъюнктивные нарушения, способствующие интенсивной циркуляции воды и проникновению ее на большие глубины.

2.2. Ознакомление с геологией района начинается с изучения литературных и фондовых материалов. Особенно тщательному анализу подвергаются результаты предшествующих геофизических работ, проведенных ранее на исследуемом участке или в ближайшей окрестности.

2.3. Ведущими полевыми методами являются вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электропрофилирование (ЭП).

Полевые работы начинаются с постановки опорных ВЭЗ у скважин, если таковые имеются, и рекогносцировочных ВЭЗ на характерных геоморфологических элементах участка. На основании опорных и рекогносцировочных ВЭЗ выбираются разносы для электропрофилирования. Обычно профилирование проводится двойной симметричной установкой AA'MNB'B . При этом большой разнос выбирается так, чтобы с его помощью характеризовать верхнюю часть коренных пород, а меньший, - чтобы осветить характер покровных отложений.

Электропрофили (числом не менее четырех) располагаются параллельно трассе железной или автомобильной дороги по обе стороны от нее и отстоят друг от друга на расстоянии 50-200 м в зависимости от глубины залегания коренных пород, характера рельефа их кровли и конкретной задачи. Шаг между точками измерений зависит от тех же условий и обычно составляет 10-25 м. Точки ЭП сгущаются до 5-10 м на участках древних эрозионных размывов.

По окончании электропрофилирования по тем же линиям ставятся точки ВЭЗ (из расчета в среднем 5-10 точек на 1 км). При этом их главным образом приурочивают ко всем характерным и аномальным участкам электропрофилей. Длина максимального разноса линии AB при зондировании должна быть достаточно большой, чтобы отразить строение карстующегося массива до предполагаемого базиса коррозии.

2.4. Если кривые ВЭЗ на всем исследуемом участке или на какой-либо части его принадлежат к двухслойному типу $\rho_1 < \rho_2$ (где ρ_1 - удельное сопротивление наносов, а ρ_2 - удельное сопротивление коренных пород) и ρ_1 оказывается практически постоянным, результаты электропрофилирования могут быть проинтерпретированы количественно. Для этого оба полуразноса измерительной установки $\ell_1 = \frac{AB'}{2}$ и $\ell_2 = \frac{AB}{2}$ выбирают так, чтобы они приходились на восходя-

цую ветвь кривой ВЭЗ. Полученные значения кажущихся сопротивлений $\rho_к$ наносятся на билогарифмический бланк также, как это делается при построении кривой ВЭЗ, и бланк накладывают на двухслойную палетку таким образом, чтобы ось ρ_1 бланка совпала с осью $\rho_к/\rho_1 = I$ палетки. Сохраняя это условие, бланк передвигают вправо и влево по палетке и добиваются того, чтобы две нанесенные на нем точки легли на одну и ту же палеточную кривую. При таком положении бланка снимают с палетки значения h_1 (глубина залегания коренных пород) и ρ_2 .

Для большей уверенности в постоянстве ρ_1 его целесообразно контролировать через две-три точки профиля, применяя дополнительную установку с малой длиной питающей линии.

4.5. В ряде случаев, когда средний фон $\rho_к$ на электропрофиле сохраняется практически постоянным, коренные породы могут быть разбиты на отдельные разности по признаку "изрезанности" графиков. При этом рекомендуется пользоваться приемом, предложенным Г.А.Соловьевым [29]и основанным на использовании методов математической статистики. Сущность данного способа такова. Сначала график $\rho_к$ разбивают на отдельные равномерные интервалы, включающие, например, IO точек наблюдений. Затем для каждого интервала строят вариограмму, представляющую собой зависимость величины γ от δ:

$$\gamma = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}\left[\rho_к(x_i + \delta) - \rho_к(x_i)\right]^2 , \qquad (I)$$

где n - количество точек на выделенном интервале;
$\rho_к(x_i)$ и $\rho_к(x_i + \delta)$ - значения $\rho_к$ соответственно в точках с координатами x_i и $x_i + \delta$;

δ - переменные величины, кратные расстоянию между пикетами Δx . Для построения вариограммы обычно достаточно иметь пять значений δ: $\delta_1 = \Delta x$; $\delta_2 = 2\Delta x$; $\delta_3 = 3\Delta x$ и т.д.

Результаты вычислений по формуле (I) относят к средней точке интервала.

Если возмущения на графике $\rho_к$ являются случайной

функцией расстояния, то вариограмма будет представлена возрастающей функцией аргумента b (рис.I,а), так как с увеличением расстояния между точками профиля значения $\rho_к$ у них различаются, как правило, все больше. Когда же возмущения распределены равномерно по профилю (например,трещины кливажа), вариограмма имеет вид периодической кривой, образующей максимум (рис.I,б).

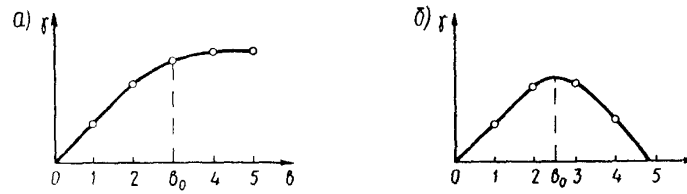

Рис.I. Виды функций $\gamma = f(b)$ (по Г.А.Соловьеву):
а) $\rho_к$ является случайной функцией расстояния;
б) вариации $\rho_к$ имеют периодический характер

Результатом интерпретации каждой вариограммы является абсцисса b_0, которая рассматривается как статистическая характеристика среды. Ей соответствует выход кривой γ на асимптоту или максимум кривой при периодическом характере вариаций.

Найденные по вариограммам значения b_0 наносят на электропрофиль совместно с графиком $\rho_к$, и нанесенные точки соединяют прямыми линиями. К изломам графика b_0 приурочивают контакты различных пород.

Пример построения и интерпретации вариограмм показан на рис.2.

2.6. Если над карстующимися породами залегают рыхлые отложения, мало отличающиеся по удельному электрическому сопротивлению от коренных пород, то для определения глубины залегания последних применяют сейсморазведку. Исследования ведутся корреляционным методом преломленных волн.

При глубине залегания коренных пород не более 20 м применяют одноканальную аппаратуру ОСУ-I или двухканаль-

ную ДОСУ-I. В этом случае возбуждение упругих колебаний производят ударным способом. Когда карстующиеся породы залегают глубже 20 м, исследования осуществляют 24-канальной сейсмостанцией, а упругие волны возбуждают взрывами.

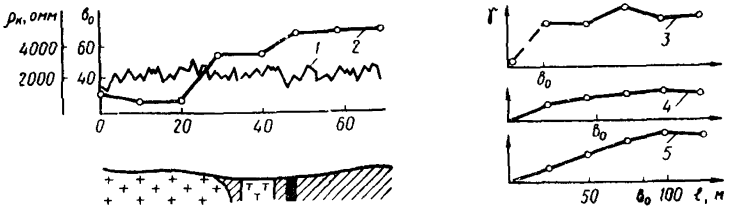

Рис.2. Пример применения вариограмм (по Г.А.Соловьеву)

I - график $\rho_к$; 2 - график t_0 ; 3; 4 и 5 - вариограммы $\rho_к$ соответственно для пикетов 20; 40 и 60

▨ - сланцы; + + + - диориты;
т т т - гипербазиты; ◪ - зона разлома

Расположение профилей, число их и расстояние между ними определяются также, как и при электропрофилировании. Расстояние между сейсмоприемниками при глубине залегания кровли коренных пород до 15-20м составляет 2-5 м, при больших глубинах - 5÷10 м.

Измерения выполняются по методике непрерывного продольного профилирования с использованием встречных и нагоняющих годографов. Для интерпретации полученных результатов пользуются способом t_0 и разностного годографа. В случае мощной зоны выветривания в зависимости от характера последней интерпретацию осуществляют способами О.В.Чибисова, О.К.Кондратьева или Н.И.Павленковой.

2.7. Наиболее полное представление об изменении литологического характера коренных пород по глубине дают результаты каротажных исследований. Данные каротажа используют также как опорный материал при интерпретации резуль-

татов наземной геофизики. Каротаж необходимо проводить во всех скважинах, пройденных полностью или частично толщу каротующихся пород ниже уровня грунтовых вод. Измерения геофизических параметров в скважинах осуществляют как непрерывно используя каротажные станции любого типа, так и поточечно применяя разборные каротажные установки.

