

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.125

Радиометрический метод получения портретов влажности почвы для исследования гидрологии дамб

¹Сидоров И.А., ¹Гудков А.Г., ^{1,2}Новичихин Е.П., ¹Чижиков С.В., ³Порохов И.О.

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, <https://bmstu.ru/>
Москва 105005, Российская Федерация

²Институт радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru/>

Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

³ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга, <http://www.cnirti.ru/>

Москва 105066, Российская Федерация

E-mail: igorasidorov@yandex.ru, profgudkov@gmail.com, epnov@mail.ru, chigikov95@mail.ru, ds4@cnirti.ru

Поступила 11.04.2023, рецензирована 18.04.2023, принята 25.04. 2023

Представлена действительным членом РАЕН А.А. Потаповым

Аннотация: Рассматриваются методы мониторинга состояния искусственных гидросооружений с использованием трассовых СВЧ-радиометров, с целью своевременного обнаружения мест подземных протечек для обеспечения безаварийной эксплуатации. Описаны несколько практических примеров использования СВЧ-радиометров на различных наземных подвижных носителях. Приводятся характеристики СВЧ-радиометров, применяемых на практике для гидрологического мониторинга земляных дамб. Показана возможность обнаружения потенциально опасных участков дамб, мест эрозий покрытия дамбы, возможные места подземных протечек. Рассматривается возможность комплексирования СВЧ-радиометров с другими средствами дистанционного зондирования, такими как оптические видеокамеры, тепловые инфракрасные камеры и георадары. Обоснованы преимущества мультисенсорного зондирования для повышения надежности обнаружения мест подземных протечек.

Ключевые слова: СВЧ-радиометры, земляная дамба, дистанционное зондирование, радиояркость температура, реликтовое излучение, беспилотные летательные аппараты, влажность почвы

УДК 681.7.069.32

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-19-00063, <https://rscf.ru/project/22-19-00063>.

Для цитирования: Сидоров И.А., Гудков А.Г., Новичихин Е.П., Чижиков С.В., Порохов И.О. Радиометрический метод получения портретов влажности почвы для исследования гидрологии дамб. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(2):125-132. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.125.

Radiometric method for soil moisture portraits obtaining to study the hydrology of dams

Igor A. Sidorov, Alexander G. Gudkov, Sergey V. Chizhikov

Bauman Moscow State Technical University, <https://bmstu.ru/>
Moscow 105005, Russian Federation

E-mail: igorasidorov@yandex.ru, profgudkov@gmail.com, chigikov95@mail.ru

Evgeny P. Novichikhin

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazinsky Branch, <http://fire.relarn.ru/>
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

E-mail: epnov@mail.ru

Igor O. Porokhov

A.I. Berg Central Scientific-Research Radioengineering Institute, <http://www.cnirti.ru/>

Moscow 105066, Russian Federation

E-mail: ds4@cnirti.ru

Received April 11, 2023, peer-reviewed April 18, 2023, accepted April 25, 2023

Abstract: The methods for the artificial hydraulic structures condition monitoring using trace microwave radiometers are considered, in order to timely detect places of underground leaks to ensure trouble-free operation. Several practical examples of the use of microwave radiometers on various ground-based mobile carriers are described. The characteristics of microwave radiometers used in practice for hydrological monitoring of earthen dams are given. The possibility of detecting potentially dangerous sections of dams, places of erosion of the dam cover, possible places of underground leaks is shown. The possibility of combining microwave radiometers with other means of remote sensing, such as optical video cameras, thermal infrared cameras and georadars, is being considered. The advantages of multisensory sensing to increase the reliability of detecting places of underground leaks are substantiated.

Keywords: microwave radiometers, earth dam, remote sensing, radio brightness temperature, relic radiation, unmanned aerial vehicles, soil moisture

UDC 681.7.069.32

Acknowledgments: The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-19-00063 <https://rscf.ru/project/22-19-00063>.

