



## ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.370+550.834+550.822

EDN: XYILPH

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-50-64



## Опытнo-методические геофизические и буровые работы для изучения геометрии, состояния и свойств скрытых фундаментов

А.В. Лазурченко<sup>a✉</sup>, А.Г. Дмитриев<sup>b</sup>, А.В. Мироманов<sup>c</sup>, А.Б. Губанов<sup>d</sup><sup>a-d</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

**Резюме.** В настоящее время большинство предприятий (заводов) ведут свою деятельность в зданиях, построенных во времена Советского Союза. В связи с этим появилась необходимость оценки состояния цехов и их дальнейшей реконструкции. Целью проведенного исследования являлась оценка состояния несущих конструкций здания химического завода, включая подземные фундаменты. После проведения шурфования некоторых подземных железобетонных конструкций несущей части исследуемого здания было определено несоответствие реальных геометрических параметров конструкций с их проектными характеристиками (согласно проектным документам). Для изучения состояния несущей конструкции в виде скрытых фундаментов без остановки производства были привлечены геофизические методы в комплексе с бурением малогабаритной установкой и дальнейшим отбором кернa образцов фундамента. Высокая плотность наземного технологического оборудования, наличие электрических кабель-каналов, водосточных коллекторов и других подземных коммуникаций являлись основными проблемами при проведении работ. В рамках опытнo-методических работ использовались следующие геофизические методы: градиентометрия, частотное электромагнитное зондирование, электротомография, сейсмоакустика и георадиолокационное зондирование. Бурение алмазной коронкой диаметром 96 мм со съемным керноприемником обеспечивает практически стопроцентный выход кернa с минимальной деформацией опорной конструкции. В результате проведенной работы были определены геометрические параметры подземных опор по данным георадиолокации и электротомографии, отобраны образцы фундамента и определены их физико-механические свойства, что в дальнейшем позволило определить марку бетона.

**Ключевые слова:** фундамент, геофизические исследования, георадиолокация, электротомография, сейсмоакустика, бурение, физико-механические свойства

**Для цитирования:** Лазурченко А.В., Дмитриев А.Г., Мироманов А.В., Губанов А.Б. Опытнo-методические геофизические и буровые работы для изучения геометрии, состояния и свойств скрытых фундаментов // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 50–64. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-50-64>. EDN: XYILPH.

## GEOPHYSICS

Original article

## Field trial geophysical and drilling works to study geometry, state and properties of hidden foundations

Anton V. Lazurchenko<sup>a✉</sup>, Alexander G. Dmitriev<sup>b</sup>,  
Andrey V. Miromanov<sup>c</sup>, Aleksey B. Gubanov<sup>d</sup><sup>a-d</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** Today, most Russian enterprises operate in the plants built in the Soviet era. Therefore, there is a need to assess the condition of workshops with the aim of their further reconstruction. The purpose of the present study is to assess the condition of the load-bearing structures of the chemical plant building including underground foundations. Conducted test pits of some underground reinforced concrete structures of the load-bearing part of the building under study revealed a discrepancy between the actual geometric parameters of the structures and their design characteristics (according to the design documents). Not to stop the production while studying the condition of the supporting structure in the form of hidden foundations, geophysical methods were used in combination with drilling with a small-sized rig and subsequent core sampling of foundation. High density of above-ground technological equipment, the presence of electrical cable channels, drain

© Лазурченко А.В., Дмитриев А.Г., Мироманов А.В., Губанов А.Б., 2025



collectors and other underground utilities were the main challenges of the work. The following geophysical methods were used in experimental and methodological works: gradiometry, frequency electromagnetic sounding, electrical resistivity tomography, seismic acoustics and ground penetrating radar sounding. Drilling with a 96 mm diameter diamond core bit with a removable core receiver ensures almost 100 % core recovery with minimal deformation of the supporting structure. As a result of the work performed, the geometric parameters of the underground supports were determined using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography data, foundation samples were collected and their physical and mechanical properties were determined, which allowed to identify the concrete grade.

**Keywords:** foundation, geophysical study, ground penetrating radar, electrical resistivity tomography, seismoacoustics, drilling, physical-mechanical properties

**For citation:** Lazurchenko A.V., Dmitriev A.G., Miromanov A.V., Gubanov A.B. Field trial geophysical and drilling works to study geometry, state and properties of hidden foundations. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):50-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-50-64>. EDN: XYILPH.

## Введение

Изучение скрытых несущих фундаментов (опор) было выполнено на территории одного из цехов химического завода, строительство которого проходило в 1950-х гг. В связи с планируемой реконструкцией объекта возникла необходимость оценки технического состояния и определения реальной несущей способности скрытых опорных элементов. Первоначально обследование осуществлялось методом шурфования на всю глубину заложения опор с непосредственным определением физико-механических свойств бетона и подстилающих грунтов. Однако подобные работы на химическом предприятии без остановки производства были запрещены органами Госгортехнадзора. В связи с этим для изучения подземных конструкций без нарушения их целостности были привлечены геофизические методы, как единственно возможный источник информации, позволяющий определить конструктивные особенности фундамента и состояние подстилающих грунтов без прямого воздействия [1–6].

Работы проводились в три этапа. В ходе первого этапа был произведен анализ такой проектной технической документации, как паспорта, технические журналы, комплекты общестроительных чертежей и т. п., осуществлена фотодокументация поверхностных условий, а также подобраны результаты осмотров, предыдущих обследований и экспертиз ряда опор. Работы второго этапа были нацелены на определение возможностей, оценку эффективности и разработку оптимального комплекса геофизических исследований, обоснование методики и техники их проведения при изучении геометрических характеристик и физико-механических свойств подземных бетонных конструкций. На третьем этапе были проведены контрольное бурение, ультразвуковые измерения (УЗИ) скорости и опреде-

ление прочностных характеристик бетона на образцах фундамента.

## Материалы и методы исследования

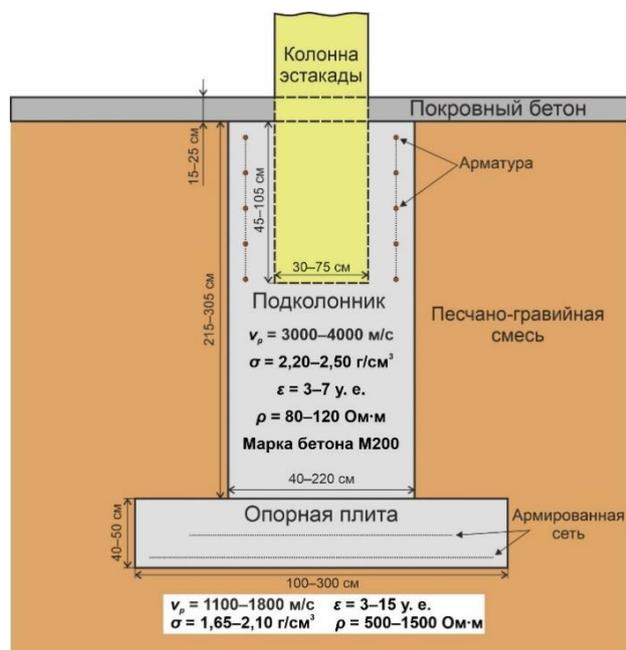
Изучение скрытых несущих фундаментов (опор) выполнялось на территории цеха химического завода, представляющего собой каркасную конструкцию с несколькими ярусами в виде ванны с бортами наподобие поребрика высотой от 10 до 30 см. Напольным покрытием объекта являлся покровный бетон толщиной 15–25 см. Монолитная опорная конструкция состояла из фундамента (опорная плита и подколонник) и надземной бетонной колонны, входящей на 45–105 см от подошвы покровного бетона в стакан подколонника, конструктивно связанного с опорной плитой.

Изготовление фундамента осуществлялось непосредственно на месте путем заливки бетона марки М200 в опалубку с армирующей сеткой. Затем котлован засыпался песчано-гравийной смесью, уплотнялся и заливался покровным бетоном марки М100. В результате измерений размеров вскрытых опор были выявлены расхождения между их проектными и реальными геометрическими характеристиками.

