



БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ИНЖЕНЕРИЯ
ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ
SOFTWARE ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2023_4_220

МРНТИ 37.01.77: 50.41.29

**К.Т. Искаков¹, С.А. Боранбаев¹, Ж.О. Оралбекова¹, Т.А. Жусупов²,
К.К. Мухамбеткалиев³, А.В. Сейтханова²**

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

E-mail: kazizat@mail.ru*

E-mail: boranbaevsa@mail.ru

E-mail: oralbekova@bk.ru

²РГП на ПХВ «Национальный центр качества дорожных активов», г. Астана, Казахстан

E-mail: t.zhussupov@sapaortalygy.kz

E-mail: a.seitkhanova@sapaortalygy.kz

³АО «Казахстанский центр модернизации и развития жилищно-коммунального хозяйства»,
г. Астана, Казахстан

E-mail: k.mukhambetkaliyev@zhkh.kz

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

ЖОЛ ҚАБАТЫНЫҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫН АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ПРОГРАММАЛЫҚ ЖАБДЫҚ

SOFTWARE FOR DETERMINING THE GEOLOGICAL SECTION OF THE ROAD PATH

Аннотация. В данной работе анализируются аспекты, возникающие в процессе эксплуатации, ремонта и модернизации автомобильных дорог, связанные с изучением структуры земельного покрытия и прогнозированием его состояния. Эти аспекты включают в себя изучение строения различных слоев дорожного покрытия, определение толщины и характеристик искусственных покрытий на автодорогах, оценку толщины и свойств структурных слоев. Для исследования этих задач применяется неразрушающий метод зондирования георадаром серии Око-2. Проведены экспериментальные исследования с применением этого прибора на участке одной из трасс в Акмолинской области. На основе инженерно-технических приемов, суть которых состоит в использовании физически обоснованных либо экспериментально установленных закономерностей, разработаны алгоритмы и программное приложение по выявлению геоэлектрического разреза дорожного полотна.

Электрическая проводимость дорожной одежды (или обратная ей величина – удельное сопротивление) является важной характеристикой автомобильных дорог. Проводимость и электрическое сопротивление слоев дорожного полотна мало изучены. На электрическую проводимость влияет состояние дорожного покрытия, дорожного основания, земляного полотна и материалов его слоев.

Целью работы является разработка программного обеспечения определения геоэлектрического разреза дорожной одежды.

Ключевые слова: Алгоритм, геофизический комплекс, программное приложение, геоэлектрический разрез.

Аңдатпа. Бұл жұмыста жер жамылғысының құрылымын зерттеуге және оның жағдайын болжауға байланысты автомобиль жолдарын пайдалану, жөндеу және жаңғырту кезінде туындайтын аспектілер талданды. Бұл аспектілерге әр түрлі жабын қабаттарының құрылымын зерттеу, автомобиль жолдарындағы жасанды жабындардың қалыңдығы мен сипаттамаларын анықтау, құрылымдық қабаттардың қалыңдығы

мен қасиеттерін бағалау кіреді. Бұл есептерді зерттеу үшін Око-2 сериялы георадарымен бұзылмайтын зондау әдісі қолданылды. Бұл құрылғының көмегімен Ақмола облысындағы тас жолдың бір бөлігінде тәжірибелік зерттеулер жүргізілді. Физикалық тұрғыда негізделген немесе эксперименталды түрде анықталған заңдылықтарды қолдану болып табылатын инженерлік-техникалық әдістердің негізінде жолдың геоэлектрлік кескінін анықтау үшін алгоритмдер мен сәйкес бағдарламалық қамтамасыз ету әзірленді.

Жол төсемінің электрлік өткізгіштігі (немесе оның кері шамасы – меншікті кедергі) автокөлік жолдарының маңызды сипаттамасы болып табылады. Жол қабаттарының өткізгіштігі мен электрлік кедергісі аз зерттелген. Электрлік өткізгіштікке жол төсемінің, жол негізінің, жер асты қабатының және оның қабаттарының материалдарының жағдайы әсер етеді.

Жұмыстың мақсаты – жол жабындысының геоэлектрлік қимасын анықтауға арналған бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу.

Түйін сөздер: Алгоритм, геофизикалық кешен, программалық қосымша, геоэлектрлік кескін.