Для исследований применяют методы кажущихся сопротивлений (КС), собственной поляризации (ПС), вызванной поляризации (ВП), микрокаротаж и гамма-каротаж (ГК). К обязательным относятся методы КС и ГК. К другим прибегают лишь при определенных геологических условиях.

Что касается метода сопротивлений, то при малом числе скважин на объекте его предпочтительней ставить в модификации бокового каротажного зондирования (БКЗ). При большом количестве скважин и выдержанном геологическом разрезе можно ограничиться измерениями с двумя стандартными зондами: обращенным градиент - зондом и потенциал - зондом, образованным из первого путем изменения назначения его крайних электродов. Длину стандартного зонда устанавливают экспериментально по результатам БКЗ в первой из исследуемых скважин.

Данные каротажа КС и ГК сопоставляют с данными керкового бурения, и определенные значения геофизических параметров сопоставляют с определенными разновидностями пород.

Целесообразность постановки метода ПС устанавливается опытным путем. При достаточной дифференциации диаграмм метод ставится во всех скважинах. Данные метода ПС используются главным образом для сравнительной оценки содержания в породах глинистого материала, что косвенно отражает их относительную водопроницаемость.

Микрокаротаж находит применение в тех случаях, когда в разрезе предполагается наличие маломощных глинистых прослоев. Исследования выполняются по общепринятой методике со стандартными микрозондами заводского изготовления. Глинистые прослои выделяются на диаграммах по совпадению зна-

чений КС, замеренных градиент-микрозондом и потенциал-микрозондом.

Метод ВП рекомендуется ставить в тех случаях, когда возникает необходимость в разделении известняков и доломитов. Доломиты обычно отличаются от известняков большей длительностью спада вызванной разности поляризации.

Исходя из этого, способ исследований по методу ВП должен сводиться в основном к регистрации зависимостей $\Delta U_{\delta n} = f(t)$ в отдельных точках разреза, намечаемых по сводной каротажной диаграмме,

где $\Delta U_{\delta n}$ - вызванная разность потенциалов, а t - время, прошедшее после выключения тока.

Для регистрации искомой зависимости зонд останавливают в средней точке исследуемого интервала. Затем на 2 мин включают поляризующий ток и после его выключения наблюдают за изменением $\Delta U_{\delta n}$. Наблюдения можно вести или путем фиксации отдельных значений $\Delta U_{\delta n}$ через равные промежутки времени, или путем записи непрерывной кривой ее спада на осциллографе. Для производства такого рода измерений в равной степени пригодна как полевая, так и каротажная аппаратура.

2.8. В результате выполненных исследований должны быть составлены:

- карта типов кривых ВЭЗ;
- карта $\rho_к$, полученного при ЭП с большим разносом установки;
- геоэлектрические разрезы по профилям с графиками $\rho_к$ и δ_0;
- геосейсмические разрезы;
- корреляционные схемы между скважинами, построенные по каротажным диаграммам.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА, МОЩНОСТИ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ НАНОСОВ

3.1. Мощность и состав покровных образований сильно влияют на развитие карста. Чем меньше мощность и больше

водопроницаемость отложений, тем сильнее инфильтрация метеорных вод и интенсивнее процессы карстообразования. Кроме этого, состав наносов определяет возможность возникновения таких вторичных явлений, как суффозия и обрушение. Таким образом, очевидно, что в случае покрытого карста изучению покровных отложений должно быть уделено особое внимание.

3.2. Общее представление о характере, особенностях залегания и мощностях отложений, перекрывающих толщу карстующихся пород, получают в результате анализа кривых ВЭЗ в процессе решения предыдущей задачи. Особенно тщательному рассмотрению подвергаются опорные кривые ВЭЗ, снятые у скважин. На основе сопоставления данных электроразведки с данными бурения составляют таблицу удельных сопротивлений пород, где указываются пределы их колебаний и закономерности изменения по исследуемому участку. При отсутствии скважин руководствуются следующими соображениями. Относительно высокие сопротивления (более 50 омм)[1] обычно соответствуют крупнообломочным разностям пород и коррелируются с повышенной водопроницаемостью. Пониженные сопротивления (менее 20 омм) чаще бывают обусловлены глинистыми отложениями и являются признаком относительно низкой водопроницаемости.

При отчетливой дифференциации по сопротивлению пород надопорной толщи и достаточно четкому проявлению каждой их разновидности на кривых ВЭЗ для оценки мощности и состава пород можно ограничиться проведенными ранее исследованиями и лишь на отдельных сомнительных участках поставить дополнительные ВЭЗ с относительно небольшой максимальной длиной питающей линии.

3.3. Если левая часть кривых ВЭЗ, отвечающая покровным отложениям, слабо дифференцирована, и на участке исследования отсутствуют скважины, подтверждающие однородность наносов, то кривые ВЭЗ подвергаются трансформации по

[1] Имеются в виду районы распространения пресных вод.

методу вычитания полей (20). Пересчет кажущихся сопротивлений $\rho_к$ в кажущиеся сопротивления $\rho_т$ производится по формуле

$$\rho_т = \frac{\ell_2 - \ell_1}{\frac{\rho_{к_2}}{\ell_2} - \frac{\rho_{к_1}}{\ell_1}}, \qquad (2)$$

где $\rho_{к_1}$ и $\rho_{к_2}$ - кажущиеся сопротивления, соответствующие смежным разносам ℓ_1 и ℓ_2.

Вычисленные значения $\rho_т$ относятся к разносу

$$\ell_0 = \frac{\ell_1 + \ell_2}{2}.$$

По кривым $\rho_т$ корректируют тип геоэлектрического разреза, в результате чего более обоснованно осуществляют выбор способа интерпретации кривых ВЭЗ $\rho_к$. Возможна и непосредственная интерпретация таких кривых ВЭЗ $\rho_т$ по специальным палеткам.

3.4. Если предполагается, что покровные отложения неоднородны по составу, и наряду с песками и глинами среди них встречаются промежуточные разности, то для изучения этих отложений ставится метод вызванной поляризации (ВП) в модификации вертикального электрического зондирования. Исследования могут выполняться как с приставкой к прибору ЭСК-1, так и со специальными станциями типа ВПО.

Методика работ выбирается в зависимости от поляризационных свойств изучаемых пород и наличия промышленных помех в районе работ. В общем случае измерения ведутся в режиме длительной (двухминутной) зарядки среды. При этом для каждой разновидности породы получают четыре параметра: удельное сопротивление ρ, поляризуемость η и два временных параметра: время релаксации самой долгоживущей экспоненты τ и параметр α, определяющий характер спада кривой $\Delta U_{вп}$ в первые 5 сек после выключения тока [16]. Если в районе наблюдаются промышленные помехи или, если оказывается, что параметр τ не дает дополнительной информации о разрезе, то измерения предпочтительней осуществлять в режиме краткопериодных разнополярных импульсов. В этом случае получают только три параметра: ρ, η и α.

В полевых условиях получают кривые кажущихся параметров $\rho_к$, $\eta_к$, $\tau_к$ и $\alpha_к$. Обработку полевых материалов и их интерпретацию производят в соответствии с [16].

Для более уверенного литологического расчленения покровных отложений по данным метода ВП последние увязываются с разрезами опорных скважин. Если таковых на участке не имеется, то следует руководствоваться следующими критериями. Глины, как правило, характеризуются весьма низкими значениями параметров η, τ и ρ. Суглинки и супеси (за исключением пылеватых) выделяются среди прочих отложений самыми большими величинами η и τ. Пески проявляются в большинстве случаев промежуточными значениями параметров η и τ при относительно высоких ρ и уменьшающейся с ростом крупности зерен песка величиной α. Гравийно-галечные и валунные отложения отличаются наиболее высокими значениями ρ при низких параметрах η и τ. Аномально низкие η и τ присущи всем видам пылеватых грунтов.

3.5. В результате выполненных работ должны быть уточнены и детализированы верхние части геоэлектрических разрезов.

В случае площадных исследований представляет также интерес построение карты покровных отложений и карты мощностей этих отложений (если вариации мощностей значительны).

4. ВЫДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОВАТЫХ И ЗАКАРСТОВАННЫХ ЗОН И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ

4.1. Трещиноватость пород служит необходимой предпосылкой для развития карста. Зоны повышенной трещиноватости и раздробленности растворимых пород часто являются кратчайшими путями движения инфильтрационных вод, в силу чего они подвергаются наиболее активному выщелачиванию. Особенно большое значение в этом отношении имеют тектонические нарушения. Уменьшению фильтрации и полному ее

прекращению способствует кольматация трещин.