Участок работ расположен на возвышенности в междуречье, характеризуется сейсмичностью 9 баллов при глубине залегания грунтовых вод от 12,3 до 12,7 м. Грунтовые воды обладают сильной углекислой и выщелачивающей агрессивностью по отношению к бетону. Тем не менее грунты в основании опор, как и сами опоры, находятся в воздушно-сухом состоянии без серьезного воздействия грунтовых вод, опоры практически не подвержены коррозии. На глубине около 5 м отмечается резкое уменьшение процента мелких фракций в песчано-глинистых отложениях.



С учетом анализа проектной документации, результатов ранее выполненных работ и литературных данных<sup>1-3</sup> была сформирована обобщенная априорная петрофизическая модель объекта исследования [7, 8] с указанием физических свойств и геометрических характеристик (рис. 1).



**Рис. 1. Априорная петрофизическая модель опоры**

**Fig. 1. A priori petrophysical model of the support structure**

Модель включала в себя вертикальную колонну наземной эстакады, слой покровного бетона без армирования толщиной 15–25 см, вертикальный подколонник высотой от 215 до 305 см и сечением от 40×60 до 120×220 см; а также одну или две опорные плиты толщиной от 40 до 50 см и площадью от 100×100 до 240×300 см. Вся конструкция была засыпана песчано-гравийной смесью и находилась при естественной влажности выше уровня грунтовых вод.

По результатам первого и второго этапов, исходя из задач исследований, были определены основные элементы методики работ: расположение, конфигурация и плотность профилей для каждого метода в зависимости

от расположения наземного оборудования цеха относительно опор. В ходе работы были составлены схемы участков, произведена разбивка профилей и их привязка к обследуемым опорам. Профили ориентированы в широтном (вдоль эстакад) (Пр Ш-0,5) либо меридиональном (Пр М+1,0) направлениях с указанием удаления в метрах от оси опор. Закрепление профилей на местности осуществлялось индикацией точек геофизических наблюдений краской на бетонной поверхности. Расстояние между профилями и шаг пикетов по профилю составляли 0,5 м (рис. 2).

На основании априорной информации о петрофизических характеристиках объекта в соответствии с СП 11–105–97<sup>4</sup> были опробованы следующие геофизические методы: градиентометрия, частотное электромагнитное зондирование, электротомография, сейсмоакустика и георадиолокационное зондирование. Высокая плотность наземного технологического оборудования, а также наличие электрических кабель-каналов, водосточных коллекторов и других подземных коммуникаций являлись основными проблемами при проведении работ. Именно чрезвычайно высокий уровень электромагнитных промышленных помех, который характеризовался непредсказуемой изменчивостью по частоте, а также во времени и пространстве, не позволил провести площадные работы методами градиентометрии и частотного электромагнитного зондирования.

Георадиолокационные исследования осуществлялись в варианте профильного зондирования. Применялся георадар ОКО-2 с антенными блоками АБ1700 и АБ700 (цифрами обозначена частота электромагнитного импульса в мегагерцах). Профильные измерения проводились в движении. Точки регистрации по профилю фиксировались метками или колесным датчиком перемещения.

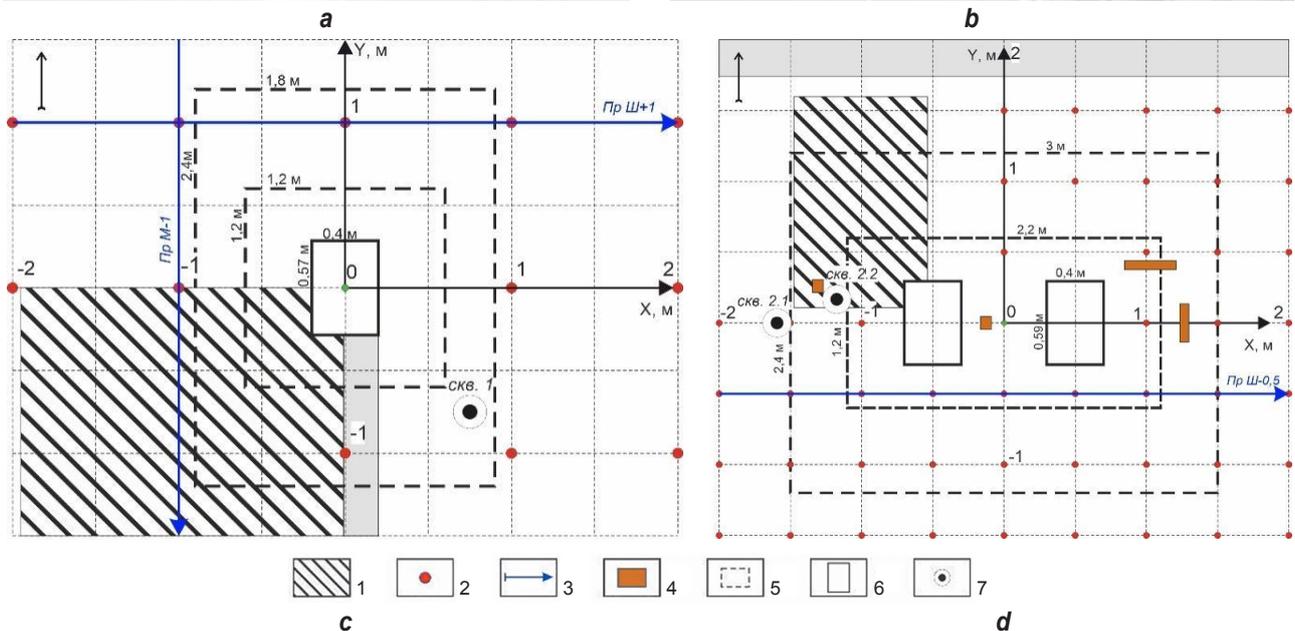
Глубинность исследований методом георадиолокационного зондирования зависит от частоты зондирующих импульсов, удельного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости пород разреза, а также

<sup>1</sup> ГОСТ 17624–2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. М.: Издательство стандартов, 2014. 16 с.

<sup>2</sup> Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных: учеб. пособие. М., Тверь: Изд-во АИС, 2005. 392 с.

<sup>3</sup> Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2017. 240 с.

<sup>4</sup> СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. М.: Изд-во ПНИИИС Госстроя России, 2004. 56 с.



**Рис. 2. Участки работ по опорам № 1 и 2:**

*а – фотография участка работ по опоре № 1; б – фотография участка работ по опоре № 2;  
с – схема участка работ по опоре № 1; д – схема участка работ по опоре № 2*

*1 – шурф; 2 – индикация на местности; 3 – профили геофизических измерений; 4 – выход металлических труб; 5 – фундамент опоры; 6 – колонна эстакады; 7 – устье скважины*

**Fig. 2. Worksites for supports no. 1 and no. 2:**

*a – image of the worksite for the support no.1; b – image of the worksite for the support no.2;  
c – diagram of the worksite for the support no. 1; d – diagram of the worksite for the support no. 2*

*1 – trial pit; 2 – indication on the ground; 3 – geophysical measurement profiles; 4 – metal pipe outlet;  
5 – support foundation; 6 – overpass column; 7 – wellhead*

параметров записи. Чем выше частота регистрируемых колебаний и диэлектрическая проницаемость и ниже удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород разреза, тем выше затухание электромагнитных волн и ниже глубинность.

Значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  устанавливалось при записи профиля по умолчанию. Исходя из априорной информации о составе зондируемой среды,  $\epsilon$  бетона изменяется от 3 до 7 у. е. при изменении влажности от 1 до 10 %. По данным, представлен-

ным М.Л. Владовым и М.С. Судаковой<sup>3</sup>, соотношения между глубинностью исследований и скоростными характеристиками разреза определяется следующими выражениями:

$$V = \frac{30}{\sqrt{\epsilon}}; \quad (1)$$

$$H = \frac{Vt_0}{2}, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость распространения электромагнитных импульсов, см/нс;  $H$  – эхо-глубина, м;  $t_0$  – двойное время пробега волны по лучу, нормальному к границе раздела.



