

УДК 004.942
МРНТИ 28.17.23

DOI: <https://doi.org/10.37788/2023-4/113-121>

А.А. Быков

Учреждение Esil University, Казахстан
(e-mail: bykov_a_a@list.ru)

Компьютерное моделирование электропроводности геологической среды в задачах контроля надежности основания дорог, зданий и инженерных сооружений

Аннотация

Основная проблема: Контроль надежности основания дорог, зданий и инженерных сооружений является важным аспектом геофизических исследований. Актуальным является моделирование геологических неоднородностей. При этом применение компьютерного моделирования в этой задаче сопряжено с вычислительными затратами.

Цель: Анализ метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) для моделирования физических свойств грунта и их изменений при воздействии упругими колебаниями.

Методы: Для достижения цели был применен метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), использующий одномерную модель геологической среды. Решение прямой задачи ВЭЗ осуществлялось с помощью расчета интеграла Ханкеля.

Результаты и их значимость: Исследование позволило провести моделирование большого количества слоев грунта с помощью метода ВЭЗ. Полученные результаты позволяют определить параметры обнаруженных объектов и изменения характеристик контролируемой среды при воздействии упругими колебаниями. Значимость результатов заключается в возможности улучшения метода моделирования физических свойств грунта и учета их изменений при воздействии упругими колебаниями, что способствует повышению эффективности и точности контроля надежности основания.

Ключевые слова: моделирование, геофизический мониторинг, электроразведка, упругие колебания, грунт.

Введение

Контроль надежности основания дорог, зданий и инженерных сооружений является важным аспектом геофизических исследований. В контексте решения этой проблемы, роль компьютерного моделирования является фундаментальной, однако необходимо учитывать не только вычислительные затраты, но и потенциальные риски, связанные с недостаточной точностью моделирования.

Электроразведочные методы предоставляют возможность выявления и детального анализа объектов, порождающих аномалии, что позволяет формулировать гипотезы относительно их геометрии, географического расположения и глубины залегания. Однако, недостаточная точность моделирования может привести к серьезным последствиям. Например, неверное представление физико-геологических процессов может существенно осложнить способность предсказания и управления изменениями в геологической среде, что в конечном итоге может угрожать надежности и устойчивости инженерных сооружений [2].

Прямая задача разведочной геофизики заключается в анализе специфических параметров электрического поля в неоднородной среде, основываясь на предварительно установленной структуре и характеристиках физико-геологической модели. Для эффективного решения этой задачи в процессе планирования геофизических исследований применяются методы компьютерного моделирования. Анализ данных о физических свойствах исследуемой среды позволяет определить параметры обнаруженных объектов, таких как электрическое сопротивление породы, поляризация, диэлектрическая и магнитная проницаемость, которые меняются в зависимости от характеристик исследуемой среды. Кроме того, физическое воздействие на среду приводит к изменениям характеристик контролируемой среды, проявляющимся в виде сейсмoeлектрического эффекта первого рода. Следовательно, моделирование электрофизических свойств грунта и их изменений при воздействии упругими колебаниями является актуальным.

Существует множество методов электроразведки и их модификаций, которые отличаются родом используемого электрического тока и техникой проведения полевых работ. При выборе конкретного метода следует учитывать эффективность, точность и вычислительные затраты для достижения наилучших результатов контроля надежности основания дорог, зданий и инженерных сооружений [10].

Материалы и методы

В целом, компьютерное моделирование геологической среды предоставляет инженерам и строителям ценные инструменты для анализа и улучшения различных инженерных сооружений. Это позволяет предупреждать проблемы еще до начала строительства и принимать меры по их предотвращению во время эксплуатации, что будет способствовать увеличению долговечности и безопасности инженерных объектов. В частности, такое моделирование позволяет получить детальную картину геологического строения, выявить различные слои грунта, водоносные горизонты, что может существенно влиять на несущую способность грунта.

По размерности геологическая среда может быть представлена в виде одномерной – 1D (зондирование), двумерной – 2D (разрез) и трехмерной – 3D (участок, район исследования) модели. [10].