For citation: Igor A. Sidorov, Alexander G. Gudkov, Evgeny P. Novichikhin, Sergey V. Chizhikov, Igor O. Porokhov. Radiometric method for soil moisture portraits obtaining to study the hydrology of dams. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2023, 15(2):125-132e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.125.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (126)
2. АППАРАТУРА И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ (127)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ДАМБ (129)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (131)

ЛИТЕРАТУРА (131)

1. ВВЕДЕНИЕ

Известны примеры практического использования СВЧ-радиометров для мониторинга гидрологической обстановки вдоль трасс трубопроводов [1], для обнаружения нефтяных пленок на поверхности воды [2], для мониторинга состояния шоссе и дорог [3], для определения координат очагов лесных и торфяных пожаров [4], для определения влагосодержания в продуктивном слое почвы для нужд точного земледелия [5]. Данная статья посвящена актуальной теме СВЧ-радиометрического мониторинга земляных дамб с целью обнаружения мест

подземных протечек, для своевременного принятия мер предотвращения катастрофы [6], на основе многолетнего практического опыта применения СВЧ-радиометров [7-14].

Для защиты низменных территорий в долинах рек и морских побережий от затопления, регулирования стока воды с целью водоснабжения, для сельскохозяйственных и промышленных нужд, по грубой оценке, в мире построены десятки тысяч километров дамб различных типов. Точных статистических данных об общей длине дамб в мире не существует, учтены лишь наиболее крупные объекты, включенные в реестр плотин Международной комиссией по большим плотинам. Безопасная, безаварийная эксплуатация искусственных гидросооружений – чрезвычайно важная задача, поскольку, как правило, прорыв дамбы приводит к катастрофическим последствиям с существенным экономическим ущербом, человеческими жертвами и серьезными

экологическими последствиями для всего региона, подвергнутого затоплению, особенно если в зону затопления попали объекты нефтегазовой инфраструктуры, трубопроводы, объекты добычи, переработки или хранения углеводородных продуктов. На ликвидацию последствий катастрофы могут потребоваться годы...

Наиболее часто встречающейся причиной прорыва дамбы является перелив, который может возникнуть вследствие несоответствия реального водосброса расчетным значениям, засорение водосброса посторонним мусором. Второй по частоте причиной аварий является проседание грунта и неустойчивость склонов плотины. Третьей причиной аварий являются подземные протечки, вызывающие внутреннюю эрозию тела плотины, образование пустот с последующим проседанием или подвижкой грунта.

Следовательно, своевременное выявление мест подземных протечек в земляных дамбах с последующим их устранением позволяет предотвращать возможные аварии и катастрофы.

В Королевстве Нидерланды примерно половина территории страны отвоевана у моря и располагается ниже уровня моря. Береговая линия сформирована наносными дюнами. За ними располагаются отвоёванные у моря земли, называемые польдерами и защищённые дюнами и искусственными дамбами от морских вод. Общая протяженность защитных дамб превышает три тысячи километров. В Нидерландах располагается и самая длинная дамба Европы – Афслейтдейк, длиной тридцать километров. Проблема защиты от наводнений и регулировки водного баланса особенно актуальна в Нидерландах, где организован специальный департамент по защите от наводнений — Ватерсхап, который организует постоянный мониторинг искусственных гидросооружений с привлечением самых современных методов

дистанционного зондирования, в том числе и метод СВЧ-радиометрии.

Цель настоящей работы – показать результаты практического использования СВЧ-радиометров для мониторинга состояния земляных дамб, возможности поиска мест подземных протечек, выявления мест с нарушением защитных покрытий дамб и выявление мест эрозии дамбы под защитным слоем, с использованием различных средств транспортировки радиометров – беспилотных летательных аппаратов, специальных машин, квадроцикла и ручной тележки.

2. АППАРАТУРА И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

СВЧ-радиометры, предназначенные для дистанционного зондирования, могут размещаться на различных платформах – космических, авиационных и наземных. Радиометры размещенные на космических спутниках, например, известная радиометрическая система MIRAS разработки Европейского космического агентства, работающая в *L*-диапазоне с пассивным синтезом апертуры, предназначенная для измерения влажности почвы и солености океанской воды, лучшая в своем классе по многим параметрам, совершенно не применима для обнаружения протечек в земляных дамбах, поскольку система обеспечивает размер разрешаемого элемента более 35 километров, что превышает длину самой протяженной европейской дамбы [7]. Ранее проводились эксперименты по обнаружению мест протечек в земляных дамбах при помощи сканирующего радиометра, размещенного на борту самолета, с высоты 300 метров [1]. Разрешаемый элемент составлял примерно 20 метров. Такого разрешения явно недостаточно для точного определения координат места протечки. Приемлемую разрешающую способность, порядка полуметра, могут обеспечить трассовые радиометрические системы, размещенные на предельно малых

