

ОХРАНА ТРУДА, ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ (НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ) / LABOR PROTECTION, INDUSTRIAL SAFETY, SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS (SUBSOIL USE)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.56>

ГЕОРАДАРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ НА ОБЪЕКТЕ СКЛАДИРОВАНИЯ НАМЫВНЫХ ОТХОДОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья

Дьяков А.Ю.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-1994-3944;

¹ Горный институт КИЦ РАН, Апатиты, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (a.dyakov[at]ksc.ru)

Аннотация

Статья посвящена исследованию внутренней структуры ограждающей дамбы на объекте складирования намывных отходов горного производства георадарным зондированием. Изложены подходы к проведению современных, высокотехнологичных и информативных неразрушающих георадарных исследований для целей подконтурного зондирования в объектах складирования отходов горного производства – гидротехнического сооружения, изучения его подповерхностной структуры и локализации фильтрационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища. Выявлена взаимосвязь изменения волнового поля и диэлектрической проницаемости грунтов с зонами повышенного влагонасыщения и фильтрации дамбы. Выполненные работы позволили оценить состояние ограждающей дамбы хвостохранилища и выявить локальные зоны повышенного влагонасыщения и фильтрации.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, хвостохранилище, георадарное зондирование, волновое поле.

GEORADAR RESEARCH OF AN ENCLOSING DAM AT A MINING WASTE ALLUVIAL STORAGE FACILITY

Research article

Dyakov A.Y.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-1994-3944;

¹ Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russian Federation

* Corresponding author (a.dyakov[at]ksc.ru)

Abstract

The article is dedicated to the research of the internal structure of an enclosing dam at the object of the mining waste alluvial storage facility by means of georadar sounding. Approaches to modern, high-tech and informative non-destructive georadar research for the purposes of subcontour sounding in the objects of mining waste storage facilities - hydraulic facilities, the study of its subsurface structure and localization of filtration processes in the body of the enclosing dam of the tailings are described. The correlation of changes in the wave field and dielectric capacity of soils with the zones of increased moisture saturation and filtration of the dam was established. The performed works made it possible to evaluate the condition of the enclosing dam of the tailings and identify local zones of increased water saturation and filtration.

Keywords: hydraulic facilities, tailing dam, georadar sounding, wave field.

Введение

Горнодобывающие предприятия в западной части российского сектора Арктики представлены большим количеством объектов складирования намывных отходов горного производства, таких как хвостохранилища, которые являются потенциально опасными. Изучение структуры и состояния пород и грунтов этих объектов — это ключевой элемент в вопросах эффективности и безопасности функционирования горнопромышленного предприятия. Только за последние пять лет произошло несколько крупных аварий на насыпных гидротехнических сооружениях, где 31% всех аварий это результат локального выхода воды [1], [2], [3].

Использование геофизических методов обследования позволяет получать оперативную информацию о структурных особенностях сооружения и степени водонасыщенности слагающих их грунтов [4], [5], [6]. Существование большого количества методов геофизики свидетельствует об отсутствии какого-то одного стандартного метода, способного обеспечить оперативное и качественное получение требуемой информации о структуре насыпных сооружений. Одним из оперативных методов изучения геолого-структурного строения массива скальных пород является георадарное зондирование, позволяющее исследовать изменение физических свойств в массиве пород и грунтов [6]. Опыт применения для изучения физических свойств пород месторождений Урала, Сибири, Дальнего Востока и западной части Российского сектора Арктики показывает, что неразрушающее подповерхностное георадарное обследование может эффективно использоваться для изучения насыпных сооружений, включая гидротехнические [6]. В свою очередь стоит отметить, что отсутствие обоснованных параметров обеспечивающих идентификацию водонасыщенных зон в теле насыпных сооружений, зачастую приводит к субъективной интерпретации и как следствие к ошибочным выводам. Комплексование геофизических методов хоть и повышает качество получаемой информации, но и приводит к значительным трудозатратам с удорожанием работ [7]. Теряется такой значимый элемент в исследовании как оперативность, с возможностью получения информации в режиме in-situ (на месте). Использование уже полученных данных и закономерностей при комплексировании