Отсюда следует, что точность определения глубины залегания неоднородностей или масштаб глубинной шкалы определяются диэлектрической проницаемостью и точностью ее вычисления. При регистрации данных  $\epsilon$  принималась по умолчанию равной 3,7 у. е. На этапе обработки данный параметр уточнялся в программном комплексе GeoScan32 при помощи опции «Гипербола», которая автоматически изменяет масштабную линейку глубин. Реальные значения диэлектрической проницаемости для песчано-гравийной смеси колеблются в пределах 2,8–3,5, а бетона – до 5,3 у. е. при скорости от 15 до 18 см/нс.

Анализ результатов исследования методом георадиолокационного зондирования по опоре, вскрытой шурфом на всю высоту, позволил оптимизировать параметры длины записи и разверток. При длине записи 512 дискретов развертка записи для АБ700 составила 48 нс, а для АБ1700 – 24 нс. Подобные характеристики и параметры записи обеспечили глубинность исследований до 3,5 м при разрешающей способности в пределах 8–10 см.

Обработка и интерпретация материалов георадиолокации, которая осуществлялась в системах GeoScan32 и Prizma-2.5, включала в себя последовательность таких процедур, как<sup>5</sup>:

- 1) редактирование трасс;
- 2) корректировка положения трасс;
- 3) автоматическое выравнивание энергии сигнала (масштабирование);
- 4) регулировка усиления по различным скоростным законам;
- 5) определение сигнала прямого прохождения и его компенсация (вычитание среднего);
- 6) частотная, обратная и медиальная фильтрации;
- 7) выделение огибающей;
- 8) определение диэлектрической проницаемости и построение глубинного разреза.

В результате проведенной обработки строились временные и глубинные разрезы.

Исследование состояния фундаментов сооружений и подстилающих грунтов электроразведочными методами является распространенной практикой. Изучение разреза по УЭС в комплексе с другими геофизическими и инженерно-геологическими методами позволяет определить литологический состав и оценить состояние грунтов [9–12]. При ис-

следовании скрытых фундаментов, представленных железобетонными конструкциями, которые находятся в естественной влажности в песчано-гравийной высокоомной среде, по данным электроразведки можно предположить коррозионное состояние бетона и насыщенность влагой всей конструкции или какую-либо отдельную ее части [13–16].

Исследование методом электротомографии было выполнено электроразведочной станцией «Скала 64К15». Основные параметры генерируемого тока при выходном напряжении источника 200 В: продолжительность импульса тока – 200 мс, паузы – 20 мс. Измерения выполнены электроразведочной установкой Шлюмберже [17]. Заземление осуществлялось поверхностными губчатыми электродами, насыщенными соевым раствором, при этом сопротивление на электродах варьировалось в пределах 2–40 кОм.

При проектировании расстановки электроразведочной системы основной проблемой являлось ограниченное пространство в районе опор, что не позволяло добиться глубинности измерений более 3,5 м. Для опоры № 1 расстояние между электродами составило 0,4 м, общее количество электродов на один профиль – 32. Данная геометрия измерений обеспечила глубинность исследований до 3 м от поверхности. Для опоры № 2 расстояние между электродами составляло 0,3 м, общее количество электродов на один профиль – 64. При данной геометрии измерений глубинность исследования достигала 3,5 м от поверхности. По результатам выполненных измерений проводилась 2D-инверсия электроразведочных данных в программе ZondRes2D.

Одной из важнейших задач в строительстве является обеспечение требуемой несущей способности фундамента. Ведущими методами, нацеленными на определение геометрических параметров подземных конструкций и физико-механических свойств бетона и подстилающих опоры отложений, являются сейсмоакустические методы [18–20]. Методика и техника их проведения, а также применяемая аппаратура регламентировалась СП 11-105-97<sup>4</sup>.

Сейсморазведочные работы в модификации продольно-непродольного профилирования позволили на линии общей средней точки, проходящей через ось колоны в меридиональ-

<sup>5</sup> Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.



ном направлении (профиль Пр М0), достичь кратности накоплений, равной 40. Работы проводились 24-канальной станцией «Лакколит 24-М4» с коммутатором каналов на профилях длиной по 11,5 м при расстоянии между сейсмоприемниками и пунктами возбуждения 0,5 м. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось динамическим воздействием при 10–15 накоплениях. Обработка материалов проводилась в рамках обрабатывающей системы RadExPro. Анализ полученных результатов свидетельствует о чрезвычайно высоком уровне шумов (рис. 3, а), который характеризуется интенсивной изменчивостью не только во времени и частоте, но и в пространстве. Отношение сигнал/помеха на сейсмограммах не превышает 0,5. На временных разрезах (рис. 3, б) конструкция колонны в волновом поле не отражается совсем. При этом на временах  $\approx 6$  и 14 мс прослеживаются неустойчивые отражающие горизонты, обусловленные внутренними границами внутри рыхлых отложений.

Бурение скважин осуществлялось малогабаритной установкой «Опёнок» с высотой мачты, составляющей 3 м. Бурение было проведено комплексом со съёмным кернаприем-

ником диаметром HQ (*от англ.*: high quality – высокое качество) (96 мм) при скорости вращения бурового снаряда до 550 об/мин с нагрузкой на забой 500–1000 кгс. Основным достоинством комплекса является возможность одновременной с процессом отбора керна установки обсадной колонны. Для охлаждения породоразрушающего инструмента и выноса шлама со скважины использовался буровой раствор с химией ULTRA.

Ликвидация скважин осуществлялась путем закачки под давлением 15 атмосфер цементного раствора плотностью 1,75–1,80 г/см<sup>3</sup> в процессе поднятия бурового инструмента до полного заполнения скважин, формирования гидроизоляции и дополнительной «подушки» в зоне поглощения под опорными плитами.

В пределах опоры № 1 была пробурена наклонная скважина глубиной 4,3 м (рис. 4, а). Выбор точки заложения скважины осуществлялся исходя из проектной документации по опоре и корректировался по материалам исследования методом георадиолокационного зондирования (см. рис. 1, б). Скважина заложена в 75 см от центра опоры с углом наклона в продольной плоскости 85 градусов.