При моделировании электрических свойств грунта возникает несколько потенциальных проблем, которые могут повлиять на точность и репрезентативность полученных результатов. Грунты могут быть чрезвычайно неоднородными в своем составе. Моделирование электропроводности в участках с выраженной гетерогенностью может столкнуться с трудностью учета разнообразных минералогических и физических характеристик. Моделирование должно учитывать динамические процессы изменения влажности в течение времени. Точное представление геометрии объектов исследования, таких как подземные образования или слои, является ключевым аспектом. Встреча различных типов грунтов или геологических формаций создает границы, на которых могут происходить неоднозначные изменения электропроводности.

Одним из классических методов электроразведки постоянного тока является метод вертикального электрического зондирования (ВЕЗ). При моделировании используется 1 – d модель, представляющая среду в виде горизонтально – слоистой модели. Каждый горизонтальный слой не имеет различий в удельном сопротивлении или же оно незначительно мало. С погружением тока в глубину, кажущиеся удельное сопротивление ρ_k изменяется поэтапно при достижении очередного слоя [5]. Прямая задача ВЕЗ может быть решена расчётом интеграла Ханкеля [6].

Этот метод позволяет производить моделирование большого количества слоёв, а также может быть модифицирован в метод линейной фильтрации путём математических преобразований интеграла к фильтру линейного вида.

Имеется недостаток в том, что у каждого горизонтального слоя в моделируемой среде фиксированное удельное сопротивление. Для достижения требуемой точности в решении интеграла требуются заметные вычислительные ресурсы. Кроме того, слои среды ограничены представлением в виде плоских участков, у которых склоны не превышают 15° . Это ограничение затрудняет учет дополнительной информации, что, в свою очередь, может привести к получению решения, значительно отклоняющегося от реальных ситуаций [3].

При осуществлении пространственного моделирования, базирующегося на принципах компьютерной графики, применяется концепция представления приповерхностного слоя геологической среды в форме векторной полигональной модели [7]. Каждый полигон этой модели служит абстракцией для объекта неоднородности грунта, в то время как вмещающая среда характеризуется заданным удельным сопротивлением в каждой точке пространства. Данная методика находит применение в многих современных программных средствах обработки геофизических данных. Тем не менее, предложенный подход не лишен ограничений. В первую очередь, он обуславливает вычисление параметров среды только при предварительно установленной структуре. Во-вторых, отсутствует возможность учета разнообразных воздействий на геологическую среду. Эти ограничения могут предполагать использование дополнительных методов или требовать внесения модификаций для решения широкого спектра задач в области геофизики и пространственного компьютерного моделирования.

Существует метод моделирования физико-геологической среды, базирующийся на применении эквивалентных схем элементов, оформленных в форме диэлектрика [4]. Этот метод утверждает, что эквивалентная схема, содержащая параллельно или последовательно соединенные активные и емкостные сопротивления, может служить электрической моделью для анализа исследуемой среды. В ходе моделирования используются данные геофизических измерений, такие как электрический ток, электрическое поле, сейсмические волны и другие физические параметры. Эти измерения используются для вычисления активных и емкостных сопротивлений в эквивалентной схеме модели. Такой подход позволяет провести детальное изучение физических свойств грунта, таких как его электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость. Кроме того, данный метод дает возможность определения геометрических параметров, таких как глубина и распределение различных слоев грунта, что обогащает наше понимание физических процессов в геологической среде.

В представленной модели геологическая среда абстрагируется в виде соединенных схем замещения частицы, где каждая частица представляет собой микрорегион исследуемой среды. С целью анализа электрических свойств, ячейка, охватывающая среду и объекты исследования, описывается двумя сопротивлениями: R_1 и R_2 . R_1 представляет собой сопротивление, характеризующее диэлектрические свойства среды и являющееся чисто реактивным. Это сопротивление связано с диэлектрической проницаемостью и влияет на способность среды отвечать на переменное электрическое поле.

Сопротивление R_2 представляет собой параллельное соединение активных сопротивлений двух различных сред. Это отражает учёт удельного сопротивления выделяемых объектов, которые могут отличаться от окружающей среды. Такой подход позволяет более точно учесть влияние геологических образований, таких как минеральные включения или водные прослойки, на электропроводность общей среды.

Таким образом, предложенная модель интегрирует понятия реактивного и активного сопротивлений, а также удельного сопротивления объектов, с целью детального изучения электропроводности геологической среды. Анализ этих параметров с использованием схемы замещения частиц позволяет проводить более глубокие исследования, связанные с влиянием геологических формаций на электрические свойства окружающей среды.