Задачей геофизических исследований является обнаружение и картирование трещиноватых зон, разделение между собой участков пород с открытыми и кольматированными трещинами, оценка мощности и состояния зоны выветривания, локализация отдельных выщелоченных пустот или их систем и, наконец, определение глубины залегания базиса коррозии.

4.2. Для картирования пород по степени их сохранности и выделения среди них трещиноватых и закарстованных зон прежде всего используются результаты выполненных ВЭЗ и ЭП (п.2.3).

Если закарстованные породы обводнены, то на графиках электропрофилирования отмечаются все понижения кажущихся сопротивлений и выделенные интервалы относят к зонам повышенной трещиноватости и закарстованности. Когда карстовыми процессами затронуты породы, лежащие выше уровня грунтовых вод, то в этом случае обращают внимание главным образом на участки повышенных и сильно дифференцированных сопротивлений, к которым чаще всего бывают приурочены сухие закарстованные породы. В то же время нужно иметь в виду, что при заполнении пустот и трещин рыхлым и увлажненным материалом сопротивление породы и в этих условиях может оказаться пониженным.

Когда наносы неоднородны, целесообразно производить обработку данных симметричного электропрофилирования по способу отношений [30] . Для этого разносы установок должны быть выбраны так, чтобы оба значения ρ_K соответствовали квазилинейному участку восходящей ветви ВЭЗ. Обработка сводится к тому, что для каждого пункта измерения находится отношение $a = \rho_{K_2}/\rho_{K_1}$, где ρ_{K_1} и ρ_{K_2} – кажущиеся сопротивления, замеренные соответственно с малой и большой установками АВ. Уменьшение величины a на фоне общего понижения ρ_K служит признаком ослабления пород.

4.3. При сравнительно малой мощности карстующихся пород, а также в случае гипсового карста, электроразведка часто не дает прямых указаний на наличие закарстованности. В этом случае иногда бывает полезно ориентироваться на побочные явления, сопутствующие развитию карста. Косвенным признаком закарстованности может служить нарушенная структура и повышенная влажность покровных отложений. Это обстоятельство приводит к снижению кажущегося сопротивления, снятого установкой небольшой длины. При таких условиях постановка электропрофилирования с малой длиной питающей линии может оказаться наиболее выгодной для решения поставленной задачи.

4.4. По кривым ВЭЗ в благоприятном случае можно оценить мощность и степень разрушенности закарстованных пород, определить положение базиса коррозии и установить уровень грунтовых вод.

Над закарстованными породами (известняками) кривые ВЭЗ часто отличаются характерными особенностями. В основной своей части, отвечающей коренным породам, они обычно представлены типом Н . Первое изменение сопротивлений (спад) наблюдается на уровне зеркала грунтовых вод, второе (подъем) - на уровне базиса коррозии. Трещиноватые породы ниже уровня грунтовых вод обладают пониженными сопротивлениями. Границы между слоями геоэлектрического разреза проявляются на кривых ВЭЗ тем отчетливее, чем больше степень пустотности породы.

На тех участках, где карст отсутствует, коренные породы отмечаются на кривых ВЭЗ восходящей ветвью. Если они в верхней части закарстованы или имеют мощную зону выветривания, то поднимающаяся ветвь кривой ВЭЗ будет выражена типом А.

Так как характер этой ветви не всегда очевиден, то для надежности интерпретации во всех сомнительных случаях следует прибегать к трансформации кривых ВЭЗ в кривые ДОЗ (дипольно-осевое зондирование). Для пересчета используется

приближенная формула Г.Д.Цекова

$$\rho_\tau = 0{,}75\ \rho^\theta + 0{,}853\ \rho^\theta_{-1} - 0{,}603\ \rho^\theta_{+1}\ ,(3)$$

где ρ_τ и ρ^θ – кажущиеся сопротивления, соответствующие установкам ДОЗ и ВЭЗ в точке пересчета;

ρ^θ_{-1} и ρ^θ_{+1} – кажущиеся сопротивления, отвечающие предыдущей и последующей точкам на кривой ВЭЗ.

Кривые ДОЗ обладают лучшей разрешающей способностью по сравнению с кривыми ВЭЗ, и характер геоэлектрического разреза на них вырисовывается более четко.

Если закарстованные породы залегают выше уровня грунтовых вод, то снятые над ними кривые ВЭЗ чаще всего искажены и не поддаются количественной интерпретации. Определить по ним базис коррозии практически невозможно.

Над значительными по размеру пустотами восходящая ветвь кривой ВЭЗ может подниматься под углом, превышающим 45^0.

4.5. Необходимость в дополнительных и более детальных исследованиях обычно возникает при наличии в карстующихся породах полостей, особенно небольшого размера, и узколокализованных ослабленных зон, которые могли быть пропущены при исследовании по методу симметричного электропрофилирования. Детализационные работы производятся обычно с применением других модификаций электропрофилирования и сосредоточиваются на участках, выделенных по данным предыдущих исследований. Как правило, для уверенного выделения полостей их сечение должно быть больше глубины залегания.

В большинстве случаев для детализационных работ применяется комбинированное или дипольно-осевое профилирование. Эти методы особенно эффективны в дифференциальном варианте, предложенном Я.С.Сапужаком [24] . В отличие от обычной модификации в дифференциальном варианте профилирования используются три измерительных электрода. Дополнительный электрод O помещается в центре приемной линии. Наблюдения сводятся к регистрации двух разностей потенциалов – между электродами M и O , с одной стороны, и O и N , с другой.

По полученным данным вычисляется приращение разности потенциала в центре установки

$$\Delta(\Delta U) = \frac{\Delta U_{MO} - \Delta U_{ON}}{2},$$

а затем находится

$$\rho_K = K\frac{\Delta(\Delta U)}{J}, \qquad (4)$$

где K – коэффициент установки, определяемый обычным путем.

Особенностью графиков ρ_K, снятых дифференциальной установкой, является наличие характерных экстремумов над вертикальным контактом: минимумов на кривых прямой установки, когда она движется из низкоомной среды в высокоомную, и максимумов – у обратной установки (рис.3). Если контакт наклонный, то более значительные экстремумы наблюдаются на графиках тех установок, у которых питающие электроды сдвинуты по отношению к приемным в сторону падения контакта.

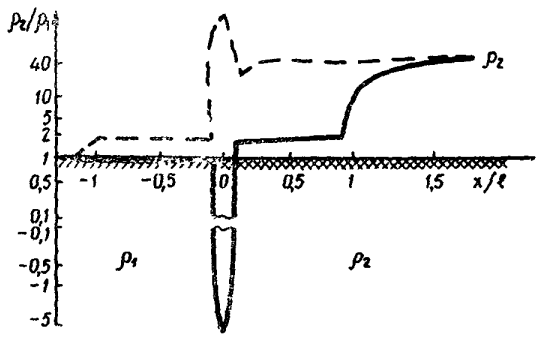

Рис.3. Теоретические кривые ρ_K, снятые дифференциальной установкой над вертикальным контактом при $\rho_2 = 40\rho_1$ (по Я.С.Сапужаку)

Над слоем ограниченной мощности на графиках ρ_K отмечаются два контакта. Центр слоя фиксируется характерным пересечением графиков прямой и обратной установки.

Размеры приемной линии для дифференциальной установки следует выбирать, сообразуясь с предполагаемой шириной аномалии. Шаг измерений не должен превышать $\frac{1}{2}$ MN. Длина установки ℓ, как обычно, определяется мощностью наносов.

Дифференциальный метод с тремя электродами в приемной линии может быть использован и в модификации зондирования [25] для учета искажений кривых ВЭЗ за счет горизонтальных неоднородностей разреза в особенности при относительно больших MN.

Для детализационных исследований не исключается возможность применения и других видов электропрофилирования, кроме описанного, в частности метода срединного градиента. Однако в этом случае следует очень осторожно подходить к выбору разносов MN. С одной стороны, они должны быть достаточно большими, чтобы исключить влияние наносов, а с другой, - настолько малыми, чтобы не пропустить небольшие по размеру аномалии. Поэтому их рекомендуется подбирать опытным путем.