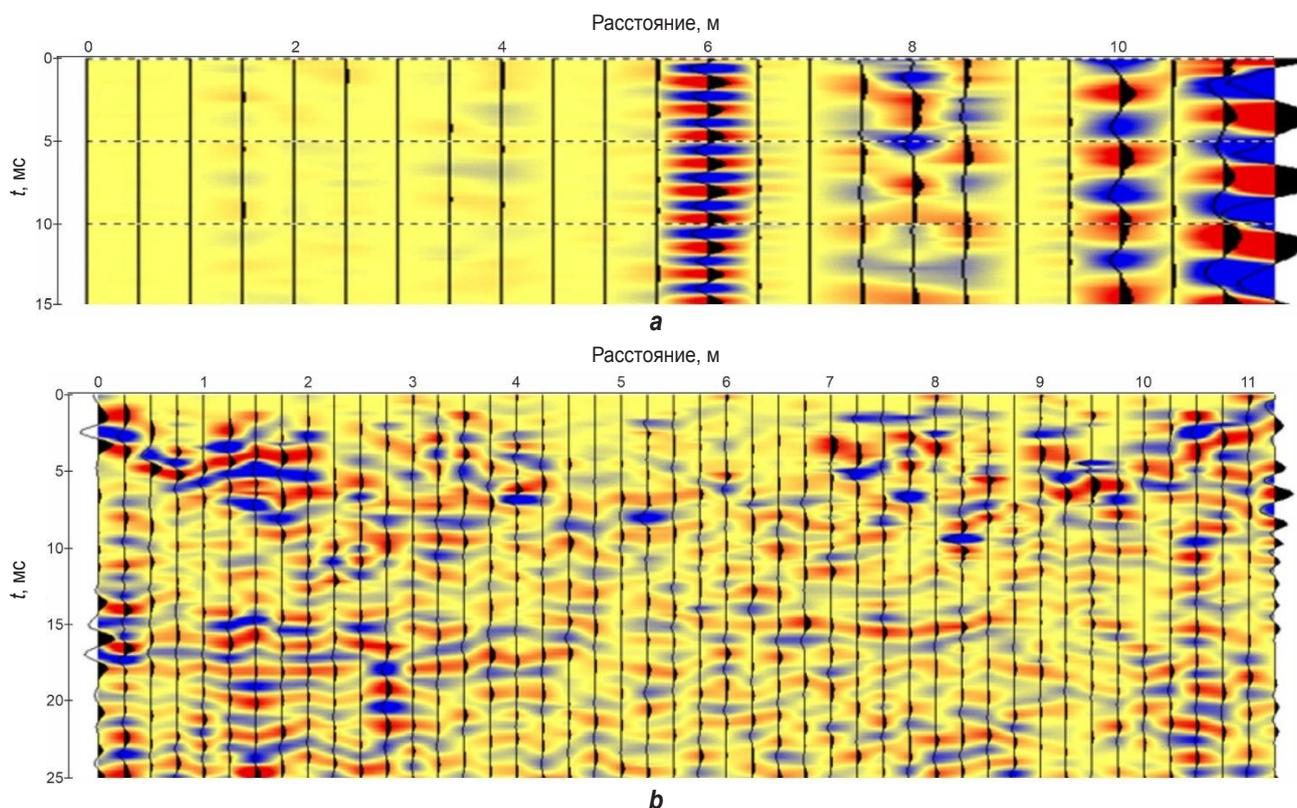


Рис. 3. Результаты сейсморазведочных работ, осуществленных по профилю Пр М0 (опора № 1):  
а – характер помех; б – временной разрез по линии общей средней точки

Fig. 3. Results of seismic surveys conducted on the profile Пр М0 (support structure no.1):  
а – nature of interference; б – time section along the line of the common midpoint



Наклонное бурение было обусловлено невозможностью размещения буровой установки под эстакадой. Отбор керна диаметром 63 мм производился вдоль всего ствола скважины. В интервале песчано-гравийной смеси выход керна в виде чистого галечника диаметром от 0,5 до 4 см составил 50–65 %. На глубине 1,2 м буровой снаряд под углом 5 градусов вошел в тело подколоники, предварительно вскрыв деревянную опалубку. В интервале глубин 1,2–3,4 м (интервал бетонной опоры) выход керна составил 100 %. Об этом свидетельствует отсутствие затираний между образцами керна. Подобное осложнение связано с отклонением снаряда по направлению вращения, что в дальнейшем обусловило бурение только вертикальных скважин.

В пределах опоры № 2 пробурены две скважины глубиной 4,3 и 3,4 м (рис. 4, б). Бурение скважины 2.1 осуществлялось в непосредственной близости от опоры с целью извлечения качественных проб песчано-гравийной смеси. В интервале от подошвы покровного бетона до забоя бурение проводилось укороченными рейсами с минимальной подачей промывочной жидкости, что обеспечило 80 % выхода керна и оценку несущей способности грунта под опорной плитой. Скважина 2.2, пробуренная вдоль подколоники, обеспечила отбор керна из опорной плиты, подготовку проб для изучения

физико-механических свойств бетона и определения точной глубины заложения опоры.

Для оперативного изучения состояния и размеров опор был использован акустический метод (SIT, *от англ.*: Sonic Integrity Testing). Это метод инженерной сейсмоакустики, в основу которого положено изучение распространения упругих колебаний в толще бетонной конструкции, возбуждаемых ударным способом на ее поверхности. Работы выполнялись измерителем длины свай ИДС-1, который предназначен для определения скоростных и геометрических характеристик бетонных конструкций. Наблюдая отражения от границ конструкция/грунт до внутренних дефектов или неоднородностей, можно сделать заключение об их размерах, сплошности и однородности.

Измерения проводились в трех-пяти точках по периметру подколоники при 5–7 накоплениях. Длина опор вычислялась исходя из измеренной скорости распространения продольной волны на вскрытых шурфах поверхностях фундамента в материале опор и измеренного прибором времени прихода отраженной волны от границы опора/грунт. В дальнейшем значения скоростей в бетоне опор корректировались по данным бурения. Так, скорость на базе 1 м на вскрытой части фундамента опоры № 1 составила 3240–3333 м/с, а после корректировки по данным бурения – 3118 м/с.

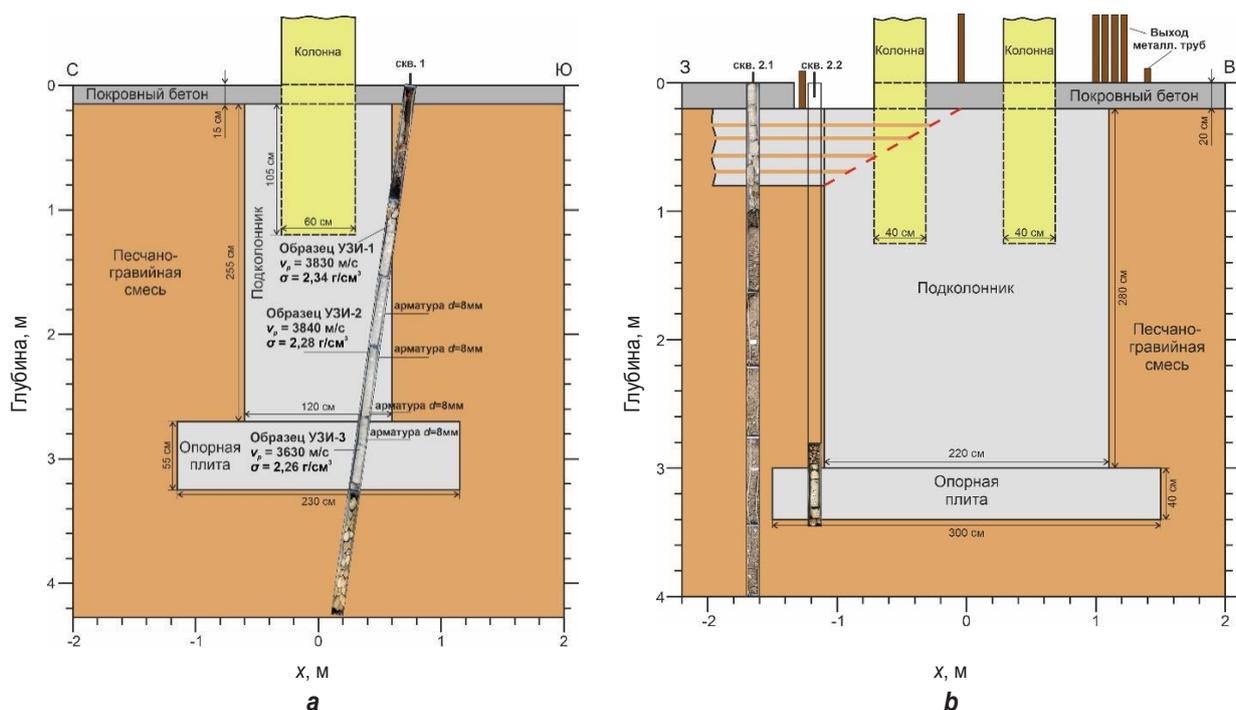


Рис. 4. Интерпретационные физико-геологические модели опоры № 1 (а) и опоры № 2 (б)  
Fig. 4. Interpretation physical-geological models of the support no. 1 (a) and support no. 2 (b)



Из керна бетона были выпилены цилиндры высотой 39–65 мм, по которым определялись скоростные и плотностные характеристики бетона. Измерения производились в соответствии с ГОСТ 17624–2012<sup>1</sup> с помощью ультразвукового сейсмоскопа УК-10ПМС методом прозвучивания. Плотность бетона определялась методом гидростатического взвешивания. Прямые определения предела прочности на сжатие осуществлялись согласно ГОСТ 28570–90<sup>6</sup> в сертифицированной лаборатории с использованием испытательного пресса ТП-1-1500.

### Результаты исследования и их обсуждение

Участок в районе опоры № 1 характеризовался беспрецедентной изменчивостью поверхностных условий, что существенно затрудняло обработку и интерпретацию данных. На площади работ, составляющую 3×3 м, были выявлены как минимум 4–5 участков с различным составом и свойствами поверхностей (бетон различной толщины, межплитные швы, перепады альтитуд, засыпанный строительным мусором шурф, насыпь песчано-гравийной смеси, бордюры), а также наличие промышленного оборудования, которое затрудняет прямолинейную прокладку профилей требуемой длины. Кроме того, по люкам и сливной решетке определялись 2 коллектора, существенно влияющие на результаты всех геофизических методов.