При моделировании среды в результате соединения ячеек возникает сложная электрическая цепь, которую можно рассчитать с использованием метода узловых потенциалов (МУП) [9]. Основное преимущество МУП заключается в его способности эффективно описывать сложные электрические цепи, включая моделирование среды с большим количеством ячеек. МУП широко используется во множестве программных пакетов для анализа электрических цепей, что обеспечивает удобную и доступную платформу для моделирования геофизических процессов. В результате получаем возможность учитывать сложные взаимодействия между элементами среды и, следовательно, возможность исследования различных сценариев и воздействий на модель.

Использование метода узловых потенциалов сопряжено с ограничениями и недостатками. Одним из них является высокая вычислительная сложность, особенно в случае необходимости моделирования большого количества элементарных ячеек для достижения высокой пространственной разрешающей способности. Это требует значительных вычислительных ресурсов и времени, что может стать существенным ограничивающим фактором. Кроме того, для обеспечения точности результатов необходимо корректно определить параметры и свойства моделируемой среды.

Пример расчёта электрической цепи, состоящей из 2-х соединённых ячеек (рисунок 1):

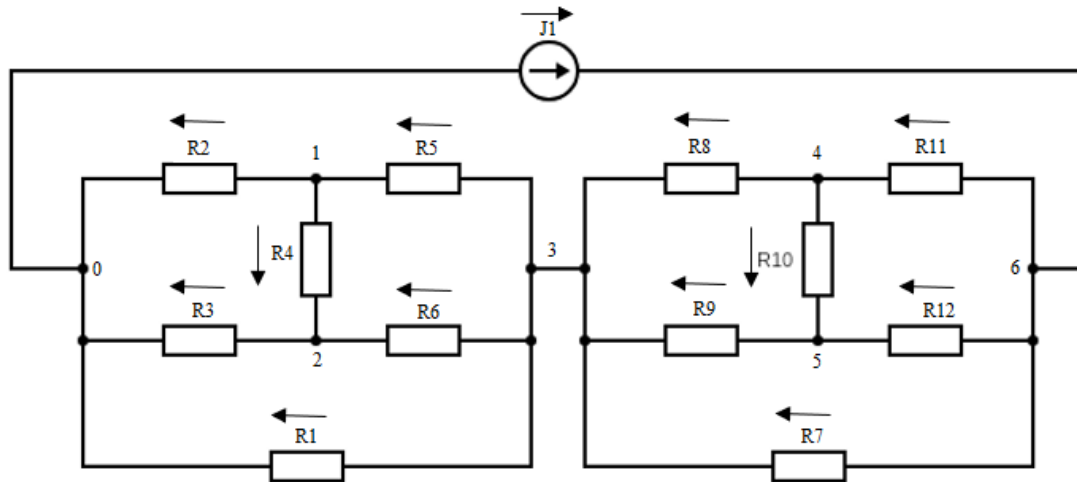


Рисунок 1 – Пример рассчитываемой цепи.

Примем узел 0 за базисный.

Общий вид узловых уравнений имеет вид:

$$[G][V] = [J],$$

где $[V]$ – вектор узловых напряжений, $[G]$ – матрица узловых проводимостей, $[J]$ – вектор узловых токов

Вычисление элементов матрицы проводимостей выполняется по следующим правилам:

- 1) G_{ii} равен сумме проводимостей ветвей, сходящихся в узле i (собственная проводимость узла);
- 2) G_{ij} равен сумме проводимостей ветвей между узлами i и j , взятых со знаком минус (проводимость ветви).

Для рассматриваемой цепи:

$$G_{11} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4}, \quad G_{12} = G_{21} = -\frac{1}{R_4}, \quad G_{33} = \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_7},$$

$$G_{34} = G_{43} = -\frac{1}{R_8}, \quad G_{35} = G_{53} = -\frac{1}{R_9}, \quad G_{36} = G_{63} = -\frac{1}{R_7}, \quad G_{44} = \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{10}},$$

$$G_{45} = G_{54} = -\frac{1}{R_{10}}, \quad G_{46} = G_{64} = -\frac{1}{R_{11}}, \quad G_{55} = \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{10}},$$

$$G_{56} = G_{65} = -\frac{1}{R_{12}}, \quad G_{66} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_7}$$

Вектор узловых токов формируется по следующим правилам:

Ток J_i узла i равен сумме:

- 1) втекающих/вытекающих в узел источников ЭДС деленных на сумму сопротивлений ветви;
- 2) втекающих/вытекающих в узел источников тока;
- 3) источники тока и ЭДС вытекающие из узла берутся со знаком минус, втекающие в узел – со знаком плюс.