4.6. Если аномалия от возмущающего объекта (полости) соизмерима с уровнем помех, то ее иногда удается обнаружить с помощью статистической обработки графиков наблюденного параметра (в частности графиков $\rho_к$) по способу обратных вероятностей [7]. В результате применения этого способа максимально разрушается вредная информация от посторонних факторов, и наилучшим образом выделяется полезный сигнал.

Последовательность операций при использовании упомянутого способа для интерпретации графиков комбинированного профилирования такова:

1. По значениям кажущихся сопротивлений для прямой $\rho_{кА}$ и обратной $\rho_{кВ}$ установки строят разностный график $\Delta\rho_к = \rho_{кА} - \rho_{кВ}$ для всего профиля или для отдельных его участков, где вероятно появление аномалии.

2. Определяют среднее арифметическое из дискретных наблюдений $\Delta\rho_к(x_j)$

$$\overline{\Delta\rho_к(x_j)} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\Delta\rho_к(x_j), \qquad (5)$$

где j - текущий номер точки на профиле,
m - общее количество точек.

Значение $\overline{\rho_к(x_j)}$ принимают условно за нулевое, по отношению к которому график $\Delta\rho_к$ будет иметь знакопеременный характер.

3. Находят дисперсию по профилю наблюдений, которая определяется как средний квадрат отклонения от $\overline{\rho_к(x_j)}$

$$\sigma^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{j=1}^{m}\left[\Delta\rho_к(x_j) - \overline{\Delta\rho_к(x_j)}\right]^2. \qquad (6)$$

4. Оценивают характер ожидаемой аномалии с точки зрения ее формы, амплитуды и протяженности. При этом ориентируются на результаты полевых наблюдений на смежных профилях или в аналогичных условиях. Возможно осуществление выбора аномалии и теоретическим путем.

Считают, что при использовании метода обратных вероятностей оптимальным отношением сигнала к помехе будет I:I. В этом случае ошибки, обусловленные как пропуском действительных аномалий, так и выделением ложных, сводятся к минимуму. Небольшие неточности в форме и протяженности предполагаемой аномалии (до 25% от истинных значений) допустимы и не влекут серьезных ошибок. Более сложные по форме и более протяженные аномалии выделяются надежнее, чем простые и короткие. Отсюда вытекает требование к методике полевых работ. Шаг измерений должен быть таков, чтобы полезная аномалия могла бы быть зарегистрирована 5-9 точками.

5. Вычерчивают график ожидаемой аномалии и через промежутки, равные шагу измерений Δx, снимают ординаты $a(x_i)$. Число их n зависит от протяженности аномалии.

6. График ожидаемой аномалии мысленно перемещают по профилю на интервал Δx и для каждого его положения находят значение корреляционной суммы

$$\sum_{i=1}^{n}\Delta\rho_к(x_{j+i-1})a(x_i),$$

где i - порядковый номер ординаты аномалии (изменяется от I до n);

j - порядковый номер точки наблюдения, с которой совмещена первая точка аномалии (изменяется от I до m).

Каждый член этой суммы является произведением наблюденного значения $\Delta\rho_к$ в некоторой точке профиля j и ординаты ожидаемой аномалии в этой точке при данном расположении последней.

Значения корреляционных сумм и вычисляемых по ним вероятностей относят к средней точке аномалии x_0 .

Вычисление искомой вероятности производится по формуле

$$P_s = \frac{t^{t-\tau}}{e^{t-\tau} + 1}, \qquad (7)$$

где

$$t = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^{n} \Delta\rho(x_{j+i-1})\, a(x_i),$$

$$\tau = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^{n} a^2(x_i) .$$

По полученным значениям P_s строится график вероятностей. В тех точках, где всплеск вероятностей превышает 0,5, отмечают аномалию.

На рис.4 приведен пример результата обработки графиков комбинированного электропрофилирования по способу обратных вероятностей и схема их вычислений.

Способ обратных вероятностей может быть применен для интерпретации графиков любого геофизического параметра при отсутствии корреляционных связей между помехами.

4.7. Если удалось обнаружить каротовую полость, то возникает необходимость уточнить ее размеры и положение в пространстве. В этом случае также могут оказать помощь геофизические методы.

Для определения направления простирания вытянутой каротовой полости предлагается следующая методика. Симметричная установка AMNB располагается так, чтобы приемная линия приходилась над полостью. Затем снимаются круговые диаграммы. С увеличением AB форма диаграмм будет изменяться,

ПК	$\Delta\rho_к$	a_i	(4)															
0	2	-1	-2	(5)														
1	-3	-4	12	3	(6)													
2	-4	-9	36	18	4	(7)												
3	-5	-5	25	45	20	5	(8)											
4	-3	0	0	15	27	12	3	(9)										
5	-3	5	-15	0	15	27	12	3	(10)									
6	6	9	54	30	0	-30	-54	-24	-6	(11)								
7	2	4	8	18	10	0	-10	-18	-8	-2	(12)							
8	3	1	3	12	27	15	0	-15	-27	-12	-3	(13)						
9	0		12	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
10	5			139	5	20	45	25	0	-25	-45	-20						
11	4		(14)		108	4	16	36	20	0	-20	-36						
12	4		-5	(15)		53	4	16	36	20	0	-20						
13	-3		-16	-4	(16)		16	-3	-12	-27	-15	0						
14	3		-36	-16	-4	(17)		20	3	12	27	15						
15	1		15	27	12	3	(18)		6	1	4	9						
16	1		0	-15	-27	-12	-3	(19)		-33	1	4						
17	-1		5	0	-5	-9	-4	-1	(20)		-51	-1						
18	1		9	5	0	-5	-9	-4	-1	(21)		-49						
19	2		-4	-9	-5	0	5	9	4	1	(22)							
20	17		1	4	9	5	0	-5	-9	-4	-1	(23)						
21	7		-31	2	8	18	10	0	-10	-18	-8	-2						
22	2			-6	17	68	153	85	0	-85	-153	-68						
23	-7				5	7	28	63	35	0	-35	-63						
24	9					75	2	8	18	10	0	-10						
25	2						182	-7	-21	-63	-35	0						
26	-2							148	9	36	81	45						
27	1								30	2	8	18						
										-121	-2	-8						
											-145	1						
												-87						

ПК x_0	$\Sigma\Delta\rho_к a$	$t=\frac{\Sigma\Delta\rho_к a}{\sigma^2}$	e^t	$k=e^{t-r}$	$p=\frac{k}{k+1}$
4	121	4,4	81	0,81	0,45
5	139	5,1	164	1,61	0,62
6	108	3,9	49	0,49	0,33
7	53	1,9	6,7	0,07	0,07
8	16	0,5	1,6	0,02	0,02
9	20	0,7	2	0,02	0,02
10	6	0,2	1,2	0,012	0,01
11	-33	-1,2	0,3	0,003	0,003
12	-51	-1,9	0,15	0,002	0,002
13	-49	-1,8	0,17	0,002	0,002
14	-31	-1,1	0,3	0,003	0,003
15	-6	-0,2	0,8	0,008	0,008
16	5	-0,2	1,2	0,012	0,012
17	75	2,7	14,3	0,15	0,13
18	182	6,6	735	7,35	0,88
19	148	5,4	221	2,21	0,69
20	30	1,1	3	0,03	0,03
21	-121	-4,4	0,01	0,0001	0,0001
22	-145	-5,2	0,006	0,0000	0,0000
23	-87	-3,2	0,04	0,0004	0,0004

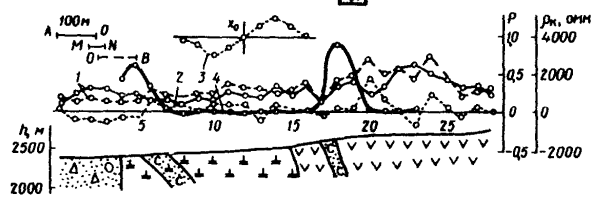

Рис.4. Пример построения графика вероятностей по О.А.Демидовичу :

I – кривые $\rho_{кA}$ и $\rho_{кB}$; 2 – кривая $\Delta\rho_к$; 3 – график ожидаемой аномалии; 4 – график распределения вероятностей.

[o o] – делювий; [⊥⊥⊥] – кварцевые альбитофиры; [V V V] – диабазы; [c c] – зона пиритизации; [(4)] – x_0; [16] – $\Sigma\Delta\rho_к a$

переходя от окружности к эллипсу, а затем к фигурам, напоминающим восьмерки. Линии наибольшего сжатия фигур будут ориентированы по простиранию полости.