Abstract. This research work analyzes aspects that arise during the operation, repair and modernization of highways related to the study of the structure of the ground cover and predicting its condition. These aspects include studying the structure of various pavement layers, determining the thickness and characteristics of artificial pavements on highways, and assessing the thickness and properties of structural layers. To study these problems, a non-destructive sounding method is used with the GPR Oco-2. Experimental investigations using this device were conducted on a segment of a highway in the Akmola region. Based on the use of physically substantiated or experimentally established patterns, algorithms and a corresponding software application have been developed to identify the geoelectric section of the roadway.

The electrical conductivity of road pavement, or its inverse value, resistivity, holds significant importance in highway infrastructure. Unfortunately, there has been limited research on the conductivity and electrical resistance of road surface layers. These electrical properties are influenced by various factors, including the condition of the road surface, road base, subgrade, and the materials used in its layers.

The aim of this study is to create software capable of determining the geoelectric profile of road pavement.

Keywords: Algorithm, geophysical complex, software application, geoelectric section.

Введение. В настоящее время при проведении дорожно-строительных и дорожно-ремонтных работ активно используются георадиолокационные комплексы серии Око-2. Использование георадара позволяет изучить следующую важную задачу: сканирование грунта на глубинах порядка до 15 метров с целью создания комплексной модели рельефа с учетом геологии и гидрологии, что даёт возможность избежать разрушения планируемой дороги.

Для изучения строения дорожной одежды и прогноза его состояния, необходимо определить: мощности слоев дорожной одежды, толщины, геоэлектрический разрез; участки влажности в слоях; наличие неоднородных тел; состояние подстилающего слоя.

Основные аспекты применения информационно-коммуникационных технологий в задачах интерпретации и анализ технических характеристик георадаров отражены в работе [1]. Методика интерпретации георадиолокационных данных, полученных с георадара «Лоза В», изложена в работе [2]. Задача определения диэлектрической проницаемости среды, по данным георадара серии Лоза-В, изложена в работе [3]. В дальнейшем этот алгоритм интерпретации апробирован на данных георадара «Зонд-12».

Отличительная особенность настоящей работы состоит в том, что данные георадара серии Око-2 фиксируются при движении георадара с прикрепленными антеннами лабораторного комплекса, движущегося со скоростью 20-50 км/час. С помощью алгоритмов фильтрации и вейвлетов отклик среды, полученный от георадара, по аналогии с [4], был очищен от шумов и помех.

Материалы и методы исследования. Для реализации проекта была использована материальная база Республиканского государственного предприятия на ПХВ «Национальный центр качества дорожных активов» (НЦКДА) Министерства индустрии и инфраструктурного развития РК. С данной организацией был заключен договор на проведение георадарного обследования земляного полотна, основания и покрытий

автомобильных дорог с помощью прибора серии «Око-2» (АБ-400Р и АБ-1000Р) с выдачей результатов. На рис.1 представлен вид передвижной дорожной диагностической лаборатории РГП на ПХВ «НЦКДА» с установленными приборами георадарами «Око-2». Антенные блоки закрепляются на корпусе автомобиля с помощью специальной универсальной подвески.

Для проведения экспериментального исследования участка был осуществлен выезд на участка «Капитального ремонта автомобильной дороги «Восточный обход г. Астана – ст. Сарыоба» км. 0-23 и км. 23-41. Состав экспедиции состоял из сотрудников ЕНУ имени Л.Н. Гумилева и РГП на ПХВ «НЦКДА», в том числе: Директор Департамента диагностики и ведомственной экспертизы Жусупов Т.А., ведущий эксперт отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры Калменов К.Б., научный руководитель проекта профессор Исаков К.Т., доцент Оралбекова Ж.О. и старший преподаватель Боранбаев С.А, главный менеджер Департамента жилищных отношений и технического регулирования АО «Казахстанский центр модернизации и развития жилищно-коммунального хозяйства» Мухамбеткалиев К.К. В рамках задач проекта было осуществлено георадарное измерение с помощью прибора «Око-2» (АБ-400Р и АБ-1000Р) на участке с конструктивными слоями дорожной одежды (рис. 2):

1. уложенного нижнего слоя основания из щебноочно-печанной смеси С4;
2. уложенного верхнего слоя основания из щебноочно-песчанной смеси С6, обработанной портландцементом М-40 в количестве 7 %;
3. уложенного нижнего слоя покрытия горячим крупнозернистым пористым асфальтобетонном Марки 2.



