

Научная статья  
УДК 550.837.76; 537.86  
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202405-14>

# Георадар для глубинных геологических исследований, основные направления применения

А.И. Беркут<sup>1</sup>, П.А. Морозов<sup>2</sup>, А.В. Попов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Компания ВНИИСМИ» (Москва, Россия)

<sup>2,3</sup> Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (Москва, г. Троицк, Россия)

<sup>1</sup> lozaberk@yandex.ru, <sup>2</sup> pmoroz5@yandex.ru, <sup>3</sup> popov@izmiran.ru

## Аннотация

**Постановка проблемы.** Глубинный георадар позволяет оперативно, ненарушающим способом, исследовать диапазон глубин характерный для развития опасных геологических процессов. За счет повышенной мощности зондирующего импульса такой георадар дает возможность получать непрерывную информацию о состоянии геологической среды на большую глубину – до нескольких сотен метров, с шагом от десятка сантиметров.

**Цель.** Обзор методов и результатов георадарного зондирования в задачах геологоразведки и инженерной геологии.

**Результаты.** Приводятся наиболее востребованные направления применения глубинного георадара на основе 25-летнего опыта геофизических изысканий. Приведены примеры интерпретации экспериментальных данных: обнаружение характерных геологических структур и оценка параметров среды на основе теоретических модельных расчетов.

**Практическая значимость.** Авторами накоплен большой опыт георадарных исследований для нужд геологоразведки и инженерной геологии.

## Ключевые слова

Глубинный георадар, импульсное электромагнитное зондирование, обратная задача, радиообраз, рудоконтролирующие структуры

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-12-00083 «Глубинный георадар: теория, методы, эксперимент».**

## Для цитирования

Беркут А.И., Морозов П.А., Попов А.В. Георадар для глубинных геологических исследований, основные направления применения // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-14>

A brief version in English is given at the end of the article

## Введение

Георадарное зондирование – новое, быстро развивающееся направление геофизических исследований. Глубинный георадар повышенной мощности «Лоза» [1] – импульсный электромагнитный радиолокатор подповерхностного зондирования. С его помощью можно ненарушающим способом исследовать геологическую структуру земной поверхности на глубины до десятков и сотен метров. В георадарах «Лоза» реализован ряд конструктивных и методических принципов, которые делают возможным зондирование на рекордные глубины – в том числе, в низкоомных средах, сильно поглощающих электромагнитные волны [1, 2]:

1. Георадары «Лоза» оснащены передатчиками, основанными на высоковольтных разрядниках. Прибор комплектуется передатчиком с импульсным напряжением 5, 10, 21 кВ.

2. Для достижения больших глубин зондирования в георадарах «Лоза» максимум энергии зондирующего сигнала сдвинут на более низкие частоты в пределах полосы частот приемника георадара 1–50 МГц.

3. Для получения аперидического (нерезонансного) импульса георадар снабжен низкочастотными антеннами длиной 3, 6, 10 и 15 м с характерной частотой 50, 25, 15 и 10 МГц. Для подавления резонансных эффектов в передающую и приемную антенну включена распределенная резистивная нагрузка.

4. В георадаре «Лоза» использован аппаратно-программный алгоритм, реализующий функцию оцифровки регистрируемого сигнала с динамическим диапазоном до 120 дБ.

5. Для достижения рекордных результатов по глубине зондирования в этих приборах используется и эффект фокусировки излучения в сторону более «диэлектрически плотной» среды. При размещении антенн георадара на границе раздела двух сред формируется асимметричная диаграмма направленности, ориентированная в сторону среды с большей диэлектрической проницаемостью [1]. Глубинные георадары «Лоза» прошли национальную сертификацию и европейскую сертификацию на соответствие требованиям технических регламентов ЕАЭС и директивам по электромагнитной совместимости и безопасности ЕС/EU.

Ц е л ь р а б о т ы – краткий обзор методов анализа и интерпретации радарограмм импульсного подповерхностного зондирования на примерах применения георадара в геологоразведке и инженерной геологии.