высотах, так как разрешающая способность трассовых радиометров без синтеза апертуры антенны определяется шириной главного луча диаграммы направленности антенны, которая приблизительно равна отношению длины волны к величине апертуры. Обычно величина апертуры таких антенн не превышает 1-2 длин волн, что для L -диапазона (длина волны 21 см) составит примерно половину метра. Этот характерный размер и определяет минимальные габариты радиометра. Радиометры с такими габаритами могут иметь массу от двух до двадцати килограмм и могут быть легко размещены на беспилотном летательном аппарате, специальной дорожной машине, квадроцикле, либо перемещается на тележке. Использование БПЛА в качестве носителя СВЧ-радиометра (Рис. 1) имеет то преимущество, что для съемки становится доступным практически любой участок дамбы, когда перемещение по земле затруднено. К недостаткам данного способа перемещения является пониженная разрешающая способность или детальность обзора. Разрешающая способность СВЧ-радиометра равна высоте размещения радиометра над поверхностью земли. При полете БПЛА над дамбой для обеспечения безопасности полета высота должна быть не менее 10 метров, соответственно и разрешаемый элемент будет иметь размер порядка 10 на 10 метров. Этого достаточно для обнаружения



Рис. 1. Размещение радиометра на БПЛА.



Рис. 2. Зондирование дамбы при помощи автокрана.

мест подземных протечек, но совершенно недостаточно для точного выявления мест эрозии покрытия дамб. При перемещении радиометра при помощи автокрана (Рис. 2) разрешающая способность составит от 1 до 2 метров в зависимости от настройки стрелы крана, но эта величина может существенно изменяться из-за неровностей дорожного покрытия. Кроме того, громоздкий кран может пройти не везде. Размещение радиометра на квадроцикле существенно повышает проходимость, но разрешающая способность при этом стабильна и составляет 1 метр – высота установки радиометра (Рис. 3). Но квадроцикл также не всегда может перемещаться по всей поверхности дамбы. Для труднодоступных мест применяется перемещение радиометра на тележке (Рис. 4) или переноска на руках

Основные параметры радиометра представлены в Таблице 1.



Рис. 3. Система из двух радиометров на квадроцикле.



Рис. 4. Перемещение радиометра на тележке.

Метод обнаружения протечек в дамбах основан на том, что СВЧ-радиометр способен принимать и измерять мощность собственного радиотеплового излучения, возникшего под землей в глубине, прошедшего через толщу породы и излученного в открытое пространство. Одновременно с излучением дамбы радиометр принимает и часть отраженного от поверхности земли реликтового излучения небесной сферы с добавкой собственного излучения атмосферы. Излучение может приниматься одновременно на одной или на разных длинах волн (диапазонах частот) и на двух поляризациях волны – вертикальной и горизонтальной. Глубина зондирования определяется выбранной длиной волны, влажностью и минерализацией почвы, и

обычно лежит в диапазоне от одной до пяти длин волн. Для зондирования дамб удобно использовать L -диапазон (длина волны 21 см.), так как при этом обеспечивается достаточная глубина зондирования и в этом диапазоне есть полоса частот (от 1400 до 1427 МГц.), специально выделенная для работы радиоастрономов и пассивных локаторов.

По измеренным значениям радиоярких температур на вертикальной $T_{\text{яв}}$ и горизонтальной $T_{\text{яг}}$ вычисляется индекс поляризации I_p по формуле:

$$I_p = (T_{\text{яв}} - T_{\text{яг}}) / (T_{\text{яв}} + T_{\text{яг}}).$$

Значение индекса поляризации слабо зависит от температуры слоя почвы и в основном определяется значением диэлектрической проницаемости почвы, которая зависит от влагосодержания. Зависимость индекса поляризации от влажности почвы различна при различных условиях и зависит от материала и толщины покрытия дамбы, материала насыпи, наличия растительного покрова и др. Для точного определения радиационно-влажностной зависимости требуется специальная калибровка радиометрической системы, применительно к конкретным условиям.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ДАМБ

