ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕЖСКВАЖИННОГО РАДИОВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОСНОВАНИЯ МОСТОВЫХ ОПОР

A CASE STUDY OF CROSSHOLE RADIOWAVE SURVEY OF A BRIDGE PIER FOOTING

ПАНОВ В.С.
Геофизик ООО «Радионда СПВ», аспирант Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе (РГГРУ), г. Москва, v.panov@radionda.ru

PANOV V.S.
A geophysicist of the «Radionda SPV» Ltd. and graduate student of Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, v.panov@radionda.ru

Ключевые слова: каротаж; литологическое расчленение; мост; опора; радиоволновая геоинтроскопия; разрез; скважина.

Key words: well logging; lithological differentiation; bridge; pier; radiowave geointroscopy; section; borehole.

Аннотация: в статье описана технология исследования оснований мостовых опор и вмещающей их геологической среды с использованием скважинных геофизических методов — гамма-каротажа, односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП) и межскважинной радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ). Приведены параметры аппаратуры и методика измерений. Рассмотрены результаты полевых исследований. Проведена корреляция пластов вдоль всей длины моста и построен геолого-геофизический разрез. Выявлены карстоопасные участки в околоскважинном и межскважинном пространстве. Разработана методика определения глубин заложения опор. Предложена оптимальная сеть расположения изыскательских скважин для более эффективного межскважинного просвечивания.

Abstract: a technology of investigation of bridge pier footings and the enclosing geological environment using borehole geophysical methods (gamma-ray logging, one-borehole radiowave profiling, crosshole radiowave geointroscopy) is described in the paper. The equipment parameters and measurement technique are presented. The results of field investigations are considered. The geological layers along the whole bridge length are correlated and the geologic-geophysical section is constructed. The karst hazardous areas in peri- and crosshole space are revealed. A determination technique of the bridge pier footing depth is developed. The optimal well pattern for more effective crosshole radiowave survey is offered.

Введение

Современные инженерно-геологические изыскания часто проводятся на больших глубинах, под зданиями и сооружениями, в условиях пересеченного рельефа.

Эти обстоятельства сильно ограничивают возможности проведения наземных геофизических методов, разрешающая спосность которых значительно снижается с увеличением глубины исследований и при наличии геологических и промышленных помех.

В отличие от наземных скважинные радиоволновые методы позволяют: приблизить систему измерений к исследуемому объекту и исключить влияние приповерхностных неоднородностей; подобрать оптимальную рабочую частоту, обеспечивающую максимальную разрешающую способность исследований в конкретных геологических условиях.

Мостовые сооружения, особенно пересекающие крупные водные преграды, являются долговременными и часто служат в течение столетий. В то же время они представляют собой объекты повышенной опасности и должны вовремя обследоваться и подвергаться ремонту.

Рассмотренные в настоящей статье работы по опробованию скважинных методов были проведены в процессе инженерно-геологических изысканий на участке расположения моста, построенного в начале XX века. В геологическом строении его основания принимают участие морские глины и известняки, аллювиальные песчано-глинистые отложения и насыпные техногенные грунты. Во избежание деформаций моста необходимо, чтобы его опоры были установлены на твердом основании, которым в данном случае является горизонт плотных известняков. Однако к моменту начала геофизических работ точные глубины заложения опор не были известны. Данное обстоятельство в совокупности с отсутствием информации о современном состоянии вмещающей опоры геологической среды препятствовало достоверной оценке технического состояния моста в целом.

В соответствии с этим основными задачами проводившихся на данном объекте инженерно-геологических изысканий являлись оценка карстово-суффозионной опасности для рассматриваемого моста и определение фактической глубины заложения его опор с помощью ряда скважинных геофизи-

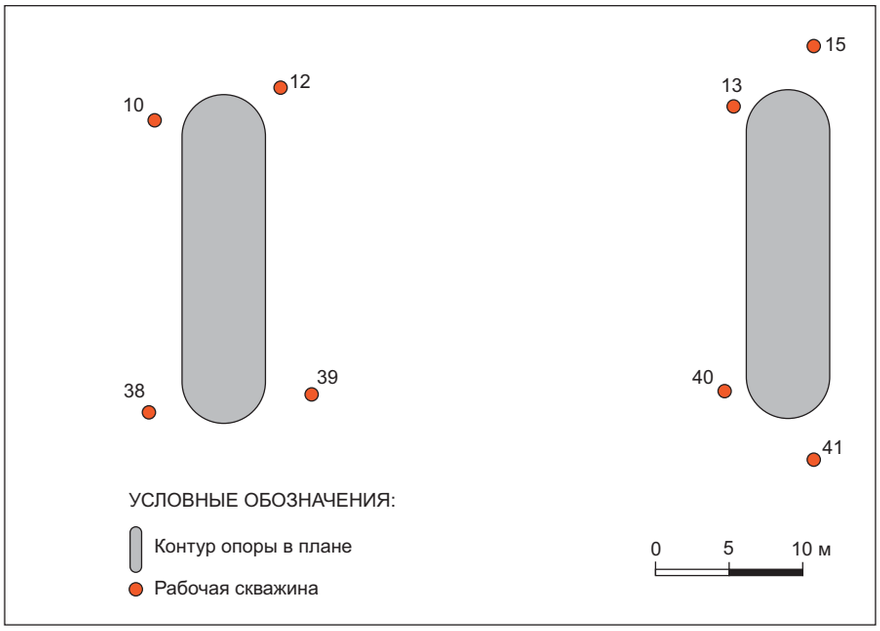

Рис. 1. Фрагмент плана участка работ

ческих методов. Целью же настоящей статьи является оценка возможностей использования (вклада) каждого из использованных методов при изучении данного инженерно-геологического объекта и, следовательно, других объектов рассмотренного типа.

Характеристика объекта исследований

В конструкцию каждой опоры моста входит кессон — металлический объемный объект, служивший во время строительства защитой от проникновения грунтовых вод в рабочее пространство при выемке грунта. Так как после завершения строительных работ кессон не извлекался, за основание опоры справедливо принимать основание кессона.

Для геофизических исследований использовались уже пробуренные вокруг каждой опоры изыскательские скважины средней глубиной по 35 м, в которые были установлены обсадные колонны из полиэтиленовых труб с внутренним диаметром 90 мм. Для примера на рис. 1 представлен небольшой фрагмент общего плана участка, на котором приведены контуры двух опор и схема расположения скважин.

В связи с выходом керна, составляющим только 70–80%, проведение каротажа являлось необходимым условием надежного и детального литологического расчленения толщи пород и выявления возможных карстово-суффозионных полостей, расположенных непосредственно вблизи стволов скважин.