Одним из основных факторов, влияющих на качество радарограмм, является стабильность линии наблюдения. Так, изменение угла наклона антенны на 1–3 градуса при глубине залегания изучаемой границы (3 м) ведет к скачкообразному смещению точки отражения на 5,1–15,6 см в горизонтальной плоскости. Естественно, в этом случае отражающая точка трансформируется в площадку с непредсказуемыми параметрами. Это иллюстрируется результатами исследования методом георадиолокационного зондирования по Пр М-1.0 (рис. 5, а). Северная часть профиля располагается на ровной бетонной площадке, центр опоры расположен на пикете 0. На радарограмме по срыву корреляции горизонтальных осей синфазности на пикетах -0,45 и +0,5 однозначно выделяются кромки подколонника, размер

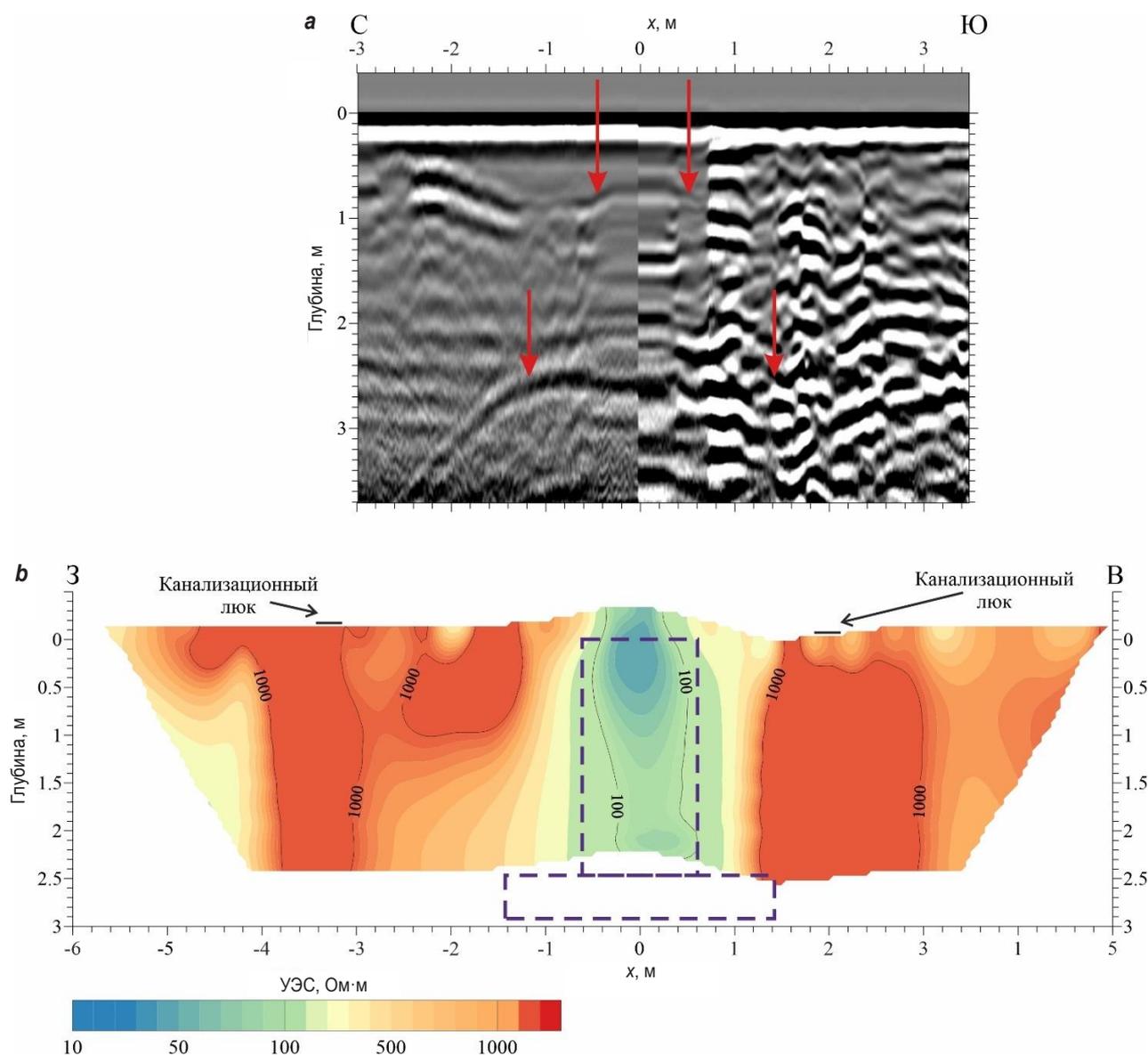
которого составляет 0,95 м. Подколонник практически соответствует проектному. На глубине 2,4 м на пикете -1,2 м фиксируется гиперболическая ось синфазности, которая обусловлена точкой дифракции, отождествляемой с верхней кромкой опорной плиты. Если считать опорную плиту симметричной, ее размеры (2,4 м) соответствуют проектным. Контуры элементов опоры обозначены красными стрелками. Южная часть профиля совершенно не интерпретируема. Наличие шурфа, засыпанного строительным мусором, и насыпь песчано-гравийной смеси ведут к резким изменениям рельефа профиля и, как следствие, к усложнению волновой картины.

Данные электроразведки методом электротомографии позволяют локализовать верхнюю часть скрытой железобетонной конструкции и проследить за тем, как распространяется электрическое поле по параметру УЭС. Тем не менее определить границы с точностью до 10 см не представляется возможным. По результатам инверсии данных электротомографии по Пр Ш+1 (рис. 5, б) подколонник выделяется аномалией пониженных значений УЭС в пределах 60–120 Ом·м. Подколонник однороден, в верхней части наблюдается область его сочленения с опорой. Пониженное сопротивление обусловлено наличием электронно-проводящей арматуры внутри подколонника. Из-за ограничения в размере электроразведочной установки глубинность не превысила 2,5 м. Области со значениями свыше 1000 Ом·м приурочены в основном к системе ливневой канализации. Значения УЭС в пределах 200–1000 Ом·м относятся к песчано-гравийной смеси.

На участке опоры 2 рельеф местности однороден, перепадов высот нет. В отличие от опоры 1, присутствует высокая плотность промышленного оборудования и разного рода трубопроводов, которые препятствуют проведению измерений. К подземным коммуникациям относится кабель-канал, простирающийся вдоль эстакады в широтном направлении на расстоянии 0,7 м от колонны эстакады.

По данным георадиолокации, на профиле Ш-0,5 (см. рис. 5, а) отчетливо проявляются границы подколонника на пикетах -1,2 м и в диапазоне +1,2...+1,35 м. Смещение правой стороны подколонника на радарограмме связано с наличием металлической трубы, кото-

<sup>6</sup> ГОСТ 28570-90. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций. М.: Издательство стандартов, 1990. 14 с.



**Рис. 5. Результаты исследования опоры № 1 методом георадиолокационного зондирования (a) и методом электротомографии (b)**

**Fig. 5. Study results of the support no. 1 by the method of ground penetrating radar sounding (a) and the method of electrical resistivity tomography (b)**

рая имеет интенсивную параболическую аномалию. Таким же образом прослеживается металлическая труба на пикете -0,1 м. В левой части георадиолокационной картины в районе пикетов от -3,5 до -1,2 наблюдаются оси синфазности до глубины 0,8 м. Они относятся к переслаиванию бетона и песчано-гравийной смеси, которые в дальнейшем были подтверждены бурением скважины 2.1 (см. рис. 4, b). Далее на глубине 1,2 м прослеживается отраженная граница (коричневая линия), за которой следует однородная картина. Вероятнее всего, это относится к кабель-каналу.