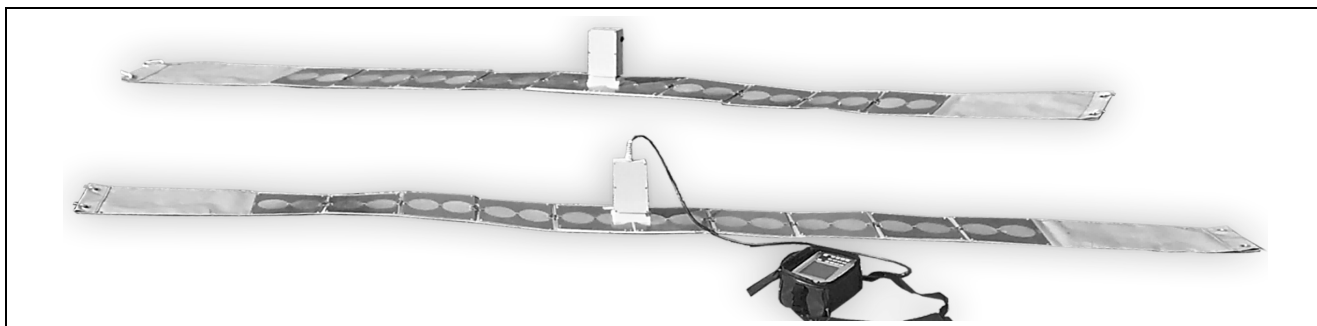


Рис. 1. Георадар «Лоза-Н» (передающая и приемная антенна с блоком регистрации)  
Fig. 1. GPR «Loza-N» (transmitting and receiving antenna with registration unit)

### Методы анализа и интерпретации

Принципы георадиолокации не позволяют определить тип конкретного полезного ископаемого или горной породы. В то же время, георадарное обследование позволяет получить не менее важную информацию – границы и структуру горных пород. Основным методический принцип интерпретации георадарных данных состоит в выделении характерных структур в исследуемой геологической среде:

применение георадара в геологоразведке основано на анализе рудоконтролирующих структур, характерных для определенного вида полезных ископаемых. Наиболее известные рудоконтролирующие структуры: грабены, горсты, тектонические разломы, дайки, кварцевые жилы, кимберлитовые трубки, элементы палеорельефа (палеодолины и палеоруслу) и т.п. [3];

применение георадара в инженерной геологии базируется на анализе специфических структур и образований: провалы, подземные пустоты, зоны разуплотнения и обводнения, карсты, суффозионные воронки, структуры оползневых процессов (оползневые блоки, плоскости скольжения, зоны отрыва, заколы) [4].

Дополнительную информацию для уточнения интерпретации результатам георадарного зондирования удастся получить с помощью приближенных методов решения обратной задачи и оценки электрических параметров среды [1, 5].

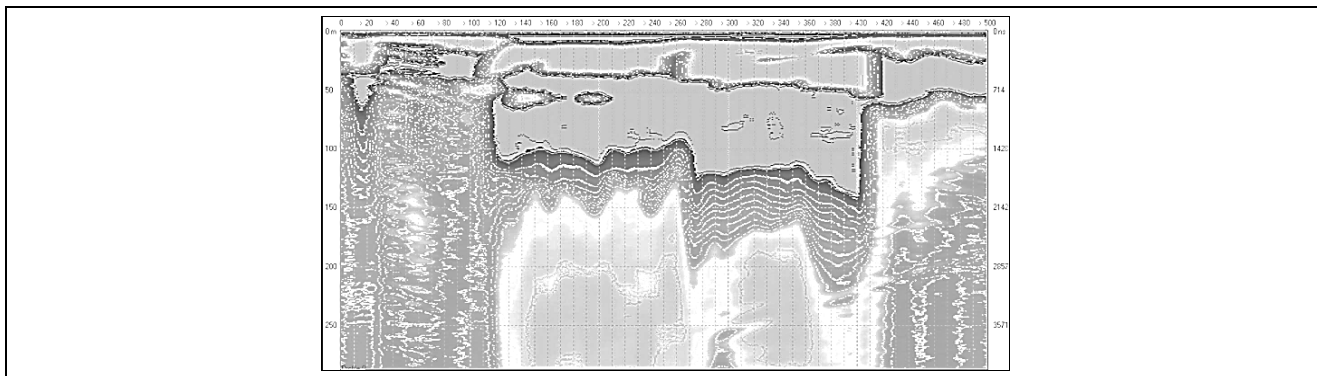
### Примеры применения глубинного георадара

Опыт 25-летнего применения георадара для геофизических исследований позволяет выделить направления, в которых преимущества подповерхностного зондирования наиболее востребованы. В первую очередь, это высокая информативность, автономность, глубинность и ненарушающий принцип исследования [1, 2].