Методика работ

Комплекс каротажных исследований включал в себя гамма-каротаж (ГК) и электрический каротаж методом односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП).

Измерения естественной гамма-активности проводились высокочувствительным скважинным радиометром ИОН-2/42 производства ОАО «ОСКБП» в режиме непрерывной цифровой записи с дискретностью 0,1 м.

Метод ОРВП основан на бесконтактном измерении осевой компоненты напряженности электрического поля в диапазоне частот 1-50 МГц, что позволяет проводить исследования в скважинах с полиэтиленовой обсадкой. Результатом обработки полученных данных являются диаграммы вычисленных значений кажущихся удельных сопротивлений $\rho_к$. Каротаж выполнялся аппаратурой ОРВП-40 производства ООО «Тульский геофизический центр», в которой скважинный зонд состоит из передатчика и

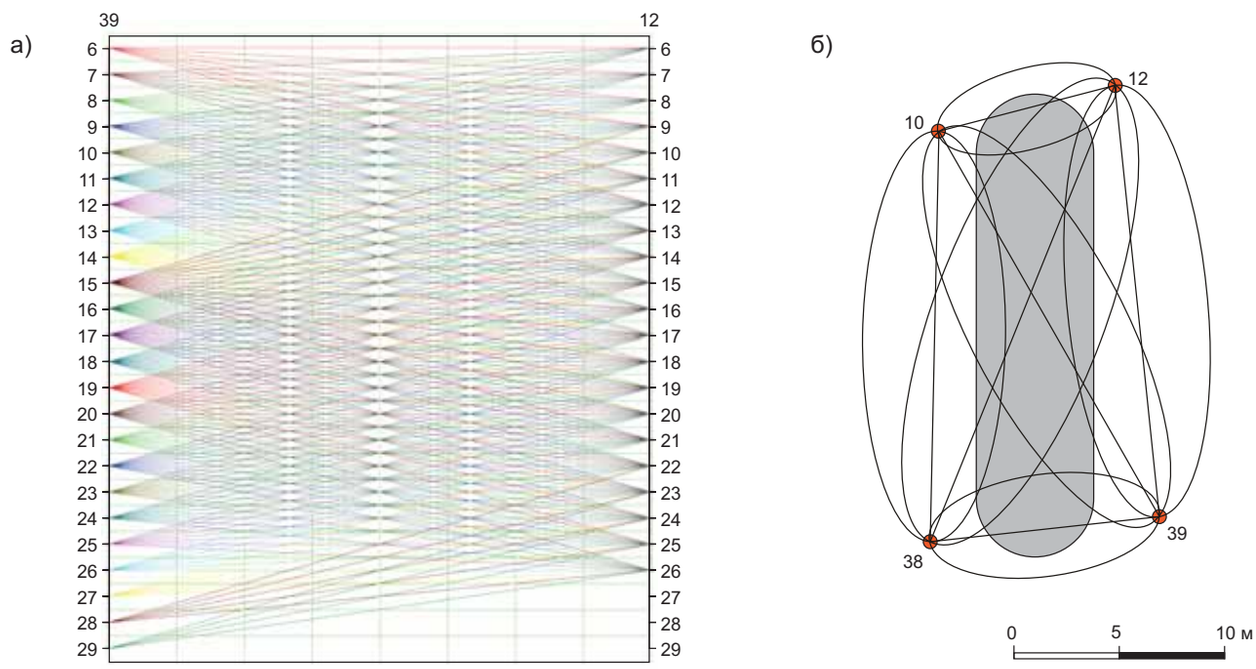

Рис. 2. Веерная схема просвечивания методом РВГИ между скважинами 39 и 12 (вертикальная ось — глубина по скважине *H*, м) (а); зоны Френеля для измерений на частоте 20 МГц и сопротивлений пород 300 Ом·м (условные обозначения — см. рис. 1) (б)

приемника, находящихся на расстоянии 2 м друг от друга. Измерения проводились на двух частотах — 1,25 и 31 МГц.

Межскважинное просвечивание (томографическая съемка) выполняется веерным способом, при котором положения излучателя в одной скважине фиксируются, а в другой скважине, где находится приемник, производятся измерения с заданным шагом по всему рабочему интервалу. Такая схема измерений (рис. 2, *а*) позволяет путем многократного просвечивания исследуемого блока проводить дистанционное определение электрических свойств пород и их распределение в исследуемом объеме. Породы, обладающие более низким сопротивлением ($\rho_{эф}$), характеризуются более высоким поглощением радиоволн.

Данные измерения выполнялись скважинной аппаратурой РВГИ-07 производства ООО «Тульский геофизический центр» [3] на основной рабочей частоте 20 МГц. При средних сопротивлениях пород 180 Ом·м эта частота обеспечивала, с одной стороны, максимальную разрешающую способность метода, а с другой — выполнение так называемых условий «волновой зоны» [4] во всем диапазоне расстояний между скважинами (7–22 м). Это позволило выполнить просвечивание между всеми скважинами, окружающими опоры. При этом, как видно из рис. 2, *б*, ширина зоны, существенной для распространения радиоволн (зоны Френеля), на этой частоте такова, что влияние опоры присутствует во всех сечениях до глубины ее основания [5].

Результаты измерений

Для предварительной оценки корреляции пластов графики ГК по всем скважинам профиля были совмещены на одной диаграмме по характерным экстремумам (рис. 3). По ряду скважин была получена уверенная корреляция отдельных тонких пластов.

Так как гамма-активность определяется параметром глинистости, можно говорить о том, что границы выделяемых по ГК интервалов соответствуют литологическим границам. Это позволило построить детальный геологический разрез вдоль всей длины моста (рис. 4) и выделить в нем основные комплексы пород.

При литологическом расчленении данной толщи с помощью ГК в первом приближении можно выделить следующие основные комплексы пород (снизу вверх):

- *слой* 1 с гамма-активностью до 90 мкР/ч соответствует пласту глин;
- *слои* 2, 3, 4, 5 с различными показателями глинистости (7–11; 15–20; 5,5–7,0; 15–25 мкР/ч соответственно) относятся к толще глинистых известняков;
- *слой* 6 — плотный известняк, характеризующийся значениями гамма-активности 4–8 мкР/ч;
- *слои* 7, 8 соответственно представлены элювиальными щебнистыми грунтами с гамма-активностью 4–6 и 10–12 мкР/ч (вся толща, включающая в себя глины, известняки, глинистые известняки и элювий, то есть слои 1–8, приурочена к нижнему отделу каменноугольной системы);
- выше по разрезу выделяется четвертичная аллювиальная песчано-глинистая толща, соответствующая слоям 9, 10 (4–7 и 11–18 мкР/ч соответственно);
- в самой верхней части разреза наблюдаются потеря корреляции и разброс значений гамма-активности, что можно связать с присутствием выделенного по данным бурения насыпного грунта (слой 11).