визуальных, сейсмических и георадарных исследований [8], [9], [10] на схожих объектах для целей выявления водонасыщенных зон в грунтовых гидротехнических сооружениях может применяться и на других объектах такого профиля. На наблюдательном полигоне насыпной дамбы хвостохранилища для локализации зон водонасыщения и намочения грунтов выполнено георадарное исследование. Для георадарного исследования использовался комплекс RAMAC шведского производства компании Mala, оснащенного экранированной антенной 100 МГц, которая позволяет производить зондирование на глубину до 20 метров.

Целью данной работы является уточнение внутренней структуры ограждающей дамбы на объекте складирования намывных отходов горного производства и локализации зон различного водонасыщения грунтов. Новизна проведенных георадарных исследований заключается в использовании количественных показателей для категорирования грунтов по их свойствам и водонасыщению по параметрам скорости электромагнитной волны V .

Методы и принципы исследования

Как известно, основным параметром для определений и интерпретации структуры и состояния грунтового гидротехнического сооружения георадиолокацией, является скорость распространения электромагнитных волн [6]. Скорость распространения электромагнитных волн V в среде напрямую связана с действительной частью комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды [11], [12]:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (1)$$

где c - скорость света в вакууме, ε - действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости массивов пород.

Поэтому одним из основных физических свойств пород и грунтов, определяемых георадиолокацией, является их диэлектрическая проницаемость ε . Диэлектрическая проницаемость грунтов напрямую связана с их влажностью, и, на сегодняшний день получен ряд эмпирических выражений, определяющих эту связь. Например, для осадочных пород эмпирическая взаимосвязь диэлектрической проницаемости и влажности, в диапазоне изменения влажности от 3 до 45%, имеет вид [11]:

$$\varepsilon = 3,03 + 9,3W_{об} + 14W_{об}^2 - 7,6W_{об}^3 \quad (2)$$

для сред с большой влажностью:

$$\varepsilon = \frac{720}{180-W} \quad (3)$$

где: $W_{об}$ - объемная влажность, W - весовая влажность.

При этом под весовой влажностью понимается процентное отношение веса влаги, содержащейся в образце влажного материала, к весу того же образца, высушенного до постоянного веса. В свою очередь, объемная влажность является процентным отношением объема влаги, содержащейся в образце материала, к объему образца.

Из приведенных эмпирических выражений следует, что повышение влажности грунтов приводит к увеличению значений диэлектрической проницаемости. Таким образом, в георадиолокации признаком роста влагонасыщения грунтов является увеличение определяемых значений ε , что в свою очередь, отражается в падении скорости электромагнитной волны. Вместе с тем вследствие сложности получения распределенных скоростных данных георадарного зондирования, их интерпретация в подавляющем большинстве случаев производится на основе детального анализа волнового поля: амплитудных, частотных и фазовых характеристик электромагнитного сигнала [13].

Основные результаты

На рис.1 представлена радарограмма в стандартной обработке данных георадарного зондирования участка ограждающей дамбы с применением программы RadExplorer. Обработка георадиолокационных данных в общепринятом виде включает в себя удаление постоянной компоненты сигнала, прямой волны, коррекцию амплитуд вследствие расхождения и затухания сигнала, применение специализированных процедур обработки (деконволюция, преобразование Фурье и преобразование Гильберта), что в ряде случаев значительно увеличивает точность определения местоположения зон неоднородностей. Детальный анализ амплитудно-частотных характеристик электромагнитных трасс позволил выявить структурные неоднородности в слагающих дамбу грунтах, а также локализовать уровень грунтовых вод (УГВ). Такого рода интерпретация достаточно субъективна и не позволяет достаточно точно определить, чем вызвано появление этих зон.