Рисунок 1. Передвижная дорожная диагностическая лаборатория РГП на ПХВ «НЦКДА» с установленными приборами георадарами «Око-2» (АБ-400Р и АБ-1000Р)



Рисунок 2. Радарограмма нижнего слоя основания из щебноочно-печанной смеси С4

и верхнего слоя основания из щебеночно-песчанной смеси С6, обработанной
портландцементом М-400 в количестве 7 %

Приведем данные экспериментальных исследований. На рис. 3 изображена радарограмма, полученная в точке наблюдения координаты GPS (широта 51.16.09.636, долгота 72.00.34.944, скорость передвижения авто 12 км/час, точка наблюдения по полотну трассы 0,145 км).

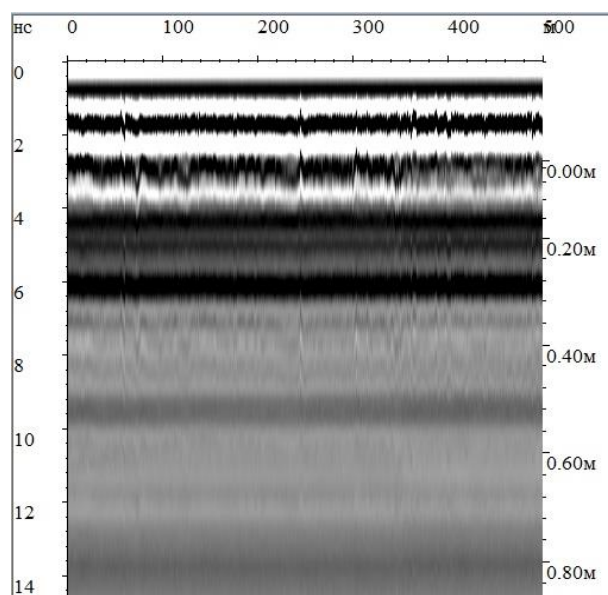


Рисунок 3. Радарограмма в точке наблюдения GPS (широта 51.16.09.636, долгота 72.00.34.944, скорость передвижения авто 12 км/час, точка наблюдения по полотну трассы 0,145 км)

На рис. 4 приведен фрагмент трассы радарограммы.

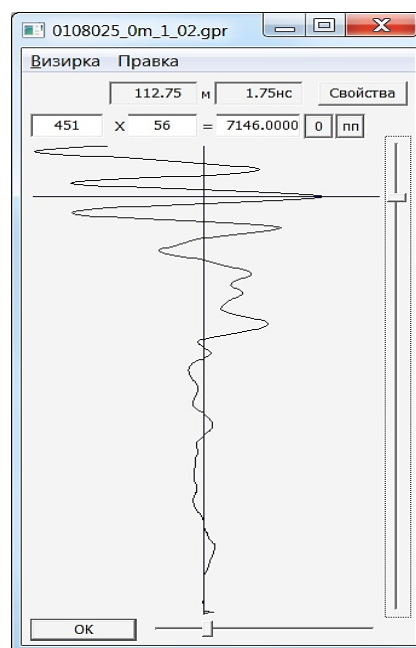


Рисунок 4. Трасса радарограммы в точке наблюдения

На рис. 5 приведены данные с монитора георадарного комплекса ОКО-2 в двухканальном режиме с антеннами АБ-400Р (левый фрагмент) и антенны АБ-1000Р (правый фрагмент).

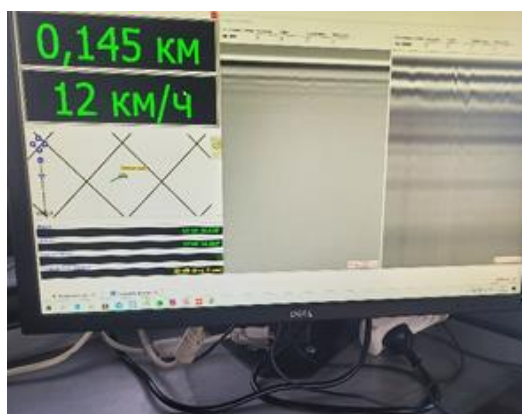


Рисунок 5. Фрагмент с монитора георадарного комплекса «Дорога ПРО»

Результаты и их обсуждения. Известны исследования по использованию георадиолокации для определения диэлектрической проницаемости и проводимости грунтов и материалов [1-9].