Для рассматриваемой цепи:

$$J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = J_5 = 0,$$

$$J_6 = J_1$$

После вычисления значений вектора узловых напряжений выполняется расчет токов на резисторах цепи:

$$I_{R_6} = \frac{V_3 - V_2}{R_6}, \quad I_{R_5} = \frac{V_3 - V_1}{R_5}, \quad I_{R_2} = \frac{V_1}{R_2}, \quad I_{R_3} = \frac{V_2}{R_3}, \quad I_{R_4} = \frac{V_1 - V_2}{R_4}, \quad I_{R_1} = \frac{V_3}{R_1}, \quad I_{R_8} = \frac{V_4 - V_3}{R_8},$$

$$I_{R_9} = \frac{V_5 - V_3}{R_9}, \quad I_{R_{11}} = \frac{V_6 - V_4}{R_{11}}, \quad I_{R_{12}} = \frac{V_6 - V_5}{R_{12}}, \quad I_{R_7} = \frac{V_6 - V_3}{R_7}, \quad I_{R_{10}} = \frac{V_4 - V_5}{R_{10}}$$

Расчет напряжений на резисторах цепи выполняется по закону Ома:

$$U_{R_k} = I_{R_k} * R_k,$$

где k – номер резистора.

Результаты

При использовании метода узловых потенциалов для моделирования электрических цепей моделируемой среды, выбор количества и размера ячеек осуществляется в зависимости от требуемой точности представления исследуемых объектов. Ячейки могут быть соединены как в двумерном, так и в трехмерном пространственном представлении. Преимуществом МУП является способность моделировать сложные геологические аномалии, так как сетка ячеек позволяет более точно отобразить неоднородности в исследуемой среде. Путем изменения размеров и соединения ячеек вокруг аномалий можно достичь более детализированного представления физических свойств среды, таких как проводимость, проницаемость, поляризация и другие параметры.

Рассматриваемый метод расчета – масштабируемый, что дает возможность выбирать необходимые размеры моделируемой среды. Так же возможно реагировать воздействие на грунт упругих колебаний, что вызывает соответствующие изменения электрических характеристик [8]. При этом, для представления сложной среды требуется использование множества ячеек, что существенно увеличивает ресурсоёмкость вычисления прямой задачи. (вычислительная сложность возрастает квадратично с увеличением количества ячеек в моделируемом двумерном разрезе и кубически в случае трехмерной модели).

При выборе размеров и разрешения сетки ячеек для двумерного разреза модели с учетом вычислительной сложности требуется найти баланс между достаточной точностью представления сложной среды и доступными вычислительными ресурсами.

С целью снижения вычислительной сложности при моделировании геологического разреза, можно применить метод эквивалентных преобразований для упрощения полученной электрической цепи. В этом случае каждый слой среды представляется в виде последовательно соединенных ячеек, состоящих из сопротивлений. Последовательность отдельных ячеек заменяем в каждом слое эквивалентным сопротивлением. ($R = \sum R_i$). При этом преобразования не выполняются в местах расположения исследуемых объектов для сохранения точности моделирования.

Такое сокращение количества моделируемых ячеек значительно уменьшает количество рассчитываемых элементов в электрической цепи, что способствует сокращению вычислительной сложности и снижению ресурсоемкости моделирования. Выбор оптимального размера и разрешения сетки ячеек, исключение излишних деталей или областей с низкой значимостью, использование приближенных методов, аналитических решений или аппроксимаций – все это позволяет сократить количество вычисляемых элементов и упростить модель без существенной потери точности.

На рисунке 2 изображена моделируемая среда до и после выполнения оптимизации.