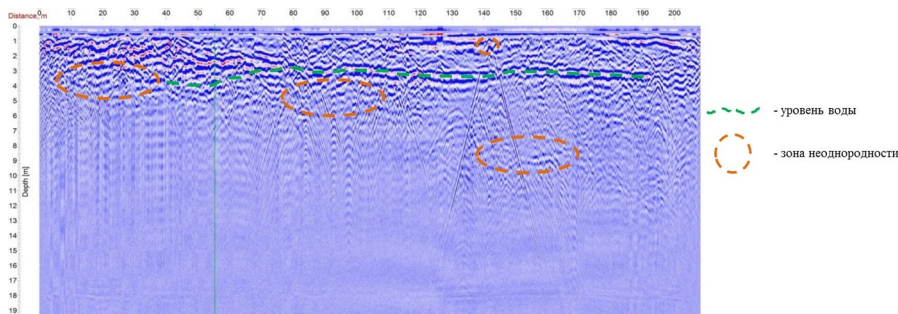


Рисунок 1 - Радарограмма участка ограждающей дамбы
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.56.1>

Применение инновационных технологий обработки данных георадиолокации в программе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, а именно, автоматизированного анализа поля обратного рассеяния (ПОР) электромагнитных волн, позволяет существенно улучшить качественные и количественные показатели результирующих параметров. Технология позволяет производить построение разрезов, как в случае наличия отражающих границ, так и в случае непрерывного изменения электрофизических свойств по профилю наблюдений и по глубине [14].

На рис.2 представлена радарограмма построенная с использованием технологии поля обратного рассеяния (ПОР) программы ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ. Как видно из рисунка, такая обработка данных позволяет детализировать радарограмму, что предоставляет возможность увидеть даже незначительные изменения электрофизических свойств дамбы (изменение скорости прохождения электромагнитной волны и диэлектрической проницаемости грунтов).

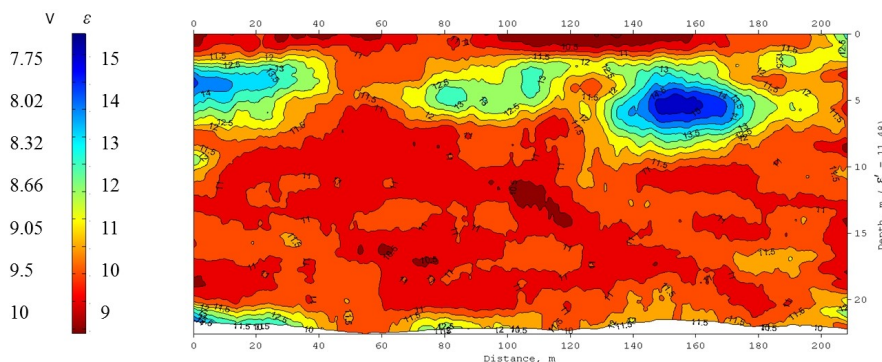


Рисунок 2 - Радарограмма участка ограждающей дамбы
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.56.2>

Интерпретация анализируемых результатов выполненных исследований ограждающей дамбы рис.2, позволяет сделать следующие выводы. Приповерхностная зона грунтов дамбы до отметки 1,5-2м, характеризуется начальной высокой скоростью электромагнитной волны $V=9,2-9,5$ см/нс (плотные сухие грунты), с дальнейшим относительно резким ее понижением локально до $V=8,32-7,75$ см/нс на отметке 2-8м, что обусловлено, скорее всего, ростом увеличения влажности грунтов. Выделяются три водонасыщенные зоны интервалы расстояний 0-25м, 80-110м и 140-170м на глубине 2-7м., которые в целом коррелируют с данными анализа амплитудно-частотных характеристик сигнала рис.1. Структура грунтов находящаяся ниже отметки 8 метров представляет собой плотный массив, без каких либо нарушений. На основе многочисленных натуральных георадарных определений, а также синхронизации с сейсмическим методом, выполненных на опытном участке дамбы хвостохранилища схожего по своей структуре, установлены значения диэлектрической проницаемости ϵ и скорости электромагнитной волны V , которые отражены в таблице 1, категорирование грунтов по водонасыщению георадиолокацией, где I - водонасыщенные грунты, II – грунты увлажненные, плотные, III – грунты плотные, естественной влажности [7], [8]. Таким образом, первые две зоны в интервалах 0-25м, 80-110м отнесены к категории грунтов увлажненных плотных, а зона 140-170м – водонасыщенных. Визуальное обследование показало активный выход воды, который соотносится с выделенной зоной водонасыщения рис.3в.