Система из двух радиометров, совмещенных с приемником спутниковой навигационной системы, была использована для изучения асфальтового покрытия на дамбе Лауверс-Мер (Нидерланды). Система измеряет интенсивность собственного радиотеплового излучения подстилающей поверхности одновременно на двух поляризациях в L -диапазоне, и запоминает ее цифровые отсчеты вместе с навигационной информацией. Измеренные системой радиояркие температуры особенно чувствительны к изменениям материала покрытия дамбы и влажности почвы (диэлектрическим свойствам). Например, диэлектрическая проницаемость

Таблица 1

Параметры радиометра

Параметр	Значение
Центральная частота приемного модуля, МГц	1412±30
Ширина полосы приема, МГц	50 ±20
Количество приемных каналов	1
Способ обзора	трассовый
Ширина обзора, Н - высота над землей	1.0xH
Чувствительность, К	0.5
Тип регистратора	SD-Card
Время непрерывной записи, час, не менее	8
Напряжение питания, В	12
Потребляемая мощность, Вт, не более	6
Масса, кг	8.5
Габаритные размеры, мм	500X400X80

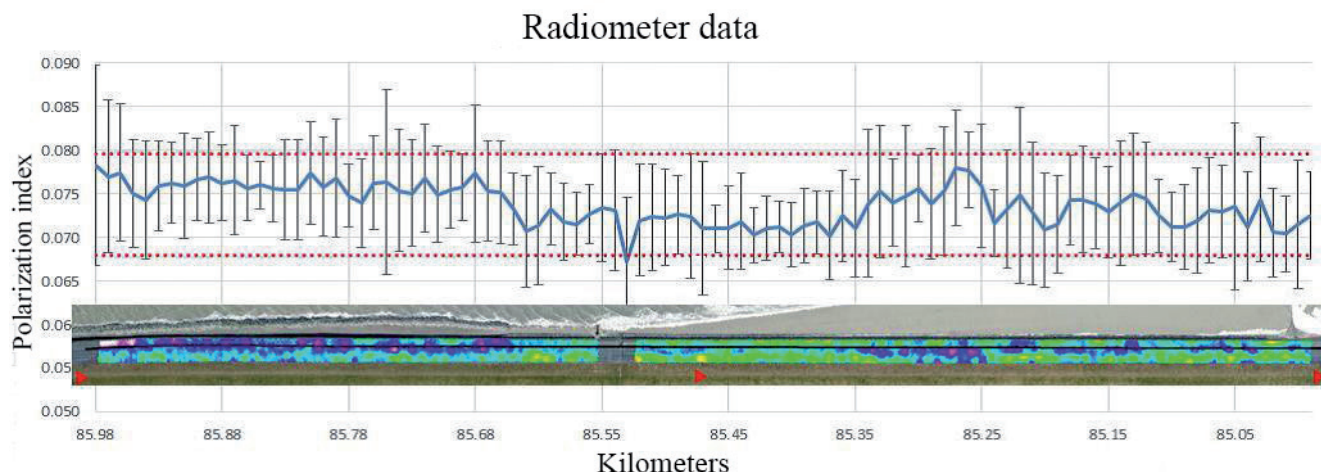


Рис. 5. Результаты исследования километрового участка дамбы.

воды равна 80, асфальта – около 5, воздуха – 1. Измеряя радиояркие температуры одновременно в двух поляризациях, определяется индекс поляризации, как показатель структуры асфальта. График зависимости индекса поляризации от продольной координаты, полученный в ходе натурного эксперимента на дамбе Лауверс-Мер, представлен на **Рис. 5**. На том же графике показан фрагмент построенной по этим данным карты влагосодержания почвы вдоль траектории движения носителя. На карте зеленым цветом показаны участки дамбы с нормальным увлажнением, синим цветом – участки с повышенным увлажнением и фиолетовым места с критическим переувлажнением. Такие места регистрировались, фотографировались и в них брались пробы (шурфы) асфальтового покрытия с целью выявления причин переувлажнения. Фотографии критических мест и проб асфальта представлены на **Рис. 6**. В ходе лабораторного исследования проб было выявлено, что первая проба содержит внутренние пустоты, а вторая места с рыхлой структурой асфальта. И том и в другом случае покрытие неспособно эффективно защищать дамбу от внешних метеорологических факторов и требует ремонта. В ходе эксперимента вместе с радиометрической съемкой производилась фото и видео съемка для документирования результатов, а также съемка тепловой

инфракрасной камерой, данные которой хорошо коррелируются с данными радиометров и дополняют их более точной информацией о температуре поверхности дамбы.