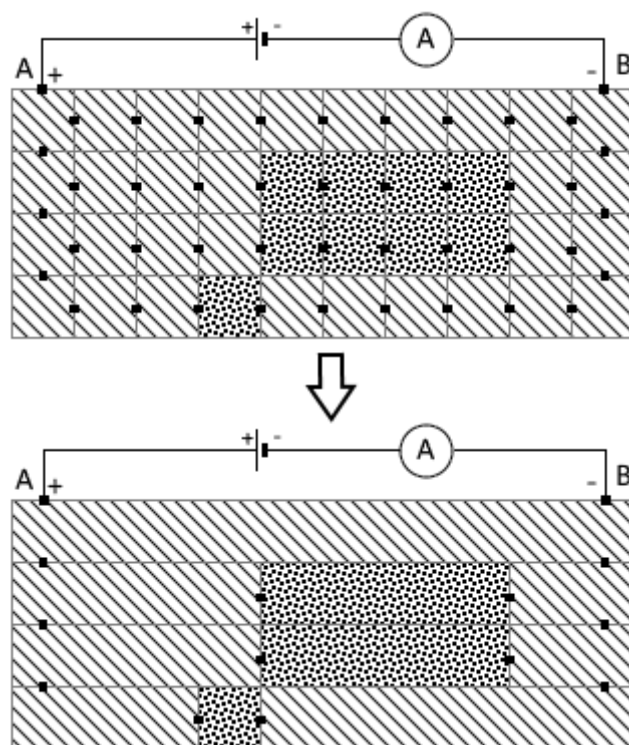


Рисунок 1 – Пример моделируемой среды до оптимизации.

Для апробации компьютерного моделирования электропроводности геологической среды проведены лабораторные исследования, включающие моделирование возникновения и развития карстовых процессов с последующим обрушением грунта. Эти исследования были направлены на более глубокое понимание электрических параметров грунта и их изменений в условиях, схожих с реальными геологическими процессами. В рамках лабораторных экспериментов использовалась подсистема регистрации электрических сигналов на базе АЦП 1-card e14-440, которая фиксировала изменения электрической проводимости грунта в процессе моделирования карстовых явлений и обрушения грунта. Эти данные подвергались анализу и обработке для выделения ключевых закономерностей и понимания динамики изменения электропроводности в различных условиях. Сопоставление данных, полученных из моделирования, с результатами лабораторных экспериментов подтверждает согласованность и достоверность результатов компьютерного моделирования.

Заключение

С помощью компьютерного моделирования можно решить прямую задачу разведочной геофизики. В зависимости от поставленных задач, применяются модели геологической среды с определенными параметрами, и проводится компьютерное моделирование. По результатам моделирования приповерхностного слоя геологической среды можно выбрать параметры измерительной установки, получив при этом общую картину, которая помогает интерпретировать результаты полевых испытаний. Полученные результаты могут быть использованы для различных целей, включая распознавание мест потенциальных провалов, отслеживание геологических процессов, таких как выветривание, высыхание, диффузия, вымерзание, а также разведку полезных ископаемых.

В задачах исследования геологической среды с применением сейсмoeлектрических методов наиболее эффективным является использование модели представления физико-геологической среды на основе эквивалентной схемы элемента среды в виде диэлектрика. Это позволяет получить более точное представление физических свойств среды и использовать полученные данные для оценки надежности оснований дорог, зданий и инженерных сооружений.

Возможность изменения параметров моделируемой геологической среды в рамках компьютерного моделирования дает возможность проводить исследования

геодеформационных процессов. В частности, имеется возможность манипулировать влажностью грунта, что играет важную роль в определении его электропроводности. Это особенно актуально в контексте оценки рисков, связанных с подтоплением или деградацией грунта из-за изменений водных режимов.

Кроме того, способность изменять состав грунта в рамках модели позволяет более детально рассмотреть влияние различных минералогических компонентов на электропроводность. Это важно для выявления особенностей различных типов грунтов и их влияния на надежность фундаментов. Управление вертикальными и горизонтальными слоями добавляет гибкости в анализе, позволяя оценивать воздействие различных глубин на электрические свойства грунта. Изменение плотности грунта также выделяется важным фактором, поскольку это влияет на несущую способность, и возможность варьировать этот параметр обеспечивает дополнительные сценарии для изучения.