Для определения электрической проводимости подповерхностной среды методом георадиолокационных исследований используются различные теоретические и экспериментальные расчетные формулы.

Электрическая проводимость σ , согласно [5], связана с диэлектрической проницаемостью среды и затуханием следующим образом:

$$\sigma = \alpha \sqrt{\epsilon}/1.69,$$

где α – затухание в dB/m , σ – электрическая проводимость в МС/м , ε – диэлектрическая проницаемость, полученная в результате анализа данных георадарного поля.

В работе [6] для определения диэлектрической проницаемости подповерхностного грунта используют следующую формулу:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma \mu c}{2\alpha} \right)^2,$$

где α – коэффициент затухания, c – скорость света, σ – электрическая проводимость среды, μ – магнитная постоянная.

Разработана программа обеспечения определения геоэлектрического разреза дорожной одежды. Программа предназначена для начальной обработки и визуализации данных геофизического прибора. Созданная программа способна определить глубину расположения подповерхностных объектов, при заданной глубине объекта программа может вычислить электрическую проводимость среды. Важным функциональным элементом является возможность сохранения профилей и графиков в различных форматах. Программа определения геоэлектрического разреза дополняет и улучшает интерпретацию результатов георадарных исследований с помощью фирменных ПО, поставляемых вместе с георадарами.

Для визуализации профиля используется метод переменной плотности (рис. 6), у которого координаты каждого пикселя обозначают соответственно: абсцисса – расстояние от начала профиля, ордината – время прихода сигнала, цвет – амплитуду сигнала (как правило, более темные цвета ставятся в соответствие большим значениям амплитуды сигнала) [10, 11].

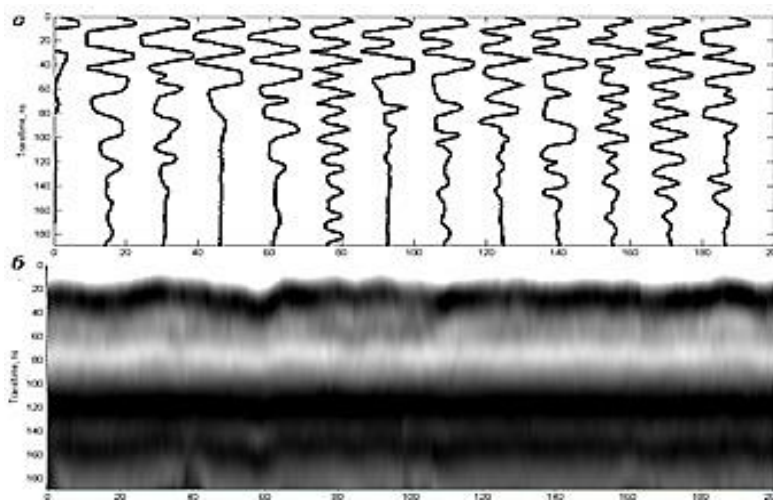


Рисунок 6. Пример радарограммы: *а* – в виде набора трасс; *б* – в виде графического изображения

Анализ полученной радарограммы требует применения специальных методик. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, для решения инженерных задач необходимо иметь зависимость амплитуды сигнала от глубины его отражения, тогда как исходная радарограмма представляет собой зависимость амплитуды сигнала от времени отражения.

Вид программного модуля для расчета электрической проводимости представлен на рис. 7. Программа имеет стандартный интерфейс: загрузка файла сканирования георадара, расчет и сохранение необходимых параметров.