По данным этих же исследований можно ориентировочно определить глубину залегания H оси карстового канала [I5]. Для этого пользуются графиком рис.5, выражающим зависимость $\alpha = f(H/\frac{AB}{2})$, где α - отношение полуосей эллипса анизотропии $\rho_к$ при разносе $\frac{AB}{2}$. Когда определения, сделанные по нескольким разносам AB, расходятся между собой, то предпочтение следует отдавать тем разносам, которые примерно в 2-8 раза больше H.

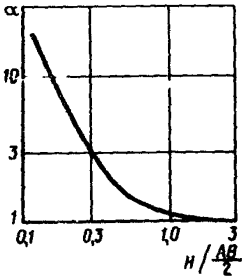

Рис.5. График зависимости $\alpha = f(H/\frac{AB}{2})$ (по М.Ф.Монтрелю)

Если карстовая полость имеет сравнительно крупные размеры, то ее положение в плане может быть зафиксировано на карте изоом, составленной на основе детальной площадной съемки по методу одного из видов электропрофилирования с шагом I-2 м и расстоянием между профилями 2-5 м.

При вскрытии карстовой полости скважиной ее контуры могут быть ориентировочно намечены с помощью метода заряженного тела (МЗТ) в сочетании с закачкой в полость подсоленной воды под некоторым давлением. Сначала снимают вокруг скважины эквипотенциали нормального поля. Затем в скважину подают воду и периодически наблюдают за изменением формы эквипотенциалей по обычной методике. Форма деформированных эквипотенциалей должна быть подобна форме проекции карстового тела на дневную поверхность.

4.8. Если карстующиеся породы залегают не глубже 10м от поверхности и сверху перекрыты отложениями высокого сопротивления, то в некоторых случаях для обнаружения этих пород оказываются эффективными высокочастотные электромагнитные методы: метод индукции в модификации про-

рилирования и метод радиокип.

Постановка этих методов особенно рекомендуется при осложненных условиях заземлений (сухие пески, глыбовый навал, мерзлый слой и т.д.), когда применение электроразведки с постоянным током технически трудно осуществимо и мало эффективно.

Для производства работ по методу индукции используется аппаратура типа "Земля" или "ДЭМП". Индукционное профилирование осуществляется с двумя разносами "генератор – приемник", обеспечивающими разную глубину исследования (обычно $\tau_1 = 25$ м и $\tau_2 = 50$ м). Способ задания электромагнитного поля и его частота устанавливаются по данным рекогносцировочных вертикальных индукционных зондирований (ВИЗ). Для упрощения схемы измерений шаг между точками наблюдений берется равным τ_1. Данные измерений пересчитываются в эффективные сопротивления $\rho_э$.

Обработка полевых материалов и интерпретация полученных результатов выполняются по известной методике [17]. Закарстованные породы (обводненные или заполненные переотложенным материалом) проявляются на графиках $\rho_э$ пониженными показаниями.

При исследованиях по методу радиокип ограничиваются измерением только вертикальной компоненты магнитного поля H_z. Шаг наблюдений следует брать равным 5 м и меньше. Работы ведутся приборами типа "ПИНГ". Для фиксации положения контактов и выделения отдельных слоев полевые графики сравниваются с соответствующими теоретическими кривыми, рассчитанными для геологических неоднородностей определенного типа.

4.9. Для выявления разуплотненных пород и полостей, залегающих выше уровня грунтовых вод, в ряде случаев успешно может применяться гравиразведка. Основанием этого является различие в плотностях монолитных и закарстованных пород (в 1,5 – 3 раза). Согласно расчетам [12] над заполненной карстовой полостью можно достаточно уверенно выделить аномалию, если диаметр полости равен $(0,6 \div 0,7)H$, где

H – глубина расположения центра полости, а над пусто – тами – $(0,5 \div 0,6)H$.

Помимо этого, гравиразведка может быть использована для картирования древних переуглубленных русел, а также для обнаружения покровных отложений с нарушенной струк – турой, что является косвенным признаком наличия в нижележащих породах карстовых форм. Последнее бывает особенно важно в случае гипсового карста, который труден для изучения с помощью электроразведки.

Гравиметрические исследования рекомендуется проводить по методу одноразовой съемки с повторением измерений на опорном пункте через каждые пять рядовых наблюдений (рис.6) [I]. Эта методика обеспечивает точность съемки ± 0,05 – 0,06 мгл. Шаг съемки 20–50 м и при детальных исследованиях может быть уменьшен до I0 м. Измерения произ–

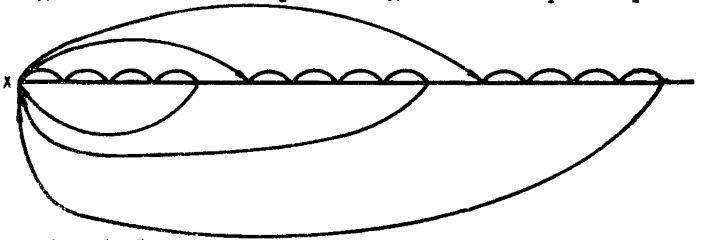

Рис.6. Схема гравиметрических измерений (по П.А.Атамасю)
x – опорный пункт

водятся с помощью высокоточных гравиметров (ГАК – 6М, ГАК – 7М и ГАК – ПТ). Техника измерений обычная. Наблюдения сопровождаются точной топографической съемкой, особенно в районах со сложным рельефом местности. Приемы интерпретации полевых материалов не отличаются от обще – принятых.

4.I0. Для выявления трещиноватых и закарстованных зон, особенно в случае сухого карста, и для определения мощности зоны выветривания может применяться сейсморазведка. Ослабленные и нарушенные зоны характеризуются пониженными

скоростями распространения упругих волн.

Исследования проводятся продольным профилированием с получением систем встречных и нагоняющих годографов. Шаг приборов выбирается таким, чтобы волну, пришедшую от нарушенной зоны, отметить несколькими из них.

Техника работ и приемы интерпретации общепринятые.

4.II. Данные каротажа дают сведения об изменении характера трещиноватости карстующихся пород с глубиной (ниже уровня грунтовых вод). При этом наиболее полную картину получают при совместном рассмотрении диаграмм нескольких видов каротажных исследований.

На диаграммах КС трещиноватые и разрушенные породы выделяются пониженными сопротивлениями. По характеру диаграмм можно судить о распределении трещиноватых зон по вертикали, об их взаимосвязи, об относительной степени разрушенности пород и о положении базиса коррозии. В то же время по ним обычно не удается установить: открыты ли трещины или закольматированы.

По диаграммам микрокаротажа иногда фиксируются отдельные крупные трещины, приуроченные к узколокализованным минимумам кривой кажущегося сопротивления, снятой градиент - микрозондом.

Диаграммы ГК, ПС и ВП в ряде случаев могут быть использованы для разделения открытых и закольматированных трещин. Там, где трещины кольматированы, показания методов ГК и ВП должны быть относительно выше. Что касается показания метода ПС, то их связь с характером заполнения трещин устанавливается лишь в процессе исследований.

Ценные данные о степени закаротованности пород могут быть получены с помощью кавернометрии. Увеличение диаметра скважины является убедительным признаком кавернозности пород.

4.I2. Результатом интерпретации выполненных исследований являются:

уточненный геоэлектрический разрез (в части, касаю-

нейся состояния пород) с нанесенными на него графиками фактического материала, использованного для уточнения разреза (графики профилирования, вероятностные графики, каротажные диаграммы и т.д.);

вертикальные карты $\rho_к$ по отдельным профилям;

карты с нанесенными на них профилями и соответствующими графиками $\rho_к$ или других параметров;

блок-диаграммы отдельных участков;

материалы, иллюстрирующие местоположение и конфигурацию отдельных полостей.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОСПОДСТВУЮЩЕГО НАПРАВЛЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

5.1. Карстовые формы нередко бывают приурочены к определенным системам крутопадающих и вертикальных трещин. Поэтому определение господствующего направления трещиноватости при исследовании закарстованных участков представляет одну из важных задач.