В последние 10 лет отмечается повышение интереса предприятий, занимающихся добычей полезных ископаемых, к использованию георадара для разведки новых месторождений. Его применение позволяет существенно снизить объемы разведочного бурения и использовать бурение только для заверки георадарных результатов и определения содержания полезного ископаемого. Ниже приводится ряд примеров успешного применения георадара «Лоза» в геологических исследованиях. Эти глубинные геора-

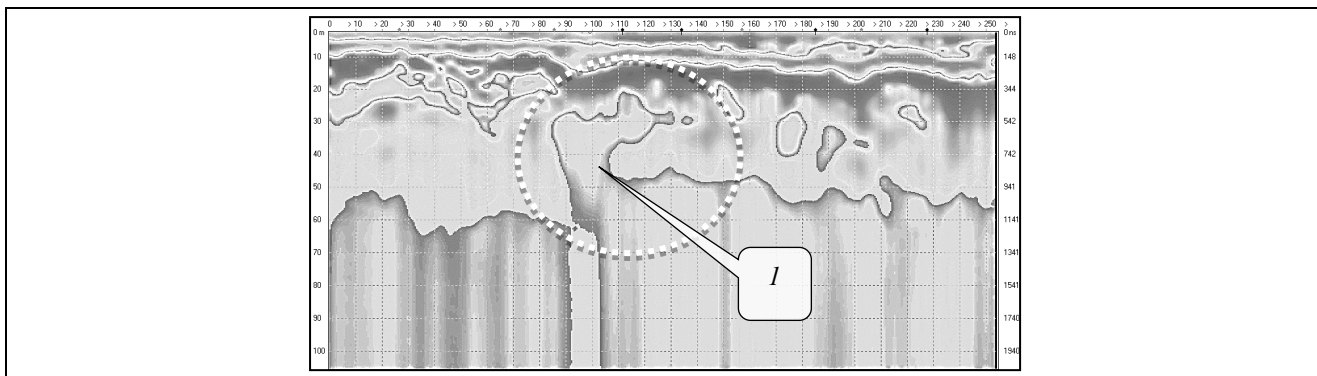
дарные разрезы выполнены сотрудниками ООО «Компания ВНИИСМИ» и их коллегами из развивающихся стран при методическом руководстве радиофизиков ИЗМИРАН.

Месторождения многих полезных ископаемых примыкают к контактным зонам, возникшим при тектонических процессах. На рис. 2 представлена радарограмма разведанного крупного тектонического провала.



**Рис. 2.** Тектонический блоковый провал, грабен, (Иран). Разведываемое полезное ископаемое связано с зонами тектонических разломов  
**Fig. 2.** Tectonic block failure, graben, (Iran). The explored mineral is related with the zones of tectonic faults

Разведка интрузивных рудных тел затруднена отсутствием заметных признаков на поверхности грунта. Характерный пример, когда неоднородность проявляется на глубинах в десятки метров, приведен на рис. 3. По георадарным данным, заверочная скважина была размещена точно в центре рудного тела и показала высокое содержание марганца.



**Рис. 3.** Интрузивное рудное тело (Индия). Полезное ископаемое (марганец), связано с зонами интрузии (1)  
**Fig. 3.** Intrusive ore body (India). The mineral (manganese) is related with the intrusion zones (1)

Элементы палеорельефа представляют собой важный поисковый признак аллювиальных месторождений полезных ископаемых. Рудные тела, оказавшиеся близко к поверхности, разрушаются и выносятся поверхностным стоком по руслам рек и ручьев. При замедлении потока, начинается осаждение и накопление материала с содержанием полезного ископаемого в самых глубоких частях палеорельефа. К таким структурам могут быть привязаны аллювиальные месторождения янтаря, алмазов, урана и золота. Так на рис. 4 георадар выявляет погребенное палеорусло (1), содержащее рассыпное золото.

Месторождения рудного золота часто привязаны к интрузивным геологическим структурам или кварцевым жилам. Вертикальная интрузивная структура «дайка» (рис. 5) обычно перекрыта поверхностным горизонтом, маскирующим поисковые признаки и затрудняющим разведку традиционными методами.

Кварцевые жилы являются надежным признаком, контролирующим месторождения рудного золота. На георадарных сечениях отражены примеры кварцевых жил, зарегистрированных в Саянах на Владимирском месторождении (рис. 6). На радарограмме кварцевая жила выглядит как разрез протяженной наклонной плоскости, контрастной по диэлектрической проницаемости (рис. 6 (1)).

Месторождения алмазов привязаны к геологическим образованиям типа «кимберлитовых трубок». Разведка таких объектов методами электроразведки затруднена, так как кимберлитовые глины мало контрастны к вмещающим породам. Разведка осложнена еще тем, что трубка перекрыта более поздними отложениями мощностью 40–60 м. Глубинный георадар открывает возможность ее визуализации (рис. 7).