Наличие мест с поврежденным асфальтным покрытием дамбы со временем может привести к эрозии тела дамбы, подземным протечкам, вымыванию грунта и, как следствие, к образованию пустот, которые могут вызвать подвижку грунта или частичное обрушение с катастрофическими последствиями. СВЧ-радиометры, которые способны обнаруживать воду в глубине дамбы, совершенно не чувствительны к

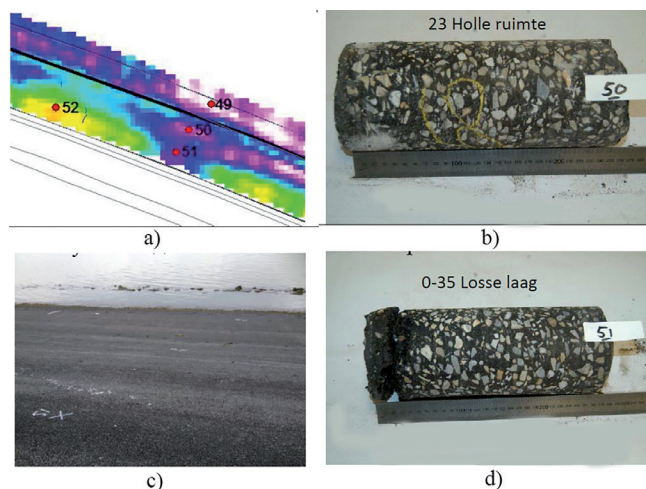


Рис. 6. Карта участка дамбы с фото проб покрытия в критических точках. а) карта влажности дамбы; б) фото керна в точке 50 – пустоты; в) фото участка дамбы; д) фото керна в точке 51 – рыхлая структура.

подземным пустотам. Но для обнаружения подземных пустот с успехом могут применяться георадары. Георадар – это специализированный активный радиолокатор, предназначенный для зондирования подземных объектов. Принцип его действия основан на генерировании и излучении в землю через передающую антенну электромагнитного импульса и приеме отраженного от различных подземных неоднородностей сигналов. Отраженные импульсы принимаются приемной антенной с некоторой задержкой, зависящей от удаленности неоднородности от антенны. Полное отсутствие отраженных сигналов в каком-либо диапазоне дальностей означает наличие пустоты в этом диапазоне.

Таким образом, совместное использование нескольких типов датчиков – СВЧ-радиометров, оптических камер, инфракрасных камер и георадара дает достаточно данных для комплексного обследования состояния дамб с выработкой рекомендаций для проведения мероприятий обеспечивающих долговечную и безаварийную эксплуатацию.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- метод СВЧ-радиометрического зондирования может с успехом применяться для мониторинга состояния дамб, поиска мест подземных протечек и эрозии покрытия;
- в качестве носителя радиометра могут использоваться беспилотный летательный аппарат, автокран, квадроцикл или тележка;
- мультисенсорное зондирование с использованием кроме СВЧ-радиометра оптической видеокамеры, тепловой инфракрасной камеры и георадара повышает вероятность обнаружения мест подземных протечек, эрозии покрытия и наличие подземных пустот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров ИА, Гудков АГ, Систер ВГ, Иванникова ЕМ, Леушин ВЮ. Мониторинг гидрологической обстановки вдоль трасс трубопроводов методами микроволновой радиометрии. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2020, 11:34-36.
2. Гудков АГ, Систер ВГ, Иванникова ЕМ, Леушин ВЮ, Плющев ВА, Сидоров ИА, Четыркин ДЮ. О возможности обнаружения нефтяных пленок на поверхности воды методами СВЧ-радиометрии. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2019, 1:34-36; doi: 10.1007/s10556-019-00580-2.
3. Сидоров ИА, Солдатенко АП, Гудков АГ, Леушин ВЮ, Новичихин ЕП. Результаты натурных экспериментов по мониторингу гидрологической обстановки вдоль автомобильных дорог многочастотной поляриметрической системой СВЧ-радиометров. *Машиностроитель*, 2015, 12:46-55.
4. Систер ВГ, Иванникова ЕМ, Гудков АГ, Леушин ВЮ, Сидоров ИА, Плющев ВА, Солдатенко АП. Определение очагов лесных и торфяных пожаров с помощью СВЧ-радиометрического зондирования. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2016, 2:32-33.
5. Верба ВС, Гуляев ЮВ, Шутко АМ, Плющев ВА, Сидоров ИА, Никитов СА и др. (всего 45 авторов). *СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике*. София, Акад. изд-во им. проф. Марина Дринова, 2013, 296 с. ISBN 978-954-322-708-2.
6. Jeu RDe, Parinussa R, Biemond L, Haarbrink R, Shutko A, Demontoux F, Provoost Y. Safety inspection of levees with L-band radiometry. *Proc. 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, MicroRad-2010, IEEE Catalog Number: CFP1092D-PRT*, p. 96-98. Washington, DS, USA, 2010. DOI: 10.1109/MicroRad16079.2010.