5.2. Наиболее распространенным геофизическим методом, служащим для определения преобладающего направления и относительной интенсивности трещиноватости пород, является метод круговых вертикальных электрических зондирований (КВЭЗ). Этот метод основан на представлении трещиноватой породы в виде анизотропной однородной среды. Кажущиеся сопротивления, замеренные на поверхности этой среды по различным азимутам, образуют эллипс анизотропии. Направление большой оси эллипса совпадает с господствующим направлением простирания трещин. Однако это условие, как показывают расчеты и лабораторные эксперименты [18]; [26] , справедливо только для достаточно однородных сред. При наличии горизонтальных неоднородностей полярные диаграммы приобретают сложный характер. С увеличением разносов эллипсы переходят в фигуры неправильной формы, часто имеющие вид восьмерки. Направление большой оси фигур нередко поворачивается на 90^0.

Отсюда следует, что метод КВЗВ целесообразно применять для решения поставленной задачи только в том случае, если есть уверенность в достаточной однородности окружающих пород. Это свойство пород может быть проверено по данным электропрофилирования. При этом понятие однородности должно распространяться не только на коренные породы, но и на наносы, в частности на их мощность.

В условиях однородной среды полярные диаграммы, снятые при разных разносах AB , обычно подобны друг другу. Изменение направления большой оси эллипса анизотропии с увеличением AB служит признаком смены направления главной системы трещин. Уменьшение эллиптичности фигур с ростом AB и превращение их в окружности свидетельствует о полном затухании трещиноватости. По этому признаку можно судить об уровне базиса коррозии.

Точки КВЗВ задаются по данным электропрофилирования в среднем из расчета 2 точки на I км профиля.

Интерпретация полярных диаграмм сводится к определению азимутов больших осей фигур анизотропии и вычислению коэффициента эллиптичности $\alpha = \frac{\rho_{k\,max}}{\rho_{k\,min}}$ для разных разносов AB .

Величина α может служить относительной количественной характеристикой интенсивности трещиноватости. Для наблюдения за ее изменением по глубине полезно составлять графики $\alpha = f\left(\frac{AB}{2}\right)$.

5.8. В тех случаях, когда породы не отличаются большой однородностью или когда исключается возможность растягивания установки по четырем нужным азимутам (например, при проведении работ вблизи железнодорожных линий) для определения преобладающего направления и интенсивности трещиноватости может быть применен способ, предложенный И.И.Горюновым [5] . Способ основан на статистической обработке карт сопротивлений по известной методике В.Бухгейма и Р.Лаутербаха.

Карты сопротивлений составляют для отдельных, сравнительно небольших площадок размерами I00 x I00 или

200 x 200 $м^2$, которые покрывают частой сетью электропрофилей с шагом между точками замера I - 3 м. Профили разбивают так, чтобы установка была по возможности ориентирована вкрест простирания пород. Размеры измерительной установки выбираются по данным ВЭЗ таким образом, чтобы они характеризовали верхнюю часть коренных пород.

Обработка карт изоом осуществляется в следующем порядке:

I. Карту наносят на кальку и из правого нижнего угла ее проводятся лучи в направлениях 0; I0; 20^0 и т.д. через каждые 10^0.

2. Карту накладывают на миллиметровку так, чтобы лучи 0 и 90^0 шли по линиям, образующим миллиметровую сетку, и при этом положении подсчитывается суммарная длина отрезков изолиний, направление которых совпадает с направлением 0^0 (с точностью до 5^0). Полученные данные заносят в таблицу.

3. Карту поворачивают на $I0^0$, затем еще на $I0^0$и т.д. При каждом положении карты подсчитывается сумма отрезков, совпадающих с соответствующим направлением.

4. Наибольшая из полученных сумм принимается за единицу. Все остальные суммы выражаются в долях этой единицы.

5. На миллиметровку из центра окружности радиусом, равным I, наносятся лучи через каждые $I0^0$ и на них откладываются значения подсчитанных сумм в долях радиуса диаграммы. Концы лучей соединяют прямыми. Построенная таким образом диаграмма является аналогом розы трещиноватости и отражает относительную интенсивность последней в разных направлениях. Полученные результаты распространяются на всю площадку.

5.4. Для тех же целей может быть использован способ статистической обработки данных электропрофилирования, предложенный Н.А.Огильви [I9] .

Электропрофилирование выполняется на отдельных площадках. На каждой площадке разбиваются четыре системы профилей, которые секут ее по азимутам, различающимся друг от

друга на 45^0. Шаг установки берут равным I-8 м. Общее число точек на каждом из профилей должно быть по возможности одинаковым и не менее 20, но предпочтительнее, если оно достигает 50-I00.

По результатам измерений для каждой системы профилей подсчитывается среднее значение кажущегося сопротивления

$$\bar{\rho}_к = \frac{\Sigma \rho_к}{n} ,$$

где n – общее число точек на профилях данной системы.

Затем для каждой системы находятся дисперсия $\rho_к$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\Sigma(\rho_к - \bar{\rho}_к)^2}}{n-1}$$

и коэффициент вариации

$$V = \frac{\sigma}{\bar{\rho}_к}$$

σ и V будут тем больше, чем интенсивнее изрезаны электропрофили.

Очевидно, что их значения будут максимальными у той системы профилей, которые идут вкрест господствующего направления крутопадающих трещин.

По полученным значениям V строится полярная диаграмма. Направление главной системы трещин должно быть перпендикулярным направлению максимального вектора V.

Интенсивность трещиноватости оценивается коэффициентами:

$$\beta = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad \text{и} \quad \alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} .$$

5.5. В результате исследований строятся карты векторов или роз трещиноватости.

6. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ОБВОДНЕННОСТИ ЗАКАРСТОВАННОГО УЧАСТКА

6.I. Гидрогеологические условия в карстовых районах имеют ряд характерных особенностей: сложная система распределения подземного стока и взаимосвязей грунтовых и

карстовых вод, неравномерность скоростей фильтрации подземных потоков в массиве в связи с резкими различиями в водопроницаемости карстующихся пород, локальные скопления воды и др. Эти особенности, порожденные карстовыми процессами, в свою очередь также оказывают влияние на дальнейшее развитие карста. Познание закономерностей распространения и развития карста немыслимо без уяснения гидрогеологической ситуации изучаемого района.

6.2. Сведения об обводненности карстующегося массива прежде всего черпаются из анализа уже полученных материалов по полевой электроразведке и каротажу. При этом руководствуются следующими соображениями. Все участки пониженных сопротивлений, зафиксированные в карстующемся массиве ниже уровня грунтовых вод (за исключением отдельных слоев глин, которые однозначно определяются почти всеми видами каротажа), обязаны своим происхождением либо обводненным породам, либо породам, у которых трещины и пустоты заполнены вторичным глинистым материалом.

Если установлено, что трещины открыты, то при постоянстве минерализации воды на участке величина удельного сопротивления породы будет служить мерой ее водонасыщенности.

В п.4.II отмечалось, что по показаниям некоторых каротажных методов (ГК, ПС, ВП) имеется возможность составить суждение о характере заполнителя трещин в особенности, если речь идет о сравнительно мощных горизонтах.

Если интерпретатор располагает достаточно убедительными данными о заполнении трещин в одном или нескольких пунктах, то эти данные интерполируются и экстраполируются в допустимых пределах на окрестные участки.

Если почему-либо решение задачи с помощью упомянутых каротажных методов остается неопределенным, то его находят путем применения резистивиметрических исследований (п.7.4).

При отсутствии буровых скважин ограничиваются рассмотрением материалов только полевых методов. При этом стараются проследить наиболее вероятные пути движения воды

в карстующейся толще и оценить примерный порядок возможных гидравлических уклонов. Опорным материалом при решении этой задачи могут служить результаты исследований по методу ПС (п.7.2). Для подтверждения сложившегося представления задается контрольная скважина, в которой проводят полный комплекс каротажных исследований и в обязательном порядке резистивиметрические наблюдения.

6.3. К определению уровня грунтовых вод в покровных отложениях, если они представлены рыхлыми образованиями, может быть привлечена сейсморазведка. В этом случае система наблюдений принимается такой, чтобы обеспечить в первых вступлениях прослеживание волны, преломленной на зеркале грунтовых вод. Протяженность интервала профиля, на котором волна прослеживается в первых вступлениях, зависит от мощности и глубины залегания водоносного слоя и соотношения скоростей в сухой и водонасыщенной частях рыхлых отложений, а также в подстилающих породах.

Определение глубины уровня грунтовых вод производится по способу t_0 или способу встречных прямолинейных годографов [6].