Таблица 1 - Категорирование грунтов по водонасыщению георадиолокацией

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.56.3>

Категория водонасыщенности грунта	I	II	III
Значения	>13,89	13,88-12	< 11,99

диэлектрической проницаемости, ϵ			
Скорость электромагнитной волны, V см/нс	<8,05	8,06-8,66	8,67>

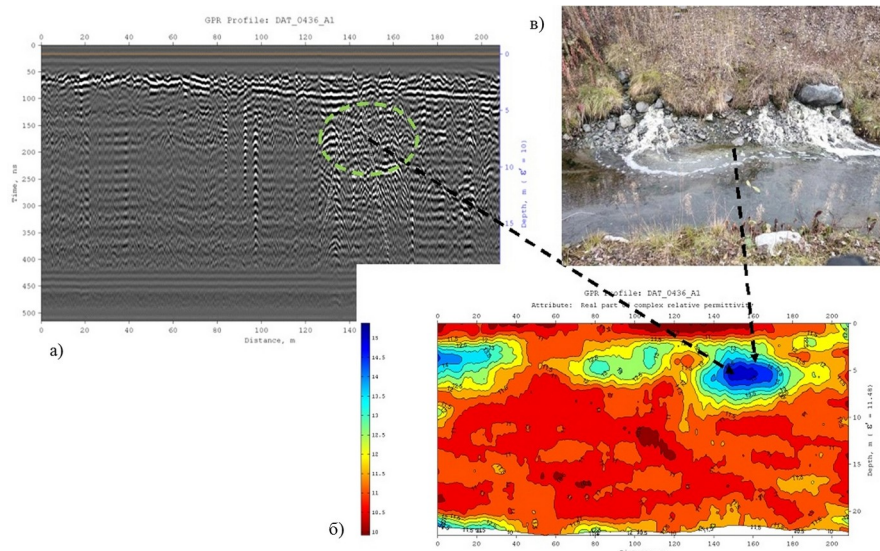


Рисунок 3 - Комплексный анализ данных георадарного зондирования:
 а - амплитудная форма сигнала; б - параметры волнового поля; в- визуальное обследование
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.56.4>

В результате комплексного анализа данных рис.3 основных параметров электромагнитного сигнала (амплитуда, фаза, период), параметров волнового поля (скорость распространения электромагнитных волн) георадарного зондирования и визуального обследования уступов дамбы, установлены параметры обеспечивающие идентификацию водонасыщенных зон данного грунтового гидротехнического сооружения георадиолокацией, которые использовались для дальнейшего анализа и интерпретации всех радарограмм.

Заключение

Анализ волновых картин радарограмм, полученных при проведении исследований подтвердили информативность георадарных определений для выявления наиболее уязвимых участков насыпного грунтового гидротехнического сооружения, а также для обнаружения локализации водонасыщенных зон в грунтах с высокой достоверностью и технологичностью.

На исследуемом участке выявлена зональная фильтрационная неоднородность грунтов и уточнена их структура. Использование методических подходов полученных на объектах такого профиля может успешно применяться для решения такого рода задач.

В результате георадарного исследования ограждающей дамбы на объекте складирования намывных отходов горного производства, установлены параметры обеспечивающие идентификацию водонасыщенных зон с достаточной достоверностью и их количественной и качественной интерпретацией.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Максимов Д.А. Мониторинг локальных нарушений фильтрационных процессов в дамбах хвостохранилищ горнорудных предприятий комплексом геофизических и визуальных методов / Д.А. Максимов, А.Ю. Дьяков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2021. - № 8. - С. 154-163.