Корреляция пластов по электрическому сопротивлению значительно хуже. Это связано, во-первых, с тем, что разные породы, например известняки и пески, обладают близкими значениями электрического сопротивления, а во-вторых, с тем, что на электрическое сопротивление большое влияние оказывает степень трещиноватости и водонасыщенности пород.

Таким образом, внутри слоя 7 по результатам электрокаротажа была выделена карстовая полость, характеризующаяся относительно более низкими значениями удельных сопротивлений, а также характерной «изрезанностью» кривой ОРВП внутри этого слоя, кото-

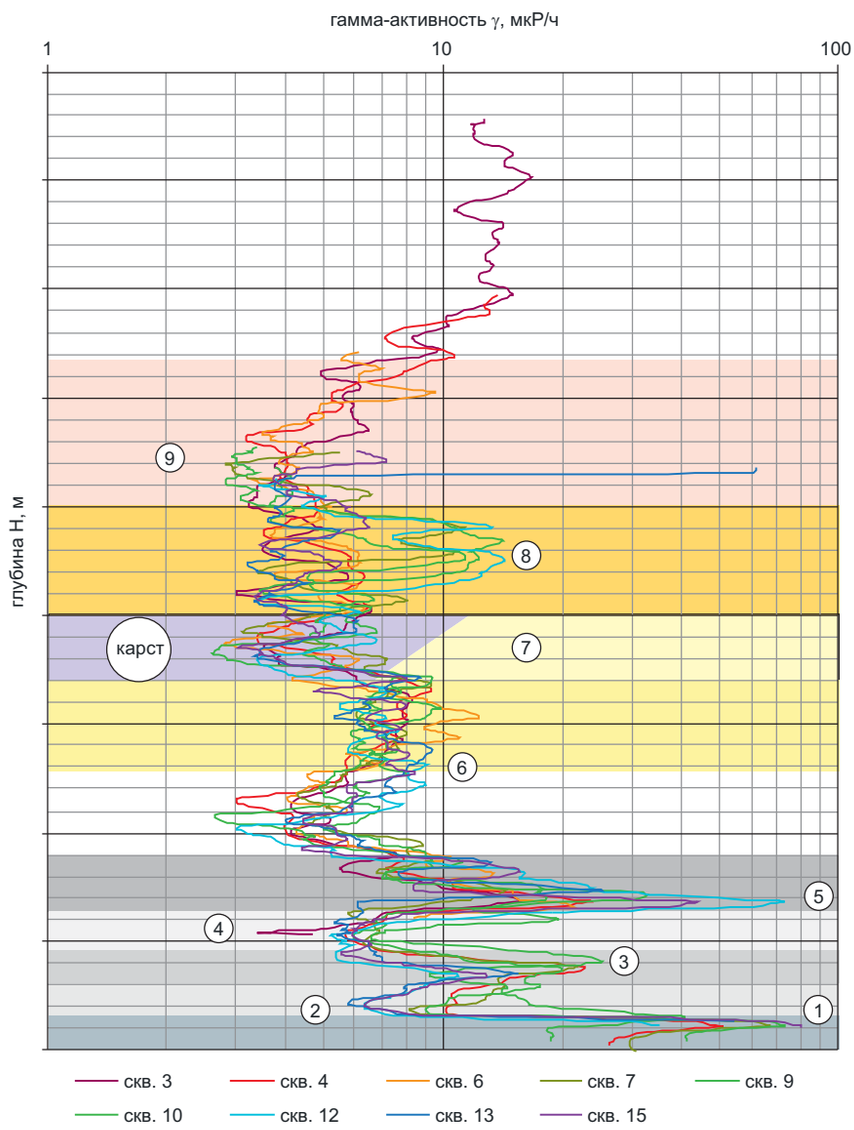

Рис. 3. Корреляция тонких пластов по данным гамма-каротажа: *H* — глубина по скважине, м; γ — гамма-активность, мкР/ч