6.4. В результате проведенных исследований на геологические разрезы наносят уровень грунтовых вод и условным знаком отмечают все обводненные зоны.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОД

7.1. Одним из важнейших факторов развития карста являются благоприятные условия для циркуляции воды в карстующейся толще и перекрывающих ее породах. Эти условия определяются направлением и скоростью течения подземных вод, с одной стороны, и фильтрационными характеристиками пород, с другой. Для изучения динамики подземных вод и водопроницаемости карстующихся пород применяют методы:

естественных потенциалов (ПС), заряженного тела (МЗТ) и скважинной резистивиметрии.

7.2. Метод ПС применяется с целью освещения общих закономерностей движения грунтовых вод, выявления мест инфильтрации их в карстующиеся породы и обнаружения очагов разгрузки карстовых вод.

Съемку проводят либо по сети параллельных профилей, сосредоточенных на выбранных площадках, либо в отдельных точках, пользуясь приемом круговых замеров разности потенциалов.

Исследования приурочиваются в основном к тем участкам, где ожидаются высокие градиенты скоростей потока (береговые склоны современных и древних речных долин, склоны оврагов и т.д.).

Метод ПС применяется также для исследования днищ озер и рек с целью выявления мест утечек воды или мест разгрузки карстовых вод в водоемы.

При профильной съемке расстояние между измерительными электродами составляет 5-10, между профилями 10-20 м. Точки измерений сгущаются на участках, где наблюдаются резкие изменения градиентов скоростей.

Измерения выполняются приборами постоянного тока ЭСК-1 или ЭП-1. Для исключения влияния на результаты наблюдений собственной ЭДС электродов замеры осуществляются на каждой стоянке при двух положениях электродов: при первом M находится впереди N по ходу профиля, при втором сзади. Результатом измерений является среднее из двух замеров.

Замер на первой стоянке условно принимается за нулевой. Профили связываются между собой промежуточными замерами. В конце измерения возвращаются на первый пункт. Невязка, полученная при двух измерениях на первом пункте, равномерно разбрасывается между точками.

По данным измерений строят графики или карты изолиний потенциала ПС. Карты изолиний являются в известной степени аналогами карт гидроизогипс. На участках распространения

однородных пород густота изолиний потенциала ПС служит характеристикой интенсивности фильтрации. Скорость фильтрации тем выше, чем гуще располагаются изолинии. В направлении течения воды потенциалы ПС, как правило, возрастают. Места выхода подземных вод на поверхность фиксируются положительными аномалиями, места водопоглощения - отрицательными.

Круговые измерения в отдельных пунктах производятся по четырем азимутам. По результатам измерений строятся полярные диаграммы, которые обычно имеют форму восьмерок. Направление движения подземных вод совпадает с направлением большой оси восьмерки.

Представляют интерес повторные измерения по методу ПС, в частности после сильных ливневых дождей. Сравнительный анализ результатов наблюдений, выполненных в разное время после окончания дождя, позволяет составить более полную картину режима подземных вод.

7.3. Если на участке работ имеется буровая скважина, то направление течения подземных вод и действительная скорость потока V могут быть найдены методом заряженного тела (МЗТ).

Метод МЗТ может быть применен как для определения элементов грунтового потока в покровных отложениях (обычно в скважинах, обсаженных фильтрами), так и для изучения трещинно-карстовых вод (обычно в незакрепленных скважинах). В том и другом случаях надежные результаты получаются лишь тогда, когда глубина залегания водоносного горизонта не превышает 50 м.

Измерения проводятся по общепринятой методике.

Результаты исследований представляют в виде серии эквилиний, снятых через определенные промежутки времени после образования солевого тела в потоке воды. Первую эквилинию, зарегистрированную до введения соли в поток, обычно спрямляют и изображают в виде окружности в произвольном масштабе. Последующие размещают на чертеже таким образом, чтобы все они имели общую точку, отвечающую не-

подвижному электроду N . Приращения потенциала, полученные по разным направлениям, откладываются по соответствующим радиусам в укрупненном масштабе. Если электрод N помещен против потока, то все эквилинии (за исключением первой) будут вытянуты в направлении течения воды. Скорость потока определяется по формуле

$$v = \frac{\Delta R}{2t}, \text{ м/сутки}, \qquad (8)$$

где ΔR – приращение эквилинии за время t .

При изучении трещинно-карстовых вод в силу сложности путей движения их по трещинам обычно получают усредненные результаты.

7.4. Для детального изучения гидрогеологических особенностей карстующегося массива применяется скважинная резистивиметрия. Этот метод рекомендуется ставить во всех, без исключения, скважинах. С помощью скважинной резистивиметрии получают представление о распределении скоростей фильтрации по глубине, о взаимосвязи или разобщенности отдельных водоносных слоев, о наличии местных водоупоров и, наконец, о частных дебитах горизонтов и о коэффициентах фильтрации пород. Особенно ценные сведения могут быть получены при обследовании ряда скважин и корреляции их результатов между собой. Методика работ общеизвестна. Существуют две модификации резистивиметрических измерений: при естественном режиме фильтрации подземных вод и при нарушенном.

Первая модификация заключается в регистрации через определенные промежутки времени ряда кривых удельного сопротивления $\rho_б$ подсоленной воды, заполняющей скважину, и наблюдении по этим кривым за восстановлением естественной концентрации солей в воде. Обычно снимают от трех до пяти кривых.

Резистивиметрические кривые наносятся на одну общую диаграмму и рассматриваются совместно. Те интервалы, против которых наблюдается опреснение раствора со временем (увеличение $\rho_б$), отмечаются как водопроницаемые. При этом

чем быстрее идет опреснение, тем больше скорость фильтрации. Интервалы, где опреснения не наблюдается, относятся к водонепроницаемым.

Если скорость фильтрации находится в пределах от I до 10 м/сутки, то она может быть приближенно определена по формуле

$$W = \frac{1{,}81d}{\alpha(t_2 - t_1)} \lg \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0} , \qquad (9)$$

где d - диаметр скважины;

C_0 - минерализация подземной воды;

C_1 и C_2 - концентрации раствора в скважине, соответствующие моментам времени t_1 и t_2 ;

α - коэффициент, зависящий от состояния стенок скважины. Для скважин, стенки которых освобождены от глинистой корки, $\alpha = 2$.

Вторая модификация скважинной резистивиметрии состоит в наблюдении за скоростью перемещения по скважине v_p границы раздела двух растворов различного удельного сопротивления при равномерном наливе. Этот вид исследований дает возможность оценить частные дебиты Q_i каждого i -го слоя и коэффициенты фильтрации K_φ этих слоев.

По изменению величины v_p определяют положение водопроницаемых горизонтов в разрезе и их мощности h_i .

Вычисление частных дебитов производится по формуле

$$Q = \frac{\pi d^2 v_i}{4} , \qquad (10)$$

где v_i - скорость поглощения, которая находится как разность между скоростями движения v_p границы растворов выше и ниже пласта.

Зная дебиты Q_i , соответствующие определенным повышениям уровня воды S_i , определяют коэффициент фильтрации пород

$$K_\varphi = \frac{Q_i}{h_i S_i} . \qquad (11)$$

При малых скоростях фильтрации, меньших 0,I м/сутки, для оценки фильтрационных характеристик пород может быть применен метод повторных боковых каротажных зондирований [I8] .

7.5. Результаты исследований представляют в виде:
карты изолиний или полярных диаграмм потенциала ПС с нанесенными на них данными исследований по методу МЗТ;
диаграмм резистивиметрических наблюдений с результатами их интерпретации.

8. ОЦЕНКА МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД И ВЫЯВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА ЗАКАРСТОВАННОМ УЧАСТКЕ

8.I. Изучение минерализации подземных и поверхностных вод производится для оценки их растворяющей способности и выявления очагов разгрузки карстовых вод. Способом исследований служит резистивиметрия в поверхностном и скважинном вариантах.

8.2. Поверхностная резистивиметрия ставится во всех поверхностных водоемах, реках и источниках.

В качестве измерительного прибора используется скважинный резистивиметр.

В озерах и реках рекомендуется вести непрерывные наблюдения по секущим профилям и бортовым образующим с помощью каротажного кабеля и каротажной аппаратуры, которая размещается на берегу. Наряду с этим, возможны и точечные замеры, которые выполняются с лодки. В этом случае регистрирующей аппаратурой является АНЧ-I или потенциометр ЭП-I в сочетании с пульсатором для исключения влияния на замеры естественных потенциалов. По отдельным профилям или точкам ведутся наблюдения за изменением минерализации воды по глубине.