По результатам инверсии данных электротомографии профиля Ш-0,5 построен разрез

УЭС (рис. 6, b). При данной конфигурации электроразведочного профиля длиной 18,9 м удалось провести измерения вдоль трех колонн эстакады, каждая из которых выделяется затянутыми низкоомными аномалиями. На пикете -6,5 м границы подколоники определяются резким скачкообразным изменением сопротивления в продольном направлении. Ситуация на других двух опорах отличается, что связано с наличием возле колонн проводящего объекта в виде металлической трубы, которая отражается интенсивной низкоомной аномалией. На центральной опоре в районе от 0 до -1 м прослеживается повышение значений УЭС, что может говорить о нарушении железобетонной



конструкции. По левую сторону от центральной опоры (опора 2) находится высокоомная аномалия (более 1000 Ом·м), которая простирается на глубину до 1 м и соответствует переслаиванию бетона с песчано-гравийной смесью. Дифференцировать каждый слой бетона по мощности не является возможным в связи с недостаточной разрешающей способностью. В данном случае глубина исследования ограничена наличием электрического кабель-канала, который является так называемым экраном для электромагнитного поля и составляет 1,2–1,3 м от поверхности. Для детальной оценки изменчивости характеристик опор результаты измерений сейсмоакустических и прочностных свойств были сведены в таблице.

Анализ приведенных в таблице данных свидетельствует о значительной разнице сейсмоакустических и прочностных свойств бетона в опорах. Несмотря на это статистический анализ позволил получить следующие корреляционные уравнения между прочностью бетона  $R$ , МПа, скоростью  $V$ , м/с, и акустической жесткостью  $\gamma = V\sigma$ , кг/м<sup>2</sup>с:

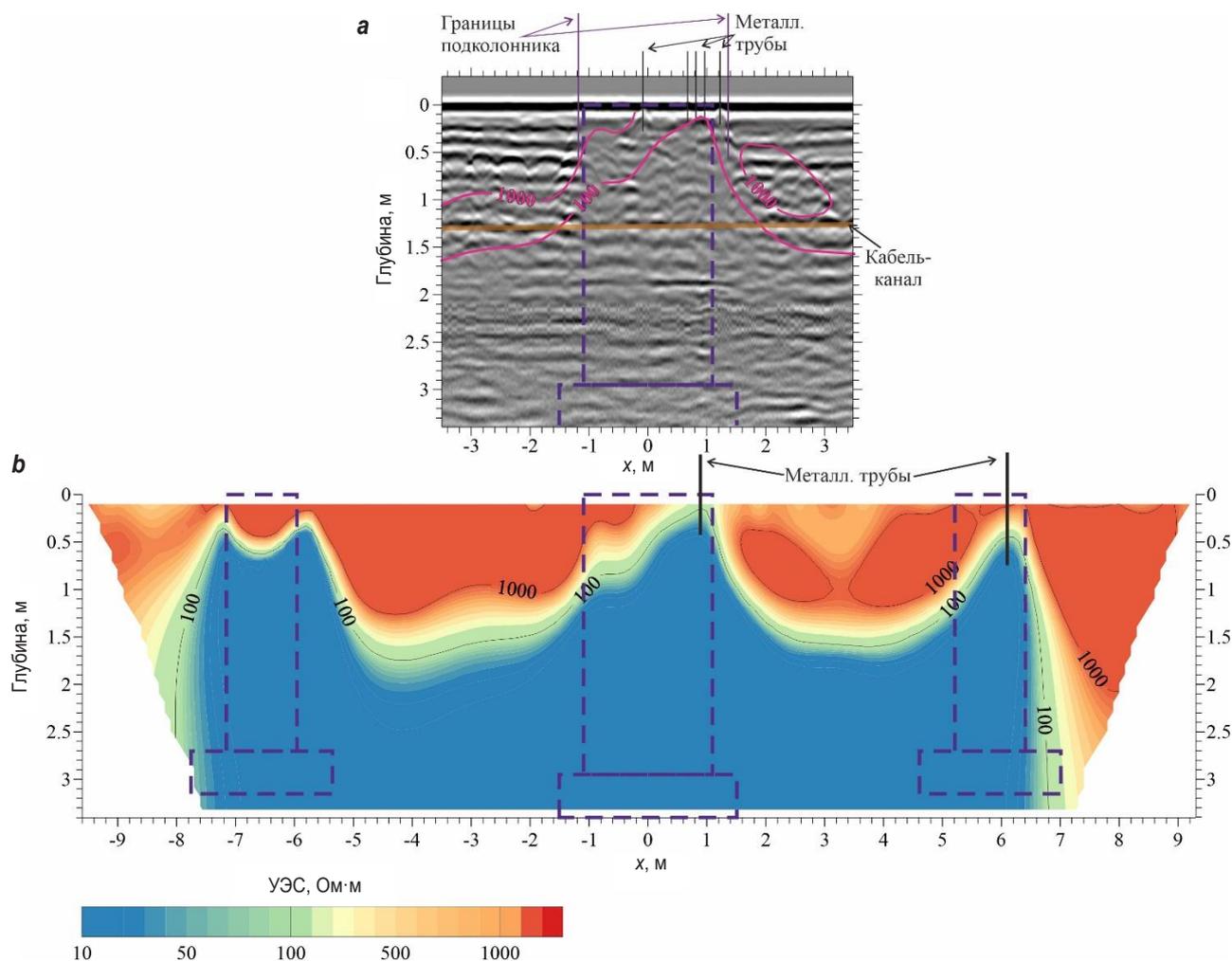
$$R = 0,02V - 50,56; \quad (3)$$

$$R = 7,42\gamma - 38,89. \quad (4)$$

Данные уравнения с погрешностью 5–8 % соответствуют уравнению (для бетона В 7-35)<sup>6</sup>:

$$R = 0,016V - 21,3. \quad (5)$$

Дополнительно по методике, разработанной в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете<sup>7</sup>, которая



**Рис. 6. Результаты исследования опоры № 2 методом георадиолокационного зондирования (a) и методом электротомографии (b)**

**Fig. 6. Study results of the support no. 2 by the method of ground penetrating radar sounding (a) and the method of electrical resistivity tomography (b)**

<sup>7</sup> Бегинян Э.А., Ушаков С.А., Понявина Н.А., Емельянов Д.И. Техническая эксплуатация, содержание и обследование объектов недвижимости: учеб. пособие. Воронеж: Изд-во ГАСУ, 2013. 108 с.



## Результаты петрофизических измерений Petrophysical measurement results

Маркировка образца	Приведенная прочность, МПа	Скорость, м/с	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Акустический импеданс, 10 <sup>6</sup> кг/м <sup>2</sup> с	Скорость по измерителю длины свай, м/с
Скважина 1					
УЗИ-1	26,4	3834	2,34	8,97	–
Образец 1/1	26,4	–	–	–	
Образец 2/1	21,4	–	–	–	
Образец 3/1	29	–	–	–	
УЗИ-2	30,2	3843	2,28	8,76	
Образец 4/1	31,4	–	–	–	
Образец 5/1	18	–	–	–	
УЗИ-3	20,1	3634	2,26	8,21	
Образец 6/1	22,2	–	–	–	
Среднее	27,2	3770	2,29	8,65	
Скважина 2.2					
Образец 2/2	38,6	4609	2,29	10,55	–
Образец 3/2	48,4	4661	2,46	11,47	
Образец 4/2	57	4612	2,23	10,28	
Образец 5/2	30,5	4382	2,32	10,17	
Среднее	43,6	4585	2,34	10,64	

применима в случае сквозного прозвучивания, определена прочность бетона  $R$  в кг/см<sup>2</sup>:

$$R = K \cdot V_{\text{СКВ}}^{3,75}, \quad (6)$$

где  $V_{\text{СКВ}}$  – скорость прохождения ультразвука при сквозном прозвучивании;  $K$  – ориентировочный градуировочный коэффициент. Тяжелый бетон неизвестной технологии изготовления и выдерживания с влажной поверхностью имеет значение  $K = 1,64^7$ . В соответствии с расчетами при скорости продольных волн 3,77 (опора № 1) и 4,58 км/с (опора № 2), прочность бетона составляет 23,8 и 49,1 МПа (показатель соответствуют бетонам марки М200 и М400), что на 10–12 % отличается от прямых определений прочности на сжатие, но все равно соответствует классу бетона В20–В30.