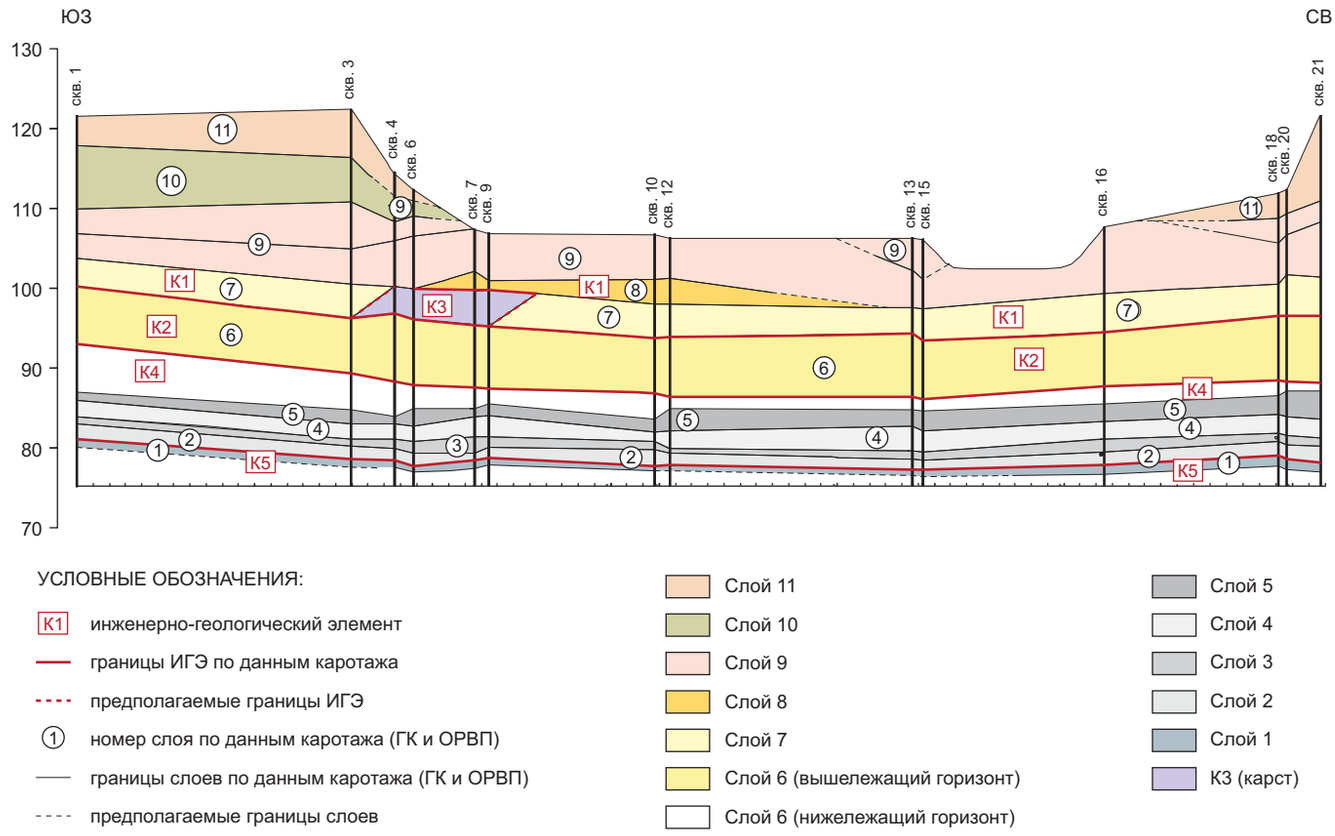

Рис. 4. Разрез, построенный по данным гамма-каротажа

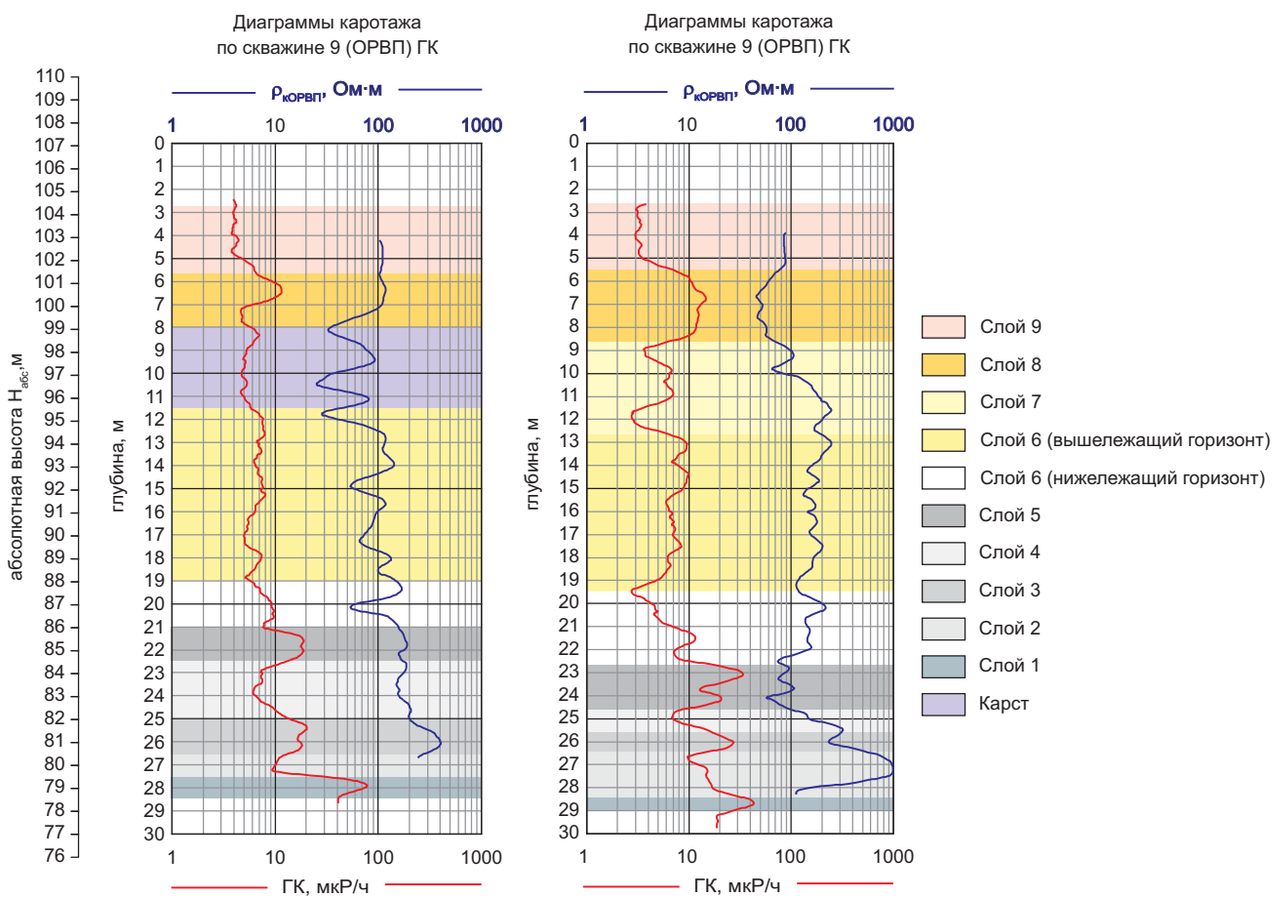

Рис. 5. Каротажные диаграммы для двух соседних скважин.