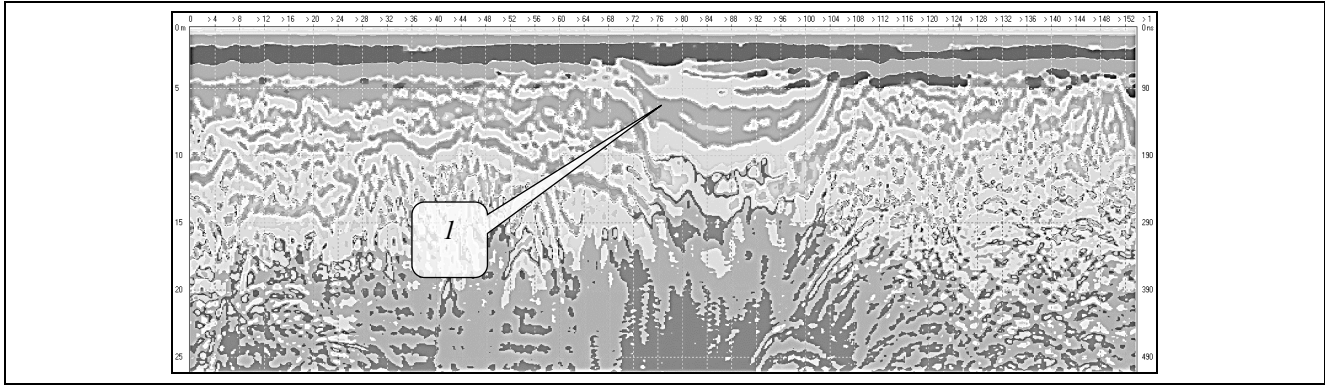


Рис. 4. Погребенное палеорусло (I). Полезное ископаемое - рассыпное золото (Магадан)  
Fig. 4. A buried river bed (I). Mineral placer gold (Magadan)

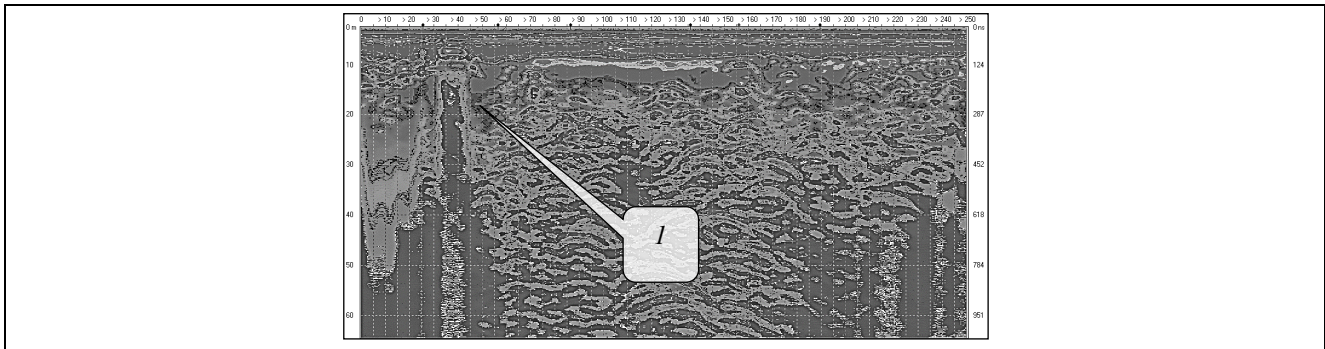


Рис. 5. Диоритовая дайка (I), золото (Казakhstan)  
Fig. 5. Diorite dyke, gold (Kazakhstan)

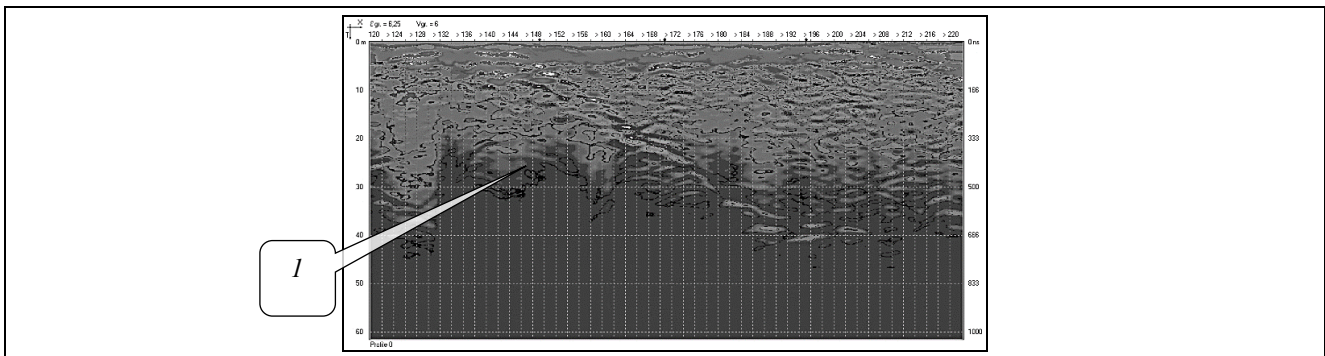


Рис. 6. Кварцевая жила (I), золото (Саяны)  
Fig. 6. Quartz vein, gold (Sayan)