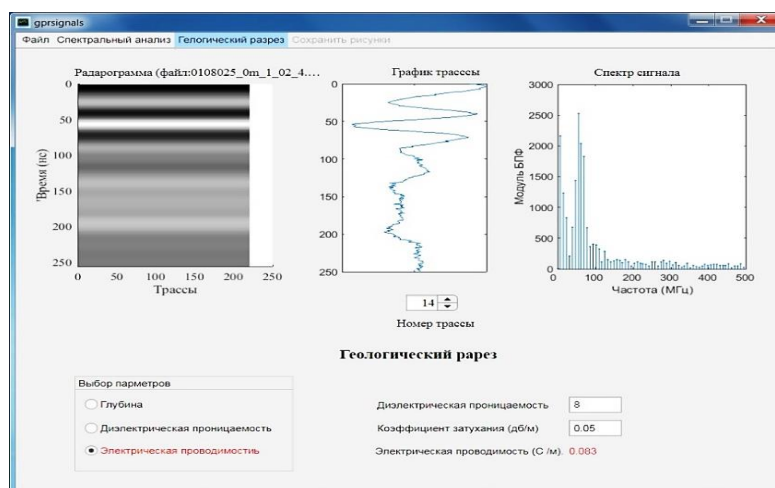


Рисунок 7. Интерфейс программного модуля для расчета электрической проводимости

Модуль программы, который отвечает за определение глубины расположения подповерхностных объектов, включен в комплексное программное обеспечение с названием «Определение геоэлектрического разреза подповерхностных объектов».

Вид программного модуля для определения глубины залегания подповерхностных объектов показан на рис. 8.

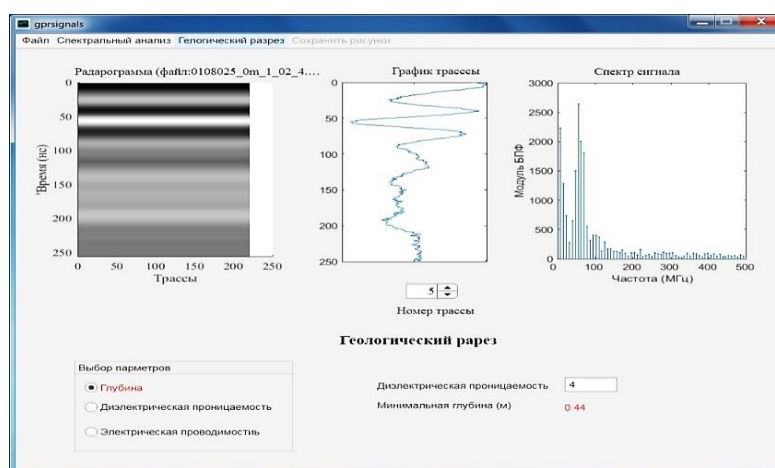


Рисунок 8. Интерфейс программного модуля для нахождения глубины залегания

Вид программного модуля для расчета диэлектрической проницаемости представлен на рис. 9.

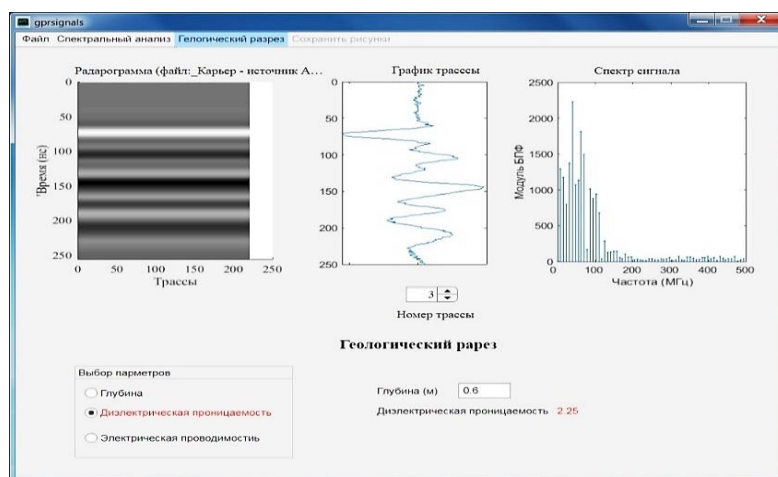


Рисунок 9. Интерфейс программного модуля для расчета диэлектрической проницаемости

Для обнаружения объекта с использованием георадиолокационного метода требуется, чтобы объект имел значительные отличия от окружающего грунта в терминах электрических характеристик, таких как диэлектрическая проницаемость или электрическая проводимость [12-15].

Заключение. Программное обеспечение, поставляемое в комплекте с георадарным оборудованием, не описывает комплекс использованных методов, заложенных в процессе цифровой обработки сигналов. Программное обеспечение, а также математическая модель, которые используются для обработки данных георадиолокации, являются коммерческой тайной производителей и не доступны для прямого изучения. Разработанная программа поможет упростить процессы интерпретации данных и создания библиотеки, в которой будет отражено соответствие между структурой дорожного покрытия и радиолокационными профилями.