Таким образом, компьютерное моделирование геологической среды представляет не только мощный инструмент для решения текущих задач в инженерии, но и позволяет предсказывать возможные сценарии развития геологических процессов в будущем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Guangjun Ji, Qian Wang, Xiaoyuan Zhou, Zizhao Cai, Jixiang Zhu, Yan Lu, An automated method to build 3D multi-scale geological models for engineering sedimentary layers with stratum lenses, *Engineering Geology*, Volume 317, 2023, p.107077.
- 2 Интегрированная среда физико – геологического моделирования на основе системной инверсии [Текст]: монография / А. И. Кобрунов, С. Г. Куделин, Е. Н. Мотрюк. – Ухта : УГТУ, 2015. – 90 с.
- 3 NICULESCU, Bogdan. (2018). Forward Modeling of Vertical Electrical Soundings with Applications in the Study of Sea Water Intrusions. 10.5593/sgem2018/1.1/S05.101.
- 4 Кузичкин О.Р., Греченева А.В., Бакнин М.Д., Суржик Д.И., Дорофеев Н.В. Геоэлектрическое моделирование локальных геодинамических участков в системах геотехнического контроля // *Динамика сложных систем – XXI век.* – 2018. – Т. 12. – № 4. – С. 25 – 33.
- 5 Das, U. C. and D. P. Ghosh. 1974. The determination of filter coefficients for the computation of standard curves for dipole resistivity sounding over layered earth by linear digital filtering. *Geophys. Prosp.* v. 2, no.4, pp. 765 – 780.
- 6 O'Neill, D. J. 1975. Improved linear coefficients for application in apparent resistivity computations. *Bull. Austral. Soc. Explor. Geophys.* v. 6, no. 4, pp. 104 – 109.
- 7 Журбин И.В. Метод формирования пространственной модели приповерхностных слоев грунта при малоглубинной электроразведке археологических памятников / И.В. Журбин, Д.В. Груздев, А.В. Смурыгин // *Вестник ИжГТУ.* – 2006. – № 2. – С. 29 – 34.
- 8 Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Application of seismoelectric method for inspection conductive media // *Applied Mechanics and Materials.* – 2013. – vol. 490–491. pp. 1712–1716.
- 9 Lara De Giorgi, Giovanni Leucci, Chapter 1 - Passive and active electric methods: New frontiers of application, Editor(s): Raffaele Persico, Salvatore Piro, Neil Linford, *Innovation in Near-Surface Geophysics*, Elsevier, 2019, Pages 1-21.
- 10 Baknin, M.D., Bykov, A.A., Surzhik, D.I., Kuzichkin, O.R. Geotechnical monitoring of the foundations of structures based on integrated seismoelectric measurements in conditions of karst hazard. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM* this link is disabled, 2020, 2020-August(1.2), pp. 559–566.

REFERENCE

- 1 Guangjun Ji, Qian Wang, Xiaoyuan Zhou, Zizhao Cai, Jixiang Zhu, Yan Lu, An automated method to build 3D multi-scale geological models for engineering sedimentary layers with stratum lenses, *Engineering Geology*, Volume 317, 2023, p.107077.
- 2 Интегрированная среда физико – геологического моделирования на основе системной инверсии [Текст] : монография / А. И. Кобрунов, С. Г. Куделин, Е. Н. Мотрюк. – Ухта : УГТУ, 2015. – 90 с. [in Russian].

- 3 NICULESCU, Bogdan. (2018). Forward Modeling of Vertical Electrical Soundings with Applications in the Study of Sea Water Intrusions. 10.5593/sgem2018/1.1/S05.101.
- 4 Kuzichkin O.R., Grecheneva A.V., Baknin M.D., Surzhik D.I., Dorofeyev N.V. Geoelektricheskoye modelirovaniye lokal'nykh geodinamicheskikh uchastkov v sistemakh geotekhnicheskogo kontrolya // *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek. – 2018. – T. 12. – № 4. – pp. 25 – 33.*
- 5 Das, U. C. and D. P. Ghosh. 1974. The determination of filter coefficients for the computation of standard curves for dipole resistivity sounding over layered earth by linear digital filtering. *Geophys. Prosp. v. 2, no.4, pp. 765 – 780.*
- 6 O'Neill, D. J. 1975. Improved linear coefficients for application in apparent resistivity computations. *Bull. Austral. Soc. Explor. Geophys. v. 6, no. 4, pp. 104 – 109.*
- 7 Zhurbin I.V. Method for forming a spatial model of near-surface soil layers during shallow electrical exploration of archaeological sites / I.V. Zhurbin, D.V. Gruzdev, A.V. Smurygin // *Bulletin of IzhSTU. – 2006. – No. 2. – pp. 29 – 34 [in Russian].*
- 8 Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Application of seismoelectric method for inspection conductive media // *Applied Mechanics and Materials. – 2013. – vol. 490–491. pp. 1712–1716.*
- 9 Lara De Giorgi, Giovanni Leucci, Chapter 1 - Passive and active electric methods: New frontiers of application, Editor(s): Raffaele Persico, Salvatore Piro, Neil Linford, *Innovation in Near-Surface Geophysics, Elsevier, 2019, Pages 1-21.*
- 10 Baknin, M.D., Bykov, A.A., Surzhik, D.I., Kuzichkin, O.R. Geotechnical monitoring of the foundations of structures based on integrated seismoelectric measurements in conditions of karst hazard. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM this link is disabled, 2020, 2020-August(1.2), 559–566.*