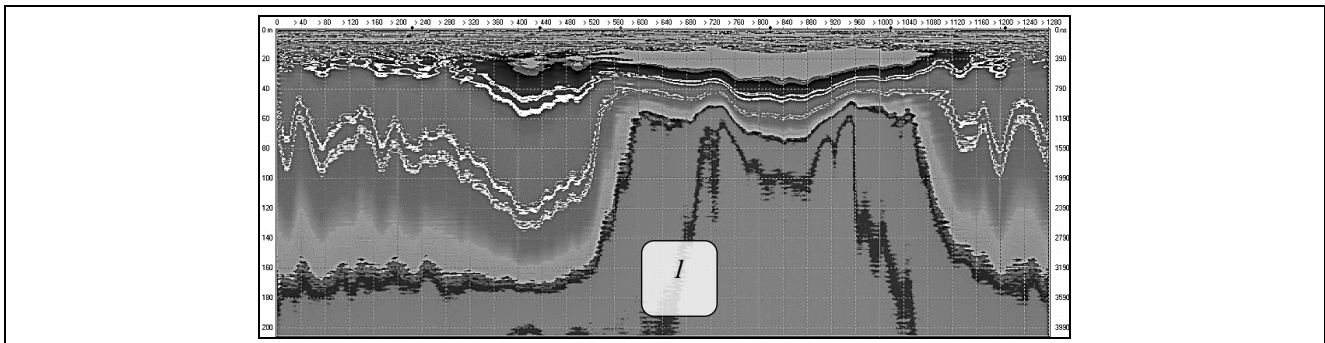


Рис. 7. Кимберлитовая трубка (I), (Австралия)  
Fig. 7. Kimberlite pipe (Australia)

Георадарное зондирование востребовано в инженерной геологии при обследовании опасных геологических структур: подземных пустот, тектонических нарушений, разломов, просадок, провалов, оползней, карстов [3, 4]. На рис. 8 представлен рекордный результат по глубине обнаружения подземного объекта (штольня в массиве мрамора) на глубине порядка ста метров. Зондирование выполнено в благоприятных условиях высокоомной среды (мрамор) с низким поглощением радиоволн.

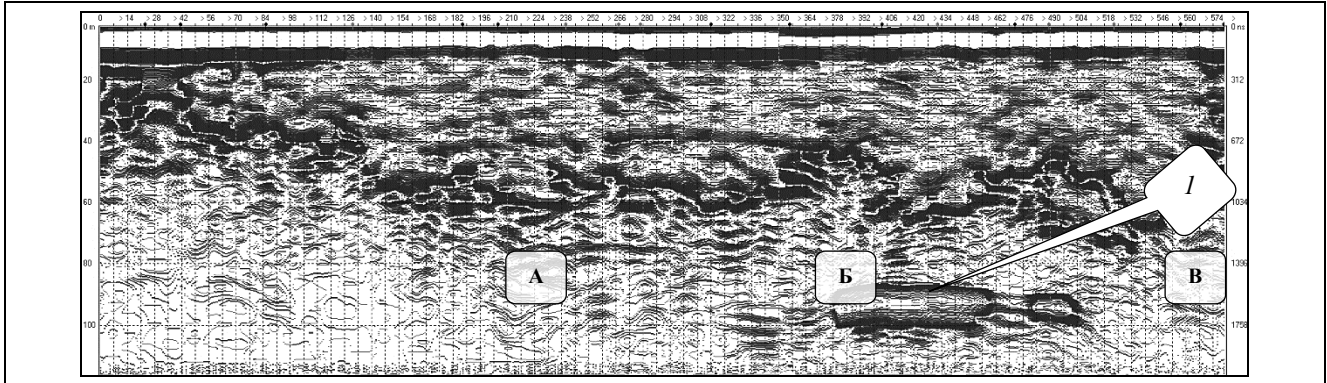


Рис. 8. Выработка на глубине 90 м (I). (Аристон, Греция)  
 Fig. 8. Mining at a depth of 90 m (I). (Ariston, Greece)

Возможность разведки карстовых образований в разных стадиях развития с применением георадара очень важна. Карсты в ранних стадиях развития (рис. 9, а) не имеют признаков на поверхности и на глубине до 30–40 м. Обнаружение их с помощью традиционных методов исследований невозможно.