Благодарности. Работа поддержана в рамках грантового финансирования МНиВО РК 2023-2025 по проекту АР 19680361 «Разработка вычислительных технологий для диагностики дорожной одежды автомобильных трасс».

References

1. Iskakov K., Tokseit D., Boranbaev S., Akhmetov I., Gelbukh I. Computer Modeling of the Outgoing GPR Signal // *Computacion y Sistemas*. – 2023. – Vol. 27(1). – P. 5-12.
2. Mukanova B.G., Iskakov K.T., Kembay A., Boranbaev S.A. Inverse Source Identification Problem for the Wave Equation: An Application for Interpreting GPR Data // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. – 2020. – Vol.8., Issue 3. – P. 78-91.
3. Iskakov K.T., Tokseit D.K., Oralbekova Zh.O., Mirgaliyzy T. Creation and testing of a new mathematical software for processing georadar data // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. – 2019. – Vol. 7, Issue 4. – P. 86-99.
4. El-Dayem M.A., El-Gawad A.A., Bedair S., Farag K.S.I. Groundwater resource evaluation using geoelectrical resistivity survey in the Ghard El-Hunishat area of New Delta project province, North Western Desert, Egypt // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 21. – P. 100918. - <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100918>.
5. Cimpoiasu M.O., Kuras O., Pridmore T., Mooney S.J. Potential of geoelectrical methods to monitor root zone processes and structure: A review // *Geoderma*. – 2020. – Vol. 365. – P.114232. – <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114232>.
6. Araffa S.A.S., Alrefae H.A., Nagy M. Potential of groundwater occurrence using geoelectrical and magnetic data: A case study from south Wadi Hagul area, the northern part of the Eastern Desert,

- Egypt // Journal of African Earth Sciences. – 2020. – Vol.172. – P. 103970. – <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103970>.
7. Rizzo E., Giampaolo V., Capozzoli L., De Martino G., Romano G., Santilano A., Manzella A. 3D deep geoelectrical exploration in the Larderello geothermal sites (Italy) // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2022. – Volumes 329–330. – P. 106906. – <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2022.106906>.
 8. Venkateswara R.B., Sevu M., Narasaiah V. Dielectric constants determination of overburden materials using ground penetrating radar // J.Ind.Geophys. Union. – 2020. – Vol. 24(5). – P.64-74.
 9. Kwami I.A., Haruna A.I., Mukkafa S., Maigari A.S., Bello A.M., Usman M.B., Umar A.D., Justus I.O., Sadiq A.M., Umar M.A. Delineation of aquifer systems and aquifer vulnerability using geoelectrical parameters: a case study of Ashaka cement factory // Results in Earth Sciences. – 2023. – P. 100003. - <https://doi.org/10.1016/j.rines.2023.100003>.
 10. Osotuyi A.G., Mohammed M.Z., Ajayi I.R., Salako A.O. Assessment of geoelectric properties and localized geology as indicators on cocoa (Theobroma cacao) yield in a part of southwestern Nigeria // Heliyon. – 2021. – Vol.7, Issue 12. – P. e08516. - <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08516>.
 11. Zhang B., Cheng H., Zhong Y., Tao X., Li G., Xu S. Automatic quantitative recognition method for vertical concealed cracks in asphalt pavement based on feature pixel points and 3D reconstructions // Measurement. – 2023. – Vol. 220. – P. 113296. – <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113296>
 12. Todkar S.S., Baltazart V., Ihamouten A., Dérobert X., Guilbert D. One-class SVM based outlier detection strategy to detect thin interlayer debondings within pavement structures using Ground Penetrating Radar data // Journal of Applied Geophysics. – 2021. – Vol. 192. – P. 104392, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104392>
 13. Christensen N.B. Joint inversion of airborne TEM data and surface geoelectrical data. The Egebjerg case // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 196. – P. 104511. – <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104511>.
 14. Zajícová K., Chuman T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review // Geoderma. – 2019. – Vol.343. – P. 116-129.
 15. Becker S.M., Franz T.E., Abimbola O., Steele D.D., Flores J.P., Jia X., Scherer F.T., Rudnick R.D., Neale C.M. Feasibility assessment on use of proximal geophysical sensors to support precision management // Vadose Zone J. – 2022. – Vol. 21. – P. e20228.
-
-