А.А. Быков

Есіл университетінің есілі, Қазақстан

Жолдардың, ғимараттардың және инженерлік құрылыстардың іргетасының сенімділігін бақылау мәселесі кезінде геологиялық ортаның электр өткізгіштігін компьютерлік модельдеу

Негізгі мәселе: Геофизикалық зерттеулердің маңызды аспектісі автомобиль жолдары, ғимараттар мен инженерлік құрылыстар негізінің сенімділігін бақылау болып табылады. Геологиялық гетерогендіктерді модельдеу өзекті болып табылады. Оның үстіне, бұл мәселеде компьютерлік модельдеуді пайдалану есептеу шығындарымен байланысты.

Мақсаты: серпімді тербелістер әсер еткен кезде топырақтың физикалық қасиеттерін және олардың өзгеруін модельдеу үшін тік электр дыбыстау (ВЕС) әдісін талдау.

Әдістер: Мақсатқа жету үшін геологиялық ортаның бір өлшемді моделін қолдана отырып, тік электр дыбыстау (ВЕС) әдісі қолданылды. Тікелей ВЕС мәселесі Ханкель интегралын есептеу арқылы шешілді.

Нәтижелері және олардың маңыздылығы: зерттеу ВЭС әдісін қолдана отырып, топырақ қабаттарының көптігін модельдеуге мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер серпімді тербелістердің әсеріне ұшыраған кезде анықталған объектілердің параметрлерін және бақыланып отырған орта сипаттамаларының өзгеруін анықтауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелердің маңызы топырақтың физикалық қасиеттерін модельдеу әдісін жетілдіру және серпімді тербеліс әсерінен олардың өзгерістерін есепке алу мүмкіндігінде жатыр, бұл іргетастың сенімділігін бақылаудың тиімділігі мен дәлдігін арттыруға көмектеседі.

Түйінді сөздер: модельдеу, геофизикалық мониторинг, электрлік перспектива, серпімді тербелістер, топырақ.

A.A. Bykov

Esil University Institution, Kazakhstan

**Computer Modeling of the Electrical Conductivity of the Geological Environment
in Problems of Monitoring the Reliability of the Foundation of Roads,
Buildings and Engineering Structures**

Annotation

Main problem: Monitoring the reliability of the foundation of roads, buildings and engineering structures is an important aspect of geophysical research. Modeling of geological heterogeneities is relevant. Moreover, the use of computer modeling in this problem is associated with computational costs.

Purpose: Analysis of the vertical electrical sounding (VES) method for modeling the physical properties of soil and their changes when exposed to elastic vibrations.

Methods: To achieve the goal, the vertical electrical sounding (VES) method was used, using a one-dimensional model of the geological environment. The direct VES problem was solved by calculating the Hankel integral.

Results and their significance: The study made it possible to model a large number of soil layers using the VES method. The results obtained make it possible to determine the parameters of detected objects and changes in the characteristics of the controlled environment when exposed to elastic vibrations. The significance of the results lies in the possibility of improving the method for modeling the physical properties of soil and taking into account their changes under the influence of elastic vibrations, which helps to increase the efficiency and accuracy of monitoring the reliability of the foundation.

Key words: modeling, geophysical monitoring, electrical prospecting, elastic vibrations, soil.

Дата поступления рукописи в редакцию: 28.11.2023 г.