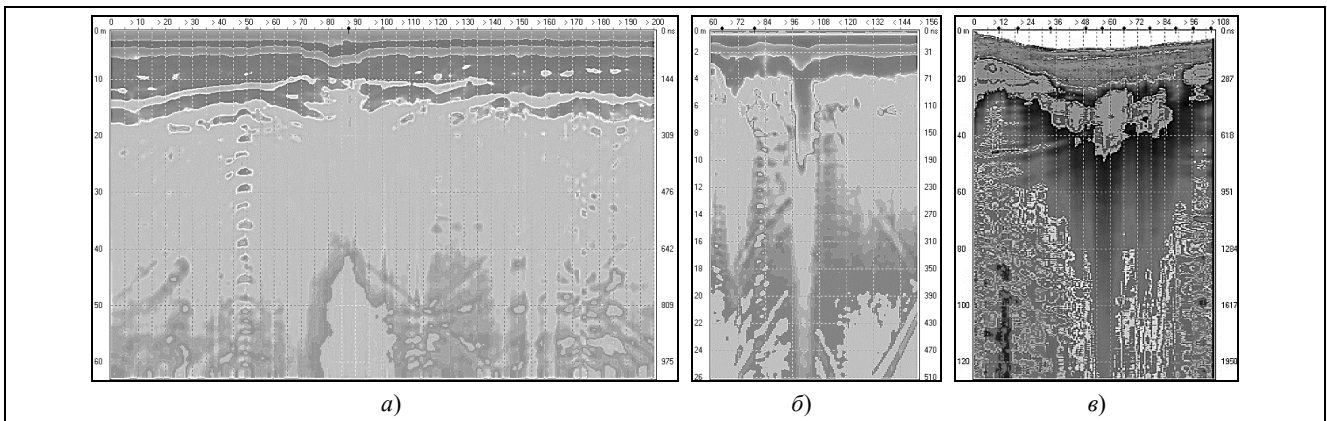
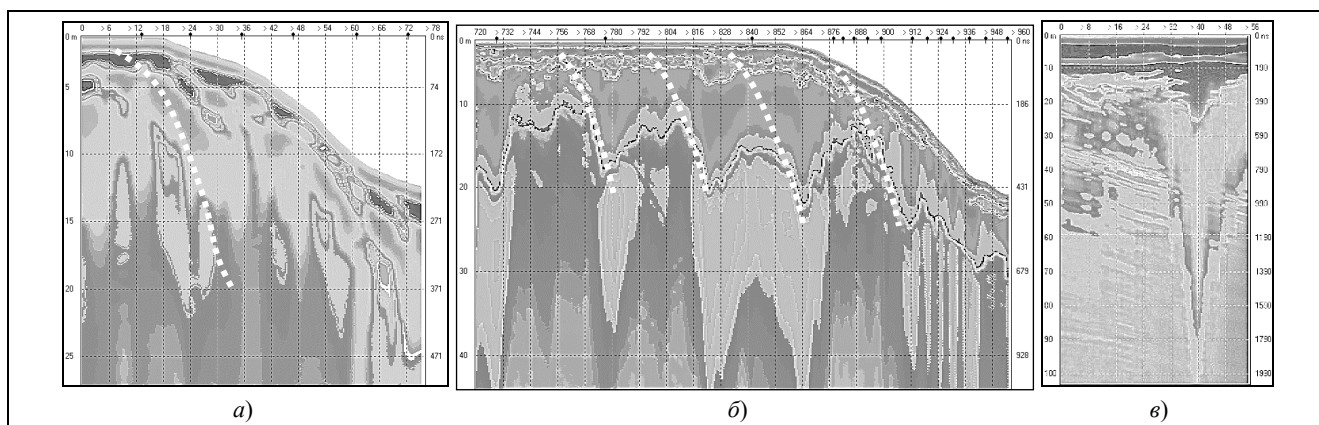


Рис. 9. Карст в трех стадиях развития: а – ранняя стадия, Дзержинск; б – средняя стадия, Башкирия; в – старый, стабилизировавшийся карст, Тульская область  
 Fig. 9. Karst in three stages of development: a – early stage, Dzerzhinsk; b – middle stage, Bashkiria; c – old, stabilized karst, Tula region

Разведка оползней и оползневых структур очень важна в инженерной геофизике, особенно при предпроектных изысканиях в потенциально опасных оползневых районах. Оползневые структуры могут находиться длительное время в стабильном состоянии и изменения в условиях (нагрузка склона, изменение поверхностного стока, изменения гидро-геологического режима) могут привести к лавинообразному катастрофическому развитию.