2. Максимов Д.А. Механизмы негативного влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости на надежность насыпных гидротехнических сооружений / Д.А. Максимов // Проблемы недропользования. - 2018. - № 2(17). - С. 90-97.
3. Azam S. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years / S. Azam , Q. Li // Geotechnical News. - 2010. - P. 50-53.
4. Мельников Н.Н. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник, Н.А. Калашник и др. // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2017. - Т. 20. - № 1-1. - С. 13-20.
5. Данилкин А.А. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / А.А. Данилкин, А.И. Калашник, Д.В. Запорожец и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 7. - С. 344-351.
6. Дьяков А.Ю. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов / А.Ю. Дьяков, А.И. Калашник. - Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2021. - 110 с.
7. Калашник А.И. Комплексирование георадарного и сейсмического зондирования дамбы хвостохранилища / А.И. Калашник, А.Ю. Дьяков, Н.Н. Абрамов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2018. - № 4. - С. 104-111.
8. Abramov N.N. Identification of water-saturated zones in a protective hydraulic earthen structure by synchronous electromagnetic and seismic sounding / N.N. Abramov, A.Y. D'yakov, A.I. Kalashnik // Power Technology and Engineering. - 2019. - Vol. 53. - № 2. - P. 167-171.
9. Максимов Д.А. Комплексирование визуального и георадарного метода обследования с применением цифровых технологий в целях мониторинга локальных нарушений фильтрационных процессов в теле насыпного ГТС / Д.А. Максимов, А.Ю. Дьяков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2019. - № S37. - С. 409-416.
10. Абрамов Н.Н. Идентификация водонасыщенных зон в ограждающем грунтовом гидротехническом сооружении синхронным электромагнитным и сейсмическим зондированием / Н.Н. Абрамов, А.Ю. Дьяков, А.И. Калашник // Гидротехническое строительство. - 2019. - № 2. - С. 17-21.
11. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. - Москва: Изд-во МГУ, 2005. - 153 с.
12. Владов М.Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений / М.Л. Владов, М.С. Судакова. - Москва: ГЕОС, 2017. - 240 с.
13. Калашник А.И. Информационные технологии в задачах мониторинга гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий подповерхностным георадиолокационным зондированием / А.И. Калашник, А.Ю. Дьяков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017. - № S23. - С. 283-291.
14. Капустин В.В. Применение способов автоматизированного определения диэлектрической проницаемости среды при решении прикладных задач георадиолокации / В.В. Капустин, А.В. Сеницын // Геофизика. - 2014. - № 6. - С. 39-45.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Maksimov D.A. Monitoring lokal'nyh narushenij fil'tracionnyh processov v dambah hvostohranilishh gornorudnyh predpriyatij kompleksom geofizicheskikh i vizual'nyh metodov [Monitoring of Local Filtration Disturbances in Mining Tailings Dams by a Complex of Geophysical and Visual Methods] / D.A. Maksimov, A.Ju. D'jakov // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. - 2021. - № 8. - P. 154-163. [in Russian]
2. Maksimov D.A. Mehanizmy negativnogo vlijaniya lokal'nyh narushenij fil'tracionnoj ustojchivosti na nadezhnost' nasypnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Mechanisms of Negative Impact of Local Filtration Stability Disruptions on the Reliability of Embankment Hydraulic Structures] / D.A. Maksimov // Problemy nedropol'zovaniya [Problems of Subsoil Use]. - 2018. - № 2(17). - P. 90-97. [in Russian]
3. Azam S. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years / S. Azam , Q. Li // Geotechnical News. - 2010. - P. 50-53.
4. Mel'nikov N.N. Primenenie sovremennyh metodov dlja kompleksnyh issledovanij sostojaniya gidrotehnicheskikh sooruzhenij regiona Barenceva morja [Application of Modern Methods for Integrated Studies of the Condition of Hydraulic Structures in the Barents Sea Region] / N.N. Mel'nikov, A.I. Kalashnik, N.A. Kalashnik [et al.] // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of Murmansk State Technical University]. - 2017. - Vol. 20. - № 1-1. - P. 13-20. [in Russian]
5. Danilkin A.A. Monitoring sostojaniya ogradhajushhej damby v zone otrabotki tehnogennoego mestorozhdenija Kovdorskogo GOKa [Monitoring of the Status of the Fencing Dam in the Area of Mining of the Technogenic Field of Kovdorsky MPP] / A.A. Danilkin, A.I. Kalashnik, D.V. Zaporozhec et al. // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. - 2014. - № 7. - P. 344-351. [in Russian]
6. D'jakov A.Ju. Metodicheskie osnovy georadarnyh issledovanij gornotehnicheskikh ob'ektov [Methodological Basis for GPR Investigations of Mining Sites] / A.Ju. D'jakov, A.I. Kalashnik. - Apatity: Kol'skij nauchnyj centr Rossijskoj akademii nauk [Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2021. - 110 p. [in Russian]
7. Kalashnik A.I. Kompleksirovanie georadarnogo i sejsmicheskogo zondirovaniya damby hvostohranilishha [Completion of GPR and Seismic Sensing of the Tailings Dam] / A.I. Kalashnik, A.Ju. D'jakov, N.N. Abramov // Izvestija vysshih uchebnyh