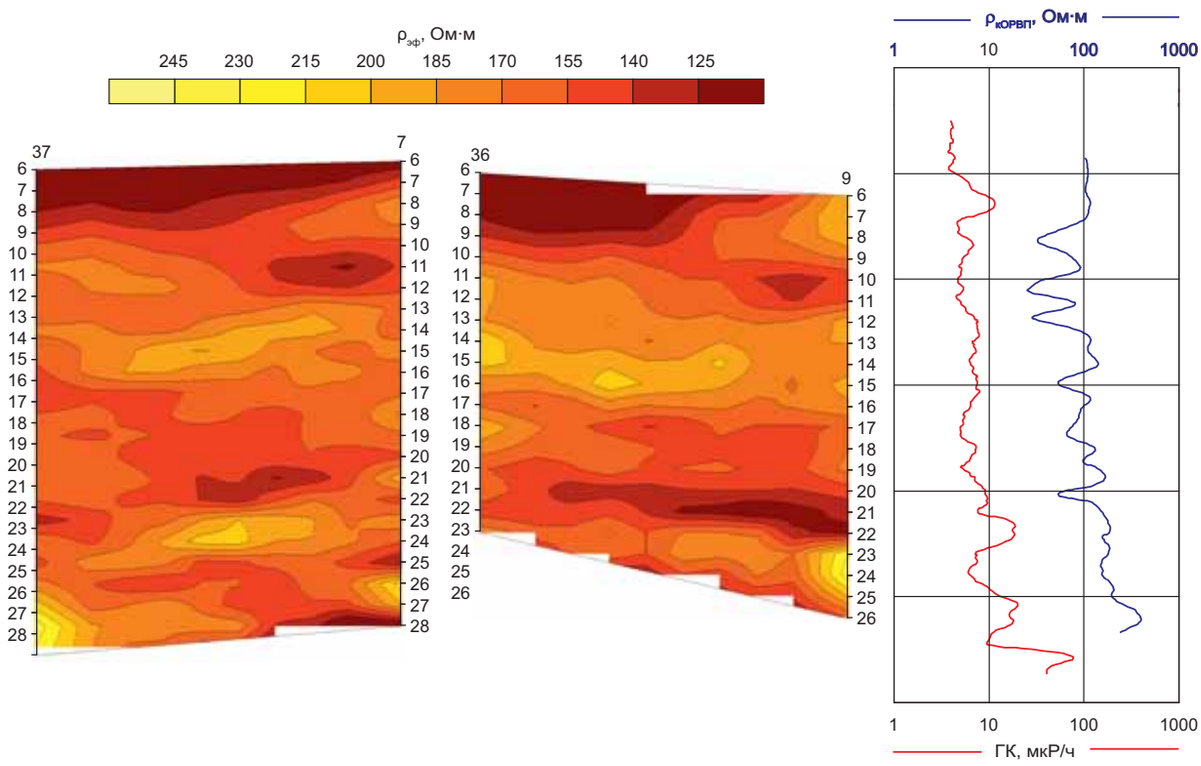

Рис. 6. Геоэлектрические разрезы в сечениях скважин 36–9 и 36–7 на частоте 20 МГц. Н — глубина по скважине, м; γ — гамма-активность, мкР/ч; $\rho_{кОРВП}$ — кажущиеся удельные сопротивления, измеренные с помощью метода ОРВП, Ом·м; $\rho_{эф}$ — эффективные сопротивления, измеренные методом РВГИ, Ом·м. Графики каротажа в правой части рисунка описаны в тексте и являются вспомогательными при определении глинистого пласта и предположительной карстовой области выше него

рой не наблюдается в соседних скважинах (рис. 5). Наличие в данном месте карста подтверждается также информацией по данным исследования кернов. Однако оконтурить выявленную карстовую полость, определить ее размеры и положение в пространстве по геологическим и каротажным данным невозможно.

Для решения данной задачи на площади объекта было выполнено радиопросвечивание способом радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства — РВГИ [2].

По результатам межскважинного просвечивания вокруг каждой опоры были построены геоэлектрические разрезы РВГИ, позволяющие получить представление об однородности плотных известняков и степени их закарстованности. В качестве примера на рис. 6 приведены геоэлектрические разрезы в сечениях 36–9 и 37–7 вокруг опоры 5. В сечении 36–9 наблюдается вытянутая маломощная низкоомная область, вскрытая скважиной 9 на глубине 20,5–22,0 м. Этот интервал по данным бурения соответствует переслаиванию сильно трещиноватых и кавернозных известняков слабой прочности и глин. По данным гамма-каротажа глины в пределах этого интервала выделяются на глубине 21,2–22,0 м. Низкоомная область, которая наблюдается выше глинистого пласта (до глубины 17 м в центральной части разреза 36–9), вероятно, связана с сильно насыщенными водой известняками, что подтверждается результатами каротажа ОРВП в скважине 9 — локальным понижением уровня УЭС до 50 Ом·м. В центральной части разреза 37–7 на тех же глубинах выделяется область с идентичными значениями эффективных сопротивлений (140–155 Ом·м). Это может указывать на наличие зоны распространения карстоопасной области в известняках.

Помимо изучения разреза основания важной задачей являлось также определение фактической глубины заложения опор моста. Конструкция опоры содержит в нижней части металлический кессон высотой не менее 2 м и площадью приблизительно с опору. Такой объект не может не отмечаться методом РВГИ даже на больших расстояниях просвечивания. На рис. 7 представлен фрагмент объемной геоэлектрической карты — вертикальный разрез между двумя опорами, построенный по данным измерений на частоте 5 МГц. Опоры выделяются как области пониженных сопротивлений. При этом определить точные глубины их заложения на имеющемся разрезе невозможно. Однако практическая задача состояла в максимально точном (до первых десятков сантиметров) определении глубины расположения подошвы опор, то есть положения нижней кромки кессона. Сложность ее пространственной локализации в рассматриваемых геолого-технологических условиях связана с двумя факторами:

1) искомая нижняя кромка кессона располагается вблизи контрастной по сопротивлению границы между известняками и элювиальными щебнистыми грунтами;

2) схема расположения скважин (см. рис. 1, 5, *б*), пробуренных для геологических исследований, крайне неблагоприятна для радиопросвечивания, так как она неравномерна (расстояние между скважинами изменяется от 7 до 22 м); все сечения РВГИ вынужденно ориентированы вдоль длинной стороны объекта и осложнены влиянием опоры (отсутствуют сечения с выходом в «нормальное поле» и ориентированные вкрест объекта).

Таким образом, точное определение границы опоры с помощью известных томографических алгоритмов не представляется возможным. На полученных продольных томографических