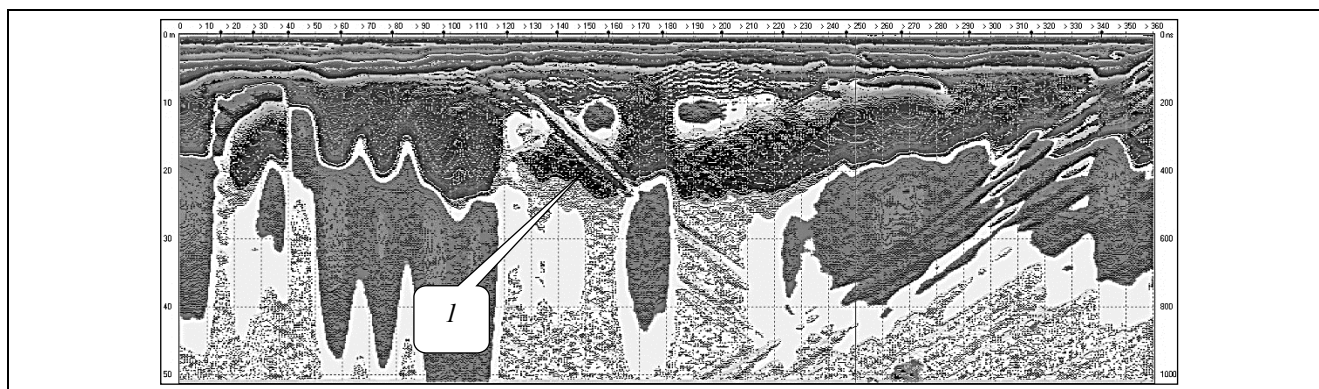
Проблема мониторинга дамб водохранилищ, шламоохранилищ, промышленных и противопоаводковых сооружений особенно остро обозначилась в последние годы. Георадар позволяет ненарушающим способом оперативно обнаруживать зоны боковой фильтрации или фильтрации в примыканиях насыпи (рис. 11).

На рис. 12 представлены примеры обследования курганного могильника Кок-Жар, Республика Кыргызстан в ходе Тянь-шаньской экспедиции Государственного Эрмитажа и Института истории и культурного наследия НАН РК. Эти примеры позволяют оценить чувствительность и пространственное разрешение метода. Результаты таких исследований позволяют существенно повысить эффективность работы археологов.



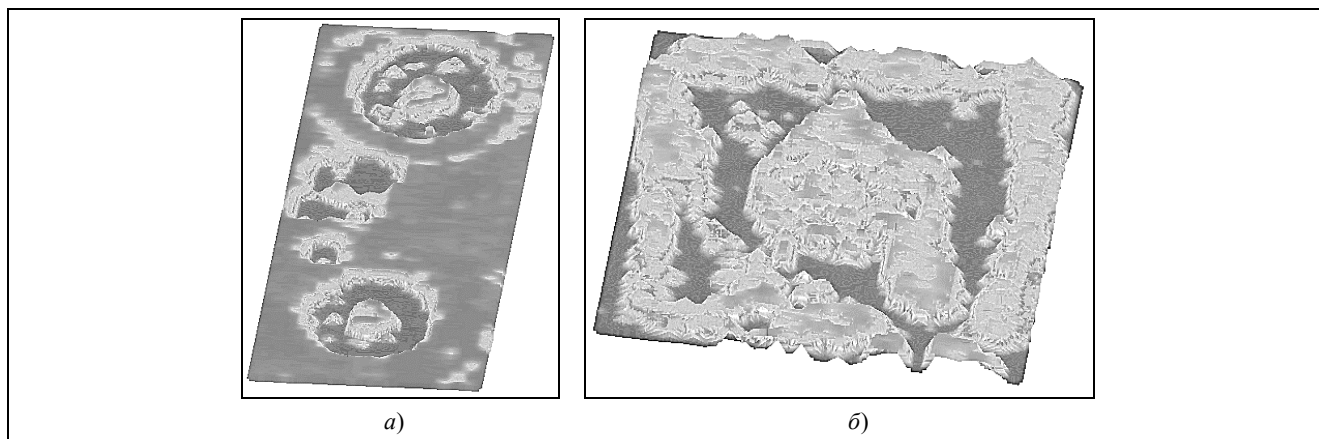
**Рис. 10.** Оползни: *a* – строительство автотрассы М-12; *б* – берег Черного моря в районе ст. Благовещенская; *в* – Выборг, стройплощадка терминала СПГ