Следует отметить, что результаты, полученные с помощью применения различных расчетных методов, достаточно близки. Тем не менее их нельзя считать представительными, поскольку для статистически значимых заключений и расчета многофакторных корреляционных уравнений необходимо проведение парных определений петрофизических характеристик не менее чем на 9 объектах<sup>7</sup>.

Систематизация результатов исследований позволила сформировать интерпретационные модели двух опор (см. рис. 4), оценить эффективность применения геофизических методов и обосновать методику комплексных геофизических исследований.

По результатам исследования, проведенного с помощью метода георадиолокационного зондирования, определены геометрические размеры подколонников и опорной плиты (в благоприятных условиях). С помощью измерителя длины свай ИДС-1 определены скоростные характеристики бетонных конструкций, глубина их заложения, а также оценена их сплошность и однородность. Так, на опоре № 2 по аномально низким значениям скоростных характеристик выявлена неоднородность, впоследствии подтвержденная бурением и проведенной электротомографией. Данная неоднородность обусловлена изменением конструкции верхней части колонноприемника путем дополнительной заливки набетонки в виде переслаивания бетона и песчано-гравийной смеси.

### Заключение

Анализ полученных в ходе проведенного исследования результатов применения геофизических методов при изучении скрытых фундаментов многоярусных конструкций позволил сделать вывод о том, что получаемая детальная информация о структуре и свойствах фундаментов обеспечивает оценку состояния и прогноз устойчивости опор без нарушения их целостности. Частотное электромагнитное зондирование, поверхностная сейсморазведка и градиентометрия в условиях интенсивных



промышленных помех не обеспечивают требуемой точности определения геометрических размеров и прочностных свойств опорных конструкций. Основными методами в комплексе работ по изучению опорных конструкций следует считать бурение, георадиолокационное зондирование, а также сейсмоакустические измерения скоростных и геометрических характеристик бетонных конструкций.

По данным, полученным при использовании метода электротомографии, исследуемая конструкция фундамента выделена под покровным бетоном вертикально затянутыми низкоомными аномалиями. Однако определить границы опоры с точностью до 10 см с помощью данной методики невозможно. Метод электротомографии целесообразно использовать для оценки однородности колонны, коррозионной агрессивности и влагонасыщенности среды.

Анализ радарограмм свидетельствует о возможности определять при помощи метода георадиолокационного зондирования геометрические размеры подколонников. При точной привязке профилей положение подколонника определяется практически однозначно с погрешностью в первые сантиметры, что позволяет корректно задать местоположение скважин. В благоприятных условиях (однородные поверхности, отсутствие перепадов высот на профилях, удаленных на 0,5–2 м от опор) фиксируются гиперболические оси синфазности, обусловленные угловыми точками опорных плит. Георадиолокационные зондирования целесообразно проводить в движении по выровненным поверхностям с двумя антеннами, а именно: высокочастотной (1,2–1,7 ГГц) при развертке от 24 до 48 нс (для изучения характеристик покровного бетона и расположения арматуры) и среднечастотной (700–900 МГц) при развертке от 48 до 72 нс

(для изучения разреза на глубину от первых десятков сантиметров до 5 м). Достаточным является проведение наблюдений по 4–6 ортогональным профилям длиной по 3–5 м в широтном и меридиональном направлениях на расстоянии 0,5–1,5 м от центра опоры с обязательным учетом рельефа профилей. Для увеличения точности определения геометрических характеристик подземных конструкций возможна детализация путем проведения точечных зондирований в режиме старт/стоп.

Алмазное бурение диаметром HQ (96 мм) со съемным керноприемником обеспечивает практически стопроцентный выход керна с минимальной деформацией бетонной основы со щадящим выбуриванием металлической арматуры и любого заполнителя. Весь гравий, даже самых мелких фракций, в случае использования подобной технологии как в бетоне, так и в песчано-гравийной смеси, не вымывается и не отделяется от керна, что обеспечивает отбор проб для любых петрофизических и гранулометрических анализов без ограничений. Данные петрофизических измерений свидетельствуют о наличии устойчивых корреляционных связей, что позволяет определять физико-механические свойства бетона по наземным сейсмическим наблюдениям.

Поверхностные 2D сейсмические наблюдения из-за интенсивных помех не позволили получить данные о геометрических и скоростных характеристиках бетонных конструкций. Только работы с измерителем длины свай обеспечивают определение глубины заложения опор и оценку их состояния. При условии реализации трехкомпонентных сейсмических наблюдений скважина/поверхность возможно изучение геометрических размеров и динамических (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, плотность) характеристик бетона в естественном залегании.

#### Список источников

1. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Степанов Ю.И., Прийма Г.Ю., Чугаев А.В. Комплексирование инженерно-геофизических методов при исследованиях фундаментов // Разведка и охрана недр. 2006. № 12. С. 32–36. EDN: KUYFRD.
2. Soupios P.M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andreadakis A., Vallianatos F., et al. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation // Journal of Geophysics and Engineering. 2007. Vol. 4. Iss. 1. P. 94–103. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/1/011>.
3. Gutiérrez-Martín A., Yenes J.I., Fernández-Hernández M., Castedo R. Stabilization methodology in foundation soils by ERT-3D application in Estepona, South Spain // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 10. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/app11104455>.
4. Аузин А.А., Каратаев Д.Д. Обследование зданий и сооружений геофизическими методами // Георадар 2023: сборник тезисов науч.-практ. конф. (г. Москва, 22–24 марта 2023 г.). М.: Издательский дом «Академия естествознания», 2023. С. 90–94. EDN: CGUJMJ.



5. Колесников В.П., Пригара А.М., Татаркин А.В. Комплексные геофизические исследования состояния грунтов основания и фундаментов инженерных сооружений // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2011. № 11. С. 89–91. EDN: OIGDZD.
6. Гуляев А.Н., Осипова А.Ю., Щапов В.А. Неоднородность грунтов в основании фундаментов как основная причина поврежденных зданий в Екатеринбурге // Архитектон: известия вузов. 2011. № 4. С. 187–193. EDN: ONAFLV.
7. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 126 с.
8. Нерадовский Л.Г. Оценка теплового состояния криолитозоны России методами электромагнитного зондирования: монография. М.: Издательский дом «Научное обозрение», 2014. 333 с. EDN: VZUFFN.
9. Зайцева Н.М., Исабекова Б.Б., Клецель М.Я. Определение параметров грунта для расчета его удельного электрического сопротивления // Электротехника. 2015. № 5. С. 41–47. EDN: TODIKP.
10. Ширя М.С., Ланкин Ю.К., Терешкин С.А., Лазурченко А.В., Давыденко Ю.А. Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 160–170. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3766>. EDN: EKMNKE.
11. Olomo K.O. Pre-foundation studies using vertical electrical sounding and soil sample analysis // Journal CleanWAS. 2023. Vol. 7. Iss. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.26480/jcleanwas.01.2023.01.07>.
12. Лаломов Д.А., Глазунов В.В. Оценка коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов на основе совместной интерпретации данных методов сопротивления и георадиолокации // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 3–12. <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.3>. EDN: YQCXLP.
13. Olayanju G.M., Mogaji K.A., Lim H.S., Ojo T.S. Foundation integrity assessment using integrated geophysical and geotechnical techniques: case study in crystalline basement complex, southwestern Nigeria // Journal of Geophysics and Engineering. 2017. Vol. 14. Iss. 3. P. 675–690. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa64f7>.
14. Gryaznova E.M. Geophysical methods in survey and geotechnical monitoring of foundations and underlying soils // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021 (Novosibirsk, 11–14 May 2021). Cham: Springer Nature, 2021. Vol. 2. P. 1443–1449. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5>.
15. Пичугина А. Н., Ковин О.Н. Оценка возможностей метода электротомографии для локализации подземных бетонных трубопроводов на основе физического и математического моделирования // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: сборник научных трудов IX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 18–19 ноября 2021 г.). Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2021. Т. 4. С. 140–146. EDN: UUOVKD.
16. Коринько И.В., Пилиграмм С.С., Эпоян С.М., Смирнова Г.Н., Хадимаг А.А. Комплексная диагностика состояния сетей водоснабжения и водоотведения // Водоочистка. 2016. № 4. С. 29–33. EDN: WARBER.
17. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 43–47. EDN: IIRRUJ.
18. Дмитриев А.Г., Мироманов И.А., Тирский О.Н. Использование геофизических методов при обследовании толстых бетонных покрытий // Российский геофизический журнал. 2006. № 43-44. С. 143–146. EDN: ZSZKGP.
19. Бондарев В.И. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов // Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1997. 220 с.
20. Гиноман А.Г., Голосов В.П., Гранит Б.А. Опыт изучения малоглубинных объектов сейсморазведкой // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 77–85. EDN: QGRYSO.