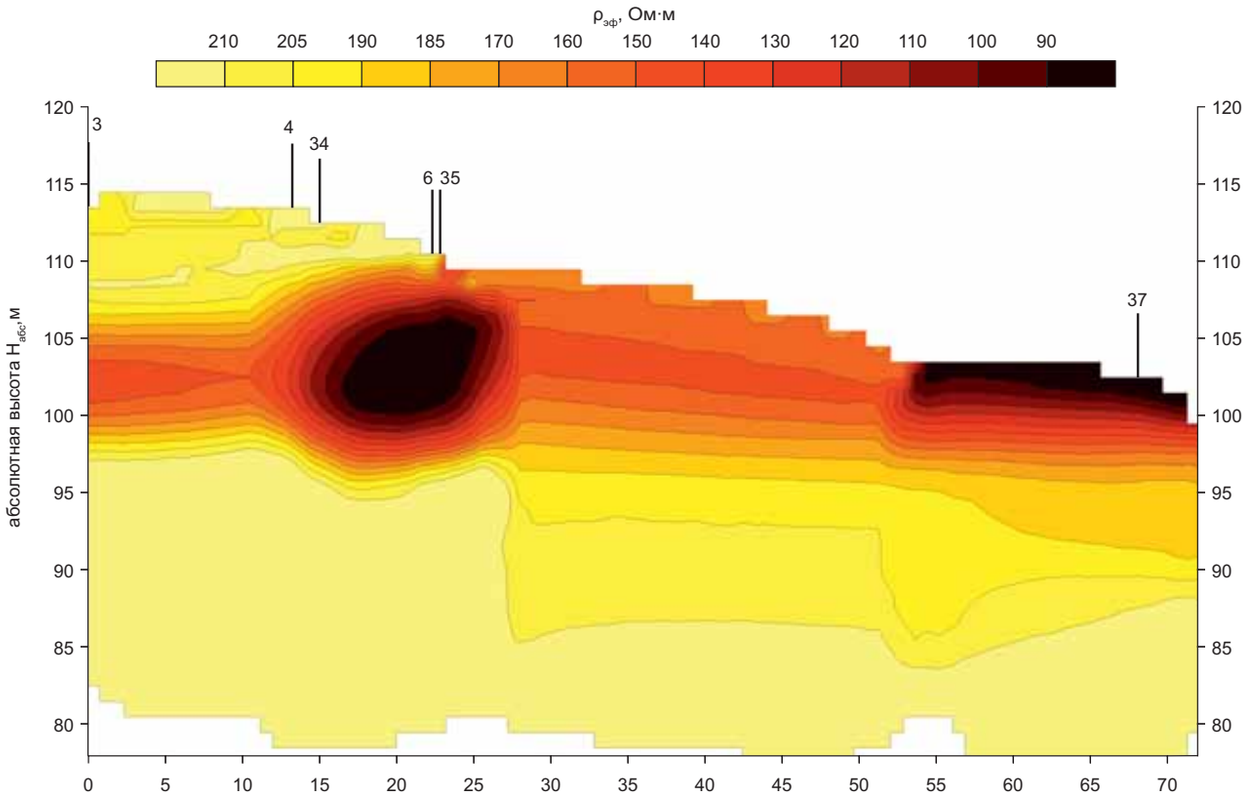

Рис. 7. Фрагмент 3D геоэлектрической карты: геоэлектрический разрез на частоте 5 МГц: $\rho_{эф}$ — эффективные сопротивления, измеренные методом РВГИ, Ом·м; вертикальная ось — абсолютные отметки $H_{абс}$, м

геоэлектрических разрезах опорам соответствуют лишь размытые области низких сопротивлений. Тем не менее для решения поставленной задачи в имеющихся неблагоприятных условиях были опробованы три способа интерпретации (разработанные для рудных объектов): (1) сравнения; (2) наименьших экранирующих площадей (НЭП); (3) 3D геоэлектрического картирования. Рассмотрим их подробнее.

1. Определение нижней границы опоры по графикам измеренной напряженности электрического поля $E_{изм}$. В однородной среде максимальная величина $E_{изм}$ наблюдается при кратчайшем расстоянии «передатчик — приемник». В нашем случае наибольшие значения сигнала будут наблюдаться, когда излучатель и приемник находятся на одной абсолютной отметке. Металлический кессон в основании опоры является объектом с аномальным поглощением энергии электромагнитного поля на пути распространения волны от излучателя к приемнику. Следовательно, наибольшее значение $E_{изм}$ будет зафиксировано в области, свободной от влияния кессона. Таким образом, анализируя графики напряженности электрического поля, можно определить положение нижней границы кессона, а принимая во внимание величину шага измерений (1 м), можно заключить, что основание кессона располагается в метровом интервале, нижней границей которого является отметка с максимальным уровнем принимаемого сигнала. На рисунке 8 изображены графики $E_{изм}$ по одному из сечений вдоль мостовой опоры для трех стоянок передатчика (график для каждой из них имеет свой цвет). Глубины стоянок приемника в абсолютных отметках отложены по вертикальной оси. Положения стрелок соответствуют одинаковым глубинам приемника и передатчика. Как видно на приведенных графиках, на глубине 97 м ожидаемого максимума сигнала не наблюдается. На отметке 96 м максимум также отсутствует, но уровень $E_{изм}$ вырос. Максимальная величина напряженности электрического поля, зафиксированная на отметке 95 м, позволяет локализовать основание кессона в интервале между отметками 95 и 96 м.

2. Метод наименьшей экранирующей площади. Этот способ обработки и интерпретации данных радиопросвечивания был разработан на основе физического моделирования. Он базируется на использовании закономерностей поведения изолиний коэффициента экранирования на обобщенной плоскости[1]. Лучи просвечивания, проходящие через кромку идеально проводящего тела, характеризуются значениями коэффициента экранирования Ý ≈ 2. Это свойство кромочных лучей, сохраняющееся в достаточно широком диапазоне условий просвечивания, было использовано в различных способах локализации рудных тел в межскважинном пространстве.

На рисунке 9 представлен геоэлектрический разрез между двумя скважинами (39 и 12) вдоль одной из опор (а), а также обобщенная плоскость с изолиниями коэффициентов экранирования (б). Черными линиями на разрез вынесены кромочные лучи просвечивания, снятые с изолинии Э ≈ 2 на обобщенной плоскости (отмечены знаками «+») (см. рис. 9, *б*). Голубым цветом показана граница, полученная способом НЭП, ограничивающая искомый объект снизу (см. рис. 9, *а*). Нижняя ее точка с абсолютной отметкой 96,5 м соответствует основанию кессона.

[1] Обобщенная плоскость — способ представления результатов радиопросвечивания на плоскости, координатной осью X которой является скважина приемника, а осью Y - скважина передатчика. Отдельный луч, пересекающий скважины на глубинах x_i и y_i соответственно, на обобщенной плоскости отображается в виде точки с координатами x_i и y_i и значением коэффициента экранирования Э, соответствующего уровню экранирования данного луча (Э= $E_{норм}/E_{изм}$, где $E_{норм}$ — напряженность нормального поля при данных условиях измерений) [1]