Измерения удельного сопротивления воды обязательно сопровождаются температурными замерами, которые исполь -

зуются для введения поправок в данные резистивиметрии.

В результате поверхностных резистивиметрических исследований составляются карты удельных сопротивлений поверхностных вод $\rho_в$ по отдельным водоемам и водотокам или по участку работ в целом.

По пониженным значениям $\rho_в$ определяют места разгрузок карстовых вод, обусловленные зонами повышенной трещиноватости. Особенно значительные понижения $\rho_в$ в очагах разгрузки наблюдаются в случае гипсового карста.

8.3. От данных резистивиметрии - удельного сопротивления воды $\rho_в$ - переходят к минерализации воды, пользуясь графиками зависимости удельного сопротивления растворов от концентрации различных солей [13].

Увязывая данные резистивиметрии с гидрохимическими анализами, можно построить график зависимости $\rho_в$ от изменения содержания в воде того или иного иона. В этом случае данные резистивиметрии будут служить непосредственной характеристикой агрессивности воды. Ориентировочно для карбонатного карста агрессивными считаются воды с удельным сопротивлением более 150 омм или, наоборот, с удельным сопротивлением менее 8-10 омм, если в них преобладает ион SO_4^{II}. Для гипсового карста агрессивность вод при прочих равных условиях падает с уменьшением $\rho_в$.

8.4. В скважинах резистивиметрические исследования проводятся в условиях установившегося режима фильтрации воды. Измерения осуществляются или путем непрерывной регистрации кривой, или поточечно с шагом не более 20 см.

Резистивимограммы, снятые при естественном режиме фильтрации, иллюстрируют изменение минерализации воды с глубиной.

8.5. Если изыскания на участке работ ведутся длительное время, то рекомендуется постановка режимных наблюдений по отдельным контрольным профилям и скважинам. Периодичность исследований определяется всем комплексом гидрогеологических условий и устанавливается на месте работ.

8.6. Результаты исследований представляют в виде карты равных значений удельного сопротивления поверхностных вод и таблицы с данными об изменении минерализации воды с глубиной в отдельных пунктах исследованной площади.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАРСТА

9.I. В результате совместного анализа материалов геофизических работ с материалами всех других видов исследований, выполненных в районе, устанавливаются общие закономерности распространения и развития карста. С этой целью выясняются морфологические особенности карста, его зональность и приуроченность к определенным системам трещин; отмечаются места интенсивной инфильтрации агрессивных атмосферных или грунтовых вод в карстующиеся породы, и прослеживаются наиболее вероятные пути их дальнейшего движения в массиве; фиксируются участки, характеризующиеся повышенными скоростями фильтрации воды; анализируются состав и мощность покровных отложений на участках активного проявления карста с точки зрения вероятности развития в них процессов суффозии и обрушения.

На основе сделанных выводов производится деление территории на отдельные зоны, различающиеся по степени и условиям развития карста.

ЛИТЕРАТУРА

I. А т а м а с ь П.А., Р ы б а л к а Т.М. Опыт выявления подземных пустот геофизическими методами. Вопросы разработки нерудных и рудных месторождений. Труды научно-исследовательского горнорудного института, Донецкого филиала, вып.8, 1969.

2. Б о р к о в В.О. Изучение карста под основанием земляного полотна и мероприятия по укреплению основания. Сб."Проектирование, строительство и эксплуатация земляного

полотна в карстовых районах". М., 1968.

3. Брашнина И.А. Резистивиметрическая съемка подземных и поверхностных вод. Методика изысканий, т.I. М., изд.ЦНИИСа, 1969.

4. Горелик А.М. Электроразведка при железнодорожных изысканиях в карстовых районах. М.,,изд.ЦНИИ, 1949.

5. Горюнов И.И. Методика полевых исследований трещиноватости горных пород по их удельному электрическому сопротивлению. Труды II Всесоюзного совещания по трещинным коллекторам нефти и газа. М., "Недра", М.,1965.

6. Гурвич И.И. Сейсморазведка. М.,"Недра",.1970.

7. Демидович О.А. Выделение слабых геофизических аномалий статистическими способами. М.,"Недра", 1969.

8. Кухарев Н.М. Геологотектонические особенности исследований при изысканиях трасс шоссейных и грунтовых дорог в районах развития карста. М., "Геодезиздат", 1935, № 4.

9. Лыкошин А.Г. Инженерно-геологические исследования карста для гидротехнического строительства.В кн. "Карст и его народнохозяйственное значение". Труды МОИП, т.ХП., М., 1964.

10. Макеев В.А. Принципы инженерно-геологического районирования карстовых областей. Карстоведение,вып.4, Пермь, 1943.

11. Максимович Г.А., Балков В.А. Определение интенсивности карстообразования по величине и составу зимнего стока. Сб."Химическая география и гидрогеохимия", вып.2 (3), Пермь, 1962.

12. Матвеев Б.К. Методика геофизического изучения карстовых полостей на примере работ в районе Кунгурской ледяной пещеры. Методика изучения карста, вып. 5, Геофизические методы, Пермь, 1968.

I3. Методические указания по геофизическим методам исследования скважин на изысканиях железных дорог. М., изд.ЦНИИСа, 1962.

14. Методические указания по исследованию участков скальных выемок сейсмическими методами. М., изд. ЦНИИСа, 1971.

15. Методические указания по определению трещиноватых и закарстованных зон с поверхности и из горных выработок. ВИОГЕМ, Белгород, 1968.

16. Методические указания по применению метода вызванных потенциалов при инженерно-геологических исследованиях. М., изд.ЦНИИСа, 1968.

17. Методические указания по применению переменного тока при инженерно-геофизических исследованиях. М., 1966.

18. О г и л ь в и А.А. Геоэлектрические методы изучения карста. М., изд.МГУ, 1957.

19. О г и л ь в и Н.А. Способ определения простирания доминирующей системы трещин методом электропрофилирования. Р. и О.Н., 1960, № 12.

20. П р и г о д а В.Я. О применении метода вычитания полей при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях на изысканиях дорог. М., изд.ЦНИИСа, 1967.

21. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР. М., 1964.

22. Р о д и о н о в Н.В. Инженерно-геологические исследования при гражданском и промышленном строительстве в карстовых районах. Методика изучения карста. Вып.7, Пермь, 1963.

23. С а в а р е н с к и й И.А. Инженерно-геологическая оценка карстовых явлений в районе г.Дзержинска. Труды ЛГТИ им.Саваренского АН СССР, 1962.

24. С а п у ж а к Я.С., Ш а м о т к о В.И., С а п у ж а к А.Ф. Об одном способе детальных площадных

исследований многоэлектродными установками. Новые геофизические исследования на Украине. Материалы конференции молодых геофизиков Украины, 1968. Киев, 1969.

25. Сапужак Я.С., Шамотко В.И. Способы получения кривых двусторонних и дифференциальных зондирований в процессе выполнения обычных ВЭЗ. Геофиз. сб. АНУкрССР, 1970, № 34.

26. Семенов А.С., Поликарпов В.К. Новожилова М.Е. Влияние неоднородности пород при изучении зон трещиноватости и тектонических нарушений методом кругового зондирования. Вестн. ЛГУ, 1965, № 24.

27. Скворцов Г.Г. О скорости развития карста в гипсах. В сб. "Вопросы изучения подземных вод и инженерно-геологических процессов". М., 1955.

28. Соколов Д.С. Основные условия развития карста. Госгеолтехиздат. М., 1962.

29. Соловьев Г.А. Применение вариограмм для интерпретации графиков геофизических наблюдений. Разведочная геофизика, М., "Недра", вып. 37, 1970.

30. Тархов А.Г., Борков В.С. К методике электропрофилирования при неоднородных наносах. Бюллетень научно-технической информации № 7 (12) Министерство геологии и охраны недр, 1957.

31. Яковенко П.И. Инженерно-геологическая оценка закарстованной территории. "Транспортное строительство", 1968, № 3.

32. Яковенко П.И. Оценка карста в основании железной дороги. "Транспортное строительство", № 7, 1968.

33. Ященко З.Г. Опыт применения электроразведки для исследования проявлений карста в долинах рек Ангары и Зап.Двины. Изв. ВУЗов "Геология и разведка",1959,№ 1.

gost.e-ecolog.ru