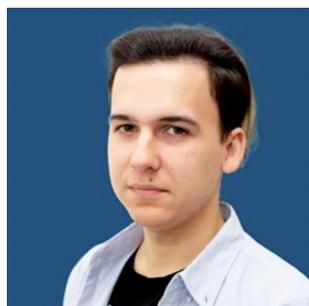
### References

1. Sanfirov I.A., Yaroslavtsev A.G., Stepanov Yu.I., Priima G.Yu., Chugaev A.V. Integration of engineering and geophysical methods in foundation study. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. (In Russ.). EDN: KUYFRD.
2. Soupios P.M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andreadakis A., Vallianatos F., et al. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2007;4(1):94-103. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/1/011>.
3. Gutiérrez-Martín A., Yenes J.I., Fernández-Hernández M., Castedo R. Stabilization methodology in foundation soils by ERT-3D application in Estepona, South Spain. *Applied Sciences*. 2021;11(10)1-19. <https://doi.org/10.3390/app11104455>.
4. Auzin A.A., Karataev D.D. Inspection of buildings and structures by geophysical methods. In: *Georadar 2023: sbornik tezisev nauch.-prakt. konf. = Georadar 2023: collected abstracts of the scientific and practical conference*. 22–24 March 2023, Moscow. Moscow: Izdatel'skii dom "Akademiya estestvoznaniya"; 2023, p. 90-94. (In Russ.). EDN: CGUUJM.
5. Kolesnikov V.P., Prigara A.M., Tatarikin A.V. Comprehensive geophysical studies of the state of foundation soils and engineering structure foundations. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*. 2011;11:89-91. (In Russ.). EDN: OIGDZD.
6. Gulyaev A.A., Osipova A.Yu., Shchapov V.A. Inhomogeneity of soils in the foundation base as the main cause of building damage in Yekaterinburg. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2011;4:189-193. (In Russ.). EDN: ONAFLV.
7. Finkel'shtein M.I., Kutev V.A., Zolotarev V.P. *Application of subsurface radar sounding in engineering geology*. Moscow: Nedra; 1986, 126 p. (In Russ.).
8. Nerafovskii L.G. *Assessing thermal state of Russian cryolithozone using electromagnetic sounding methods*. Moscow: Izdatel'skii dom "Nauchnoe obozrenie"; 2014, 333 p. (In Russ.). EDN: VZUFFN.



9. Zaitseva N.M., Isabekova B.B., Kletsel' M.Y. Determination of soil parameters to calculate its electrical resistivity. *Elektrotehnika*. 2015;5:41-47. (In Russ.). EDN: TODIKP.
10. Shkiryа M.S., Lankin Yu.K., Tereshkin S.A., Lazurchenko A.V., Davydenko Yu.A. Applying ground geophysical prospecting using the method of electrical resistivity tomography as part of engineering and geological surveys of a flooded area in one of the residential areas of Irkutsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(11):160-170. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3766>. EDN: EKMNKE.
11. Olomo K.O. Pre-foundation studies using vertical electrical sounding and soil sample analysis. *Journal CleanWAS*. 2023;7(1):1-7. <https://doi.org/10.26480/jcleanwas.01.2023.01.07>.
12. Lalomov D.A., Glazounov V.V. Collaborative interpretation of the data obtained by resistivity and ground penetrating radar methods for assessing sandy clay soil permeability. *Journal of Mining Institute*. 2018;229:3-2. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.3>. EDN: YQCXLP.
13. Olayanju G.M., Mogaji K.A., Lim H.S., Ojo T.S. Foundation integrity assessment using integrated geophysical and geotechnical techniques: case study in crystalline basement complex, southwestern Nigeria. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2017;14(3):675-690. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa64f7>.
14. Gryaznova E.M. Geophysical methods in survey and geotechnical monitoring of foundations and underlying soils. In: *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021*. 11–14 May 2021, Novosibirsk. Cham: Springer Nature; 2021, vol. 2, p. 1443-1449. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5>.
15. Pichugina A.N., Kovin O.N. Evaluation of electrical resistivity tomography feasibility to locate underground concrete pipelines based on physical and mathematical modeling. In: *Teoriya i praktika razvedochnoi i promyslovoi geofiziki: sbornik nauchnykh trudov IX mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Theory and practice of exploration and production geophysics: collected scientific papers of the 9<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference*. 18–19 November 2021, Perm. Perm: Perm State University; 2021, vol. 4, p. 140-146. (In Russ.). EDN: UUOBKD.
16. Korinko I.V., Piligrimm S.S., Epoyan S.M., Smirnova G.N., Khadimag A.A. Complex diagnostics of a condition of networks of water supply and water disposal. *Vodoochistka*. 2016;4:29-33. (In Russ.). EDN: WARBEP.
17. Bobachev A.A., Modin I.N. Electrical tomography using standard geoelectric units. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2008;1:43-47. (In Russ.). EDN: IIRRUJ.
18. Dmitriev A.G., Miromanov I.A., Tirkii O.N. Using geophysical methods in surveying thick concrete coatings. *Rossiiskii geofizicheskii zhurnal*. 2006;43-44:143-146. (In Russ.). EDN: ZSZKGP.
19. Bondarev V.I. *Seismic method for determining physical and mechanical properties of non-rocky soils*. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 1997, 220 p. (In Russ.).
20. Ginodman A.G., Golosov V.P.E., Granit B.A. Using seismic surveys to study construction facilities having shallow foundations. *Vestnik MGSU*. 2013;6:77-85. (In Russ.). EDN: QGRYSD.

#### Информация об авторах / Information about the authors



**Лазурченко Антон Витальевич,**

аспирант,  
младший научный сотрудник департамента геофизики,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [alazurchenko@geo.istu.edu](mailto:alazurchenko@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>

**Anton V. Lazurchenko,**

Postgraduate Student,  
Junior Researcher of the Geophysics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
✉ [alazurchenko@geo.istu.edu](mailto:alazurchenko@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>



**Дмитриев Александр Георгиевич,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
профессор-консультант департамента геофизики,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
a.g.dmitriev@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-9178-1169>

**Alexander G. Dmitriev,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,  
Consulting Professor of the Geophysics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
a.g.dmitriev@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-9178-1169>

**Мироманов Андрей Викторович,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,  
научный сотрудник департамента инженерной геологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
mav@istu.edu

<https://orcid.org/0009-0005-0678-3733>

**Andrey V. Miromanov,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,  
Researcher of the Department of Engineering Geology,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,  
mav@istu.edu

<https://orcid.org/0009-0005-0678-3733>

**Губанов Алексей Борисович,**

ведущий инженер департамента геофизики,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
gubanovab@ex.isu.edu

<https://orcid.org/0009-0000-8035-9344>

**Aleksey B. Gubanov,**

Leading Engineer of the Geophysics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,  
Irkutsk, Russia,  
gubanovab@ex.isu.edu

<https://orcid.org/0009-0000-8035-9344>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

А.В. Лазурченко – проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

А.Г. Дмитриев – разработка концепции, курирование данных, валидация результатов, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

А.В. Мироманов – проведение исследования, формальный анализ.

А.Б. Губанов – проведение исследования, визуализация, формальный анализ.

Anton V. Lazurchenko – investigation, visualization, writing – original draft, writing – editing.

Alexander G. Dmitriev – conceptualization, data curation, validation, writing – original draft, writing – editing.

Andrey V. Miromanov – investigation, formal analysis.

Aleksey B. Gubanov – investigation, visualization, formal analysis.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 03.02.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принята к публикации 24.02.2025.

The article was submitted 03.02.2025; approved after reviewing 10.02.2025; accepted for publication 24.02.2025.