zavedenij. Gornyj zhurnal [Proceedings of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. - 2018. - № 4. - P. 104-111. [in Russian]

8. Abramov N.N. Identification of water-saturated zones in a protective hydraulic earthen structure by synchronous electromagnetic and seismic sounding / N.N. Abramov, A.Y. D'yakov, A.I. Kalashnik // Power Technology and Engineering. - 2019. - Vol. 53. - № 2. - P. 167-171.

9. Maksimov D.A. Kompleksirovanie vizual'nogo i georadarnogo metoda obsledovaniya s primeneniem cifrovyyh tehnologiy v celjah monitoringa lokal'nyh narushenij fil'tracionnyh processov v tele nasybnogo GTS [Combination of Visual and GPR Survey Method Using Digital Technology for Monitoring of Local Filtration Processes Disturbances in the Bulk MPP Body] / D.A. Maksimov, A.Ju. D'jakov // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. - 2019. - № S37. - P. 409-416. [in Russian]

10. Abramov N.N. Identifikacija vodonasyshennyh zon v ograzhdajushhem gruntovom gidrotehnicheskom sooruzhenii sinhronnym jelektromagnitnym i seismicheskim zondirovaniem [Identification of Water-Saturated Zones in the Enclosing Soil Hydraulic Structure by Synchronous Electromagnetic and Seismic Sounding] / N.N. Abramov, A.Ju. D'jakov, A.I. Kalashnik // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]. - 2019. - № 2. - P. 17-21. [in Russian]

11. Vladov M.L. Vvedenie v georadiolokaciju [Introduction to Georadiolocation] / M.L. Vladov, A.V. Starovojtov. - Moscow: MSU Publishing house, 2005. - 153 p. [in Russian]

12. Vladov M.L. Georadiolokacija. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnyh napravlenij [Georadiolocation. From Physical Basics to Promising Directions] / M.L. Vladov, M.S. Sudakova. - Moscow: GEOS, 2017. - 240 p. [in Russian]

13. Kalashnik A.I. Informacionnye tehnologii v zadachah monitoringa gidrotehnicheskikh sooruzhenij gornodobyvajushhih predpriyatij podpoverhnostnym georadiolokacionnym zondirovaniem [Information Technologies in the Tasks of Monitoring of Hydraulic Structures of Mining Enterprises by Subsurface Georadiolocation Sounding] / A.I. Kalashnik, A.Ju. D'jakov // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. - 2017. - № S23. - P. 283-291. [in Russian]

14. Kapustin V.V. Primenenie sposobov avtomatizirovannogo opredelenija dijelektricheskoy pronicaemosti sredy pri reshenii prikladnyh zadach georadiolokacii [Application of Methods of Automated Determination of Environmental Dielectric Permeability in Applied Georadiolocation Problems] / V.V. Kapustin, A.V. Sinicyn // Geofizika [Geophysics]. - 2014. - № 6. - P. 39-45. [in Russian]