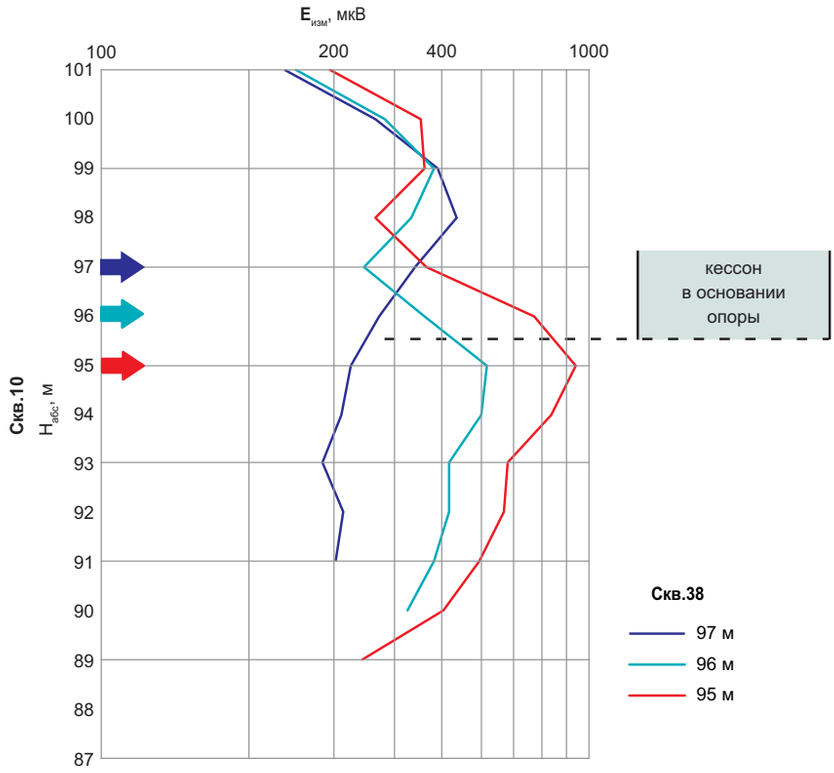

Рис. 8. Определение нижней границы опоры по графикам измеренной напряженности электрического поля Еизм (мкВ). $H_{абс}$ — абсолютная отметка, м; H — глубина по скважине, м

3. Способ 3D геоэлектрического картирования с помощью РВГИ. Построение 3D геоэлектрической карты по данным РВГИ проводится способом волнового восстановления, который количественно учитывает параметры зоны Френеля и закономерности распределения энергии внутри нее [4]. Преимуществами 3D метода являются возможность одновременной обработки всех данных просвечивания и создание трехмерной матрицы значений $\rho_{эф}$, что обеспечивает полноту исследования межскважинного пространства и позволяет построить любое произвольное сечение.

На рисунке 10 изображены горизонтальное сечение 3D геоэлектрической карты РВГИ на глубине 8 м с нанесенным контуром опоры и поперечное вертикальное сечение по линии I-I, проходящее через середину опоры. В центральной части разреза на изолиниях $\rho_{эф}$ достаточно четко проявляется нехарактерное локальное понижение подошвы пород с низким сопротивлением, что можно объяснить влиянием опоры. Вопрос заключается в том, по какой именно изолинии следует провести нижнюю границу кессона? С обеих сторон разреза приведены диаграммы кажущихся сопротивлений, полученные по данным каротажа ОРВП в скважинах 12 и 38, на которые влияние опоры отсутствует в связи с ограниченной глубинностью метода. На обеих каротажных кривых хорошо выделяются интервалы перехода от грунтов с низким сопротивлением к грунтам с более высоким сопротивлением. Стоит заметить, что при отсутствии опоры эта граница и в данных просвечивания прошла бы горизонтально. Изолиния с $\rho_{эф}$ = 180 Ом·м, соединяющая указанные интервалы перехода на графиках ОРВП, в средней части разреза опускается вниз по разрезу до глубины с абсолютной отметкой $H_{абс}$ = 97 м. Это значение можно принять за глубину заложения опоры моста.

Следует отметить, что условия для решения вышеназванных задач методом радиопросвечивания были неблагоприятными. Дело в том, что оптимальной для применения РВГИ является равносторонняя треугольная сеть скважин. Конкретная величина расстояния между скважинами рассчитывается исходя из уровня сопротивлений исследуемой среды и требуемой детальности исследований. Для этих условий определяются рабочие частоты измерений. В рассматриваемом в статье случае, например, оптимальное расстояние между скважинами должно составлять 15-20 м, а оптимальная схема расположения скважин приведена на рис. 11. Преимущества такой сети заключаются в том, что три сечения на-

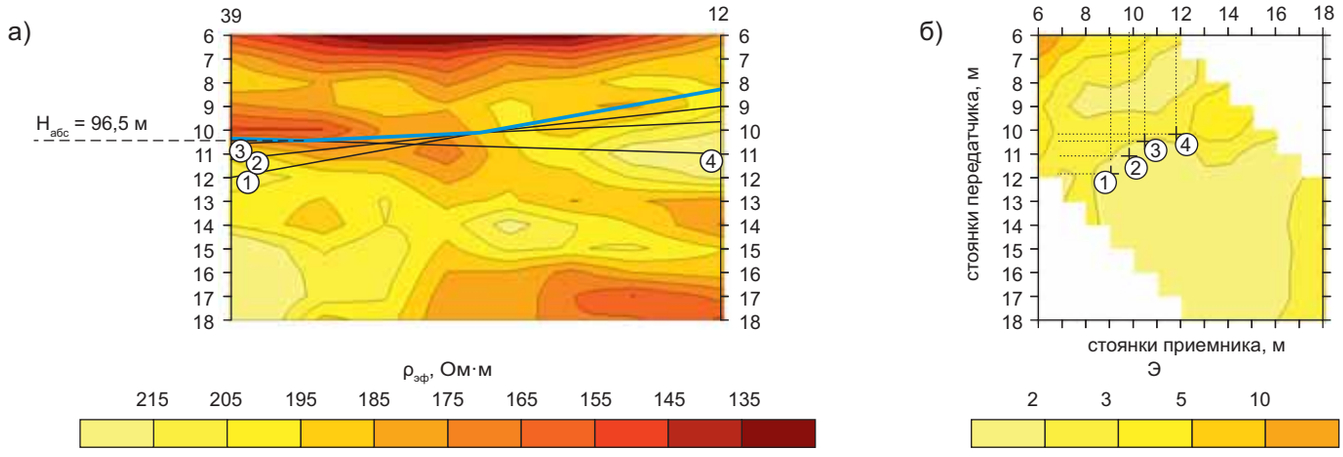

Рис. 9. Выявление нижней границы опоры по величине коэффициента экранирования Э = 2: а — геоэлектрический разрез в сечении скважин 39–12, б — обобщенная плоскость коэффициентов экранирования между скважинами 39 и 12. $H_{абс}$ — абсолютная отметка, м; $\rho_{эф}$ — эффективное сопротивление, измеренное методом РВГИ, Ом·м; Э — коэффициент экранирования