7. Яценко АС, Бобров ПП. Особенности обработки данных SMOS Level 1C в задачах дистанционного зондирования. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017, 14(3):78-91. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-78-91.
8. Shutko A, Abramov V, Haldin A, Novichikhin E, Krapivin V, Golovachev S, Pliushchev V, Sidorov I, Biriukov E, Haarbrink R, Archer F, Hristov P, Gavrilov E. Sea surface and land-sea contact zones sensing at passive microwaves and in optical band. *ECOLOGICA* (Belgrad), 2009, 55:345-349.
9. Shutko AM, Krapivin VF, Haarbrink RB, Sidorov IA, Novichikhin EP, Archer F, Krissilov AD. *Practical Microwave Radiometric Risk Assessment*. Sofia, Prof. Marin Drinov Publ. House, Bulg. Academy of Sciences, 1910, 100 pp.
10. Archer, F, Shutko A, Coleman TL, Haldin A, Sidorov I, Novichikhin E. Microwave Remote Sensing of Land Surface from Mobile Platform: The Alabama 2003-2005 Experiment. Abstract. To be presented at "The Int 7IEEE 2006 Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS'06)", Denver, CO, USA, 31 July- 04 August, 2006.
11. Sidorov IA, Gudkov AG, Leushin VYu, Gorlacheva EN, Novichikhin EP, Agasieva SV. Measurement and 3D Visualization of the Human Internal Heat Field by Means of Microwave Radiometry. *Sensors*, 2021, 21(12):4005; doi: 10.3390/s21124005.
12. Vesnin SG, Sedankin MK, Ovchinnikov LM, Gudkov AG, Leushin VYu, Sidorov IA, Goryanin II. Portable microwave radiometer for wearable devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 318:112506; doi: 10.1016/j.sna.2020.112506.
13. Gudkov AG, Agasieva SV, Sidorov IA, Khokhlov NF, Chernikov AS, Vagapov Yu. A portable microwave radiometer for proximal measurement of soil permittivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198:107076. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107076.
14. Shutko AM, Haldin A, Krapivin V, Novichikhin E, Sidorov I, Tishchenko Y, Haarbrink R, Georgiev G, Kancheva R, Nikolov H, Coleman T, Archer F, Pampaloni P, Paloscia S, Krissilov A, Carmona A. Microwave radiometry in monitoring and emergency mapping of water seepage and dangerously high ground waters. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2007, 1:76-82. Available from: https://www.researchgate.net/publication/228698604_Microwave_radiometry_in_monitoring_and_emergency_mapping_of_water_seepage_and_dangerously_high_groundwaters#fullTextFileContent.

Сидоров Игорь Александрович

к.т.н., доцент

Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана
5, ул. 2-я Бауманская, Москва 105005, Россия
igorasidorov@yandex.ru

Гудков Александр Григорьевич

д.т.н., профессор

Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана
Москва 105005, Россия
profgudkov@gmail.com

Новичихин Евгений Павлович

к.ф.-м.н., с.н.с.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
Фрязино 141190, Моск.обл., Россия
ernov@mail.ru

Чижиков Сергей Владимирович

аспирант

Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана
Москва 105005, Россия
chigikov95@mail.ru

Порохов Игорь Олегович

к.т.н.

ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга
Москва 107078, Россия
ds4@cnirti.ru.