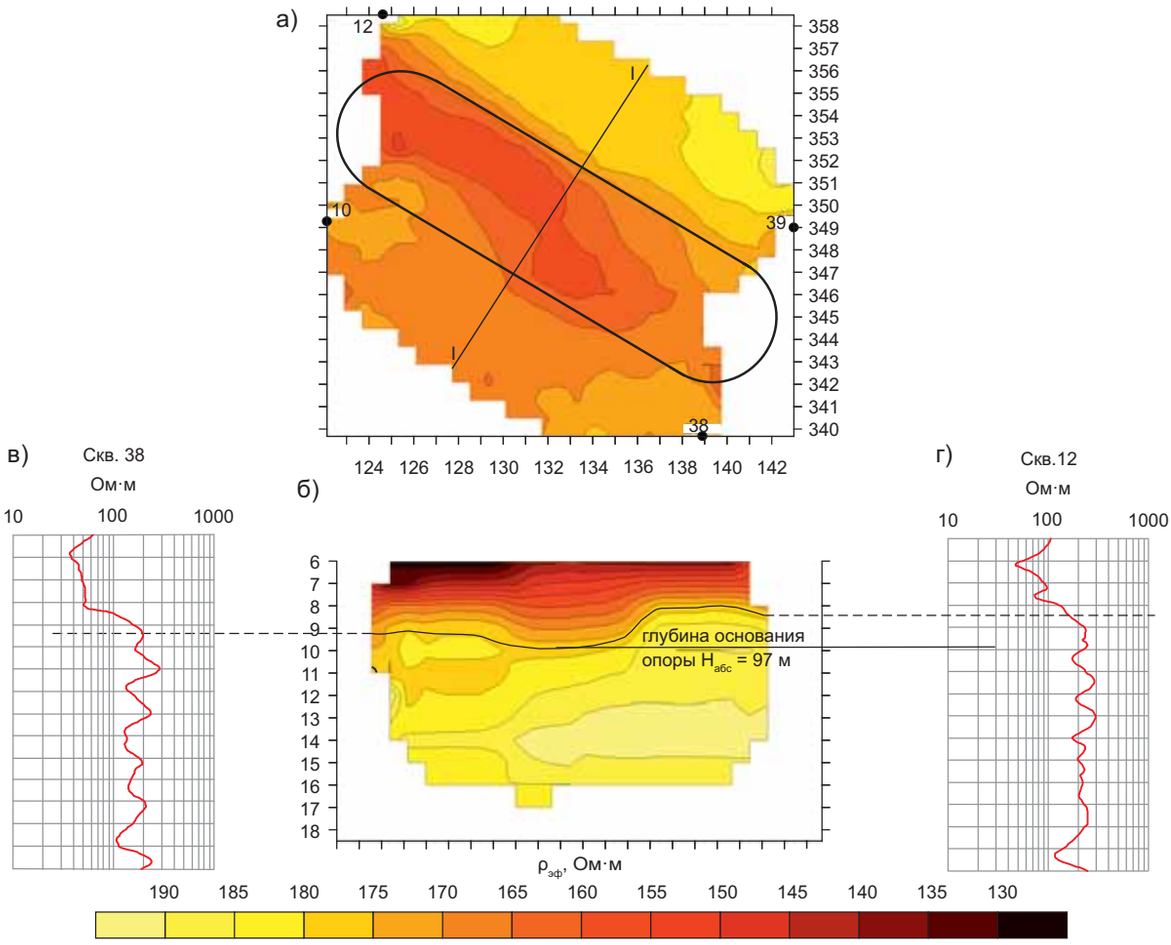

Рис. 10. Определение нижней границы опоры по поперечному разрезу 3D геоэлектрической карты по данным РВГИ: а — горизонтальное сечение 3D геоэлектрической карты РВГИ на глубине 8 м с нанесенным контуром опоры; б — поперечное вертикальное сечение по линии I-I, в — диаграмма каротажа ОРВП по скважине 38; г — диаграмма каротажа ОРВП по скважине 12; $H_а$ — глубина по скважине, м; $\rho_{эф}$ — эффективное сопротивление, измеренное методом РВГИ, Ом·м; $\rho_{кОРВП}$ — кажущееся удельное сопротивление, измеренное с помощью метода ОРВП, Ом·м

правлены вкрест опоры (исключается одинаковое влияние опоры на всю плоскость просвечивания), а четыре сечения являются «свободными» от ее влияния. В этом случае появляется возможность сравнивать результаты измерений при одних и тех же геологических и технологических условиях изучаемой среды.

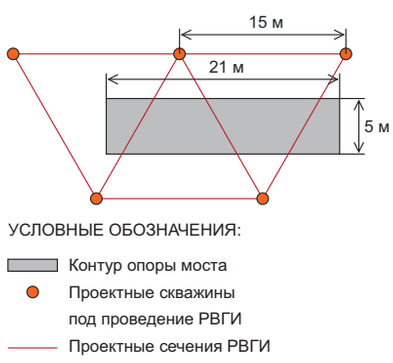

Рис. 11. План оптимальной сети скважин для исследования опор

Заключение

На основе результатов проведенных исследований можно сделать выводы о вкладе каждого из использованных методов при изучении инженерно-геологических объектов рассмотренного типа.

Гамма-каротаж может быть применен для литологического расчленения разреза, основным критерием для которого будет служить глинистость.

При комплексировании ГК и ОРВП становится возможным построение геологических разрезов и выделение в них областей развития локальных неоднородностей, таких как карст. Условием для этого является связь электрического сопротивления со свойствами пород (трещиноватостью, обводненностью).

С помощью метода РВГИ возможно оконтуривать исследуемые объекты в межскважинном пространстве, а также выявлять в исследуемой толще аномально низкоомные объекты (опоры мостов) и отслеживать их границы.

Список литературы

1. *Борисов Б.Ф., Гуревич Г.Ф., Чигирина И.И.* Методические указания по обработке и интерпретации результатов радиопросвечивания в анизотропных средах при редкой сети скважин. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 1984. С. 7–41.
2. *Истратов В.А.* Радиоволновые исследования межскважинного пространства // Инженерные изыскания. 2008. № 4. С. 78–83.
3. *Истратов В.А., Остапчук С.И., Скринник А.В., Перекалин С.О.* Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии горных пород в межскважинном пространстве «РВГИ-2005» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 1(15). С. 20–26.
4. *Кузнецов Н.М.* Способ 3D обработки данных радиоволнового просвечивания межскважинного пространства // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 240–246.
5. *Фейнберг Е.Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Недра, 1961.