**Fig. 10.** Landslides: *a* – construction of the M-12 highway; *b* – Black Sea coast near Blagoveshchenskaya station; *c* – Vyborg, construction site of the LNG terminal



**Рис. 11.** Боковая фильтрация (*I*) в дамбе хвостохранилища на месторождении Секисовское, Республика Казахстан

**Fig. 11.** Lateral filtration (*I*) in a tailings dam at the Sekisovskoye mine, Republic of Kazakhstan



**Рис. 12.** Обследования курганного могильника Кок-Жар: *a* – двойной курган №5 и №6; *б* – одиночный курган с прямоугольной оградой (горизонтальные сечения на глубине около 2 м)

**Fig. 12.** Surveys of the Kok-Zhar burial mound: *a* – double mound No. 5 and No 6; *b* – single mound with a rectangular fence (horizontal sections at a depth of about 2 m)

### Заклучение

Глубинное георадарное зондирование все чаще применяется в геологоразведке, в предпроектных изысканиях при строительстве зданий и сооружений, оснований авто/железных дорог, при прокладке трубопроводов методом горизонтально-наклонного бурения и при мониторинге гидротехнических сооруже-

ний. В работе показано, что при анализе радарограмм можно выделить радиообразы легко узнаваемых характерных структур в исследуемой геологической среде:

в геологоразведке это: грабены, горсты, тектонические разломы, дайки, кварцевые жилы, кимберлитовые трубки, элементы палеорельефа (палеодолины и палеоруслы) и т.п. Каждая из этих структур является рудоконтролирующей и сопутствует определенному виду полезных ископаемых;

в инженерной геологии это: провалы, подземные пустоты, зоны разуплотнения и обводнения, карсты, суффозионные воронки, структуры оползневых процессов (оползневые блоки, плоскости скольжения, зоны отрыва, заколы).

Дополняя георадарную информацию оценкой параметров среды, полученной с помощью приближенных методов решения обратной задачи [1, 5], можно существенно уточнить интерпретацию результатов зондирования.

Комплексное применение эвристического подхода в анализе радиообразов геологических структур, приближенных методов решения обратной задачи и заверочного бурения обеспечивает достоверную интерпретацию георадарных данных.

Уточнение методов интерпретации, применение численного моделирования позволит еще больше расширить сферу применения глубинного георадара для решения задач разведки полезных ископаемых, строительства и мониторинга опасных геологических процессов.

### Список источников

1. *Berkut A.I., Edemsky D.E., Kopeikin V.V., Morozov P.A.; Prokopovich I.V., Popov A.V.* Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation. In Proceedings of the 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2017). P. 1–6, Edinburgh, UK, 2017.
2. *Berkut A.I., Krinitsky L.M., Kopeikin V.V., Morozov P.A., Popov A.V., Prokopovich I.V.* Deep Penetration Radar: Hydrogeology and Paleorelief of Underlying Medium. 17th International Conference on Ground Penetrating Radar – GPR-2018. Rapperswil. Switzerland. June 18 – 21. 2018. P. 394–398.
3. *Беркут А.И., Морозов П.А., Ульянов Н.А., Козаченко И.В., Морозов Ф.П.* Эффективность применения георадарной съемки для поисков и изучения строения карстовых структур. Горно-геологический форум «МИНГЕО СИБИРЬ 2022», доклад. СФУ (Сибирский федеральный университет), Красноярск, 25–26 мая 2022 г.
4. *Морозов П.А., Волков В.А., Копейкин В.В.* Перспективы применения георадаров для исследования процессов карстообразования и оползней // Разведка и охрана недр. 2012. № 7
5. *Morozov P., Morozov F., Lazarev M. Bogolyubov L., Popov A.* Characterization of antenna radiation pattern and penetration depth in ground penetrating radar field missions. Remote Sensing. V. 15. No 23. P. 5452. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15235452>.

### Информация об авторах

**Андрей Ильич Беркут** – д.т.н., профессор

ORCID: 0009-0003-6511-6637

**Павел Анатольевич Морозов** – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник

ORCID: 0009-0008-9379-6875

**Алексей Владимирович Попов** – д.ф.-м.н., гл. науч. сотрудник

ORCID: 0000-0002-0677-8257

Статья поступила в редакцию 02.08.2024

Одобрена после рецензирования 09.09.2024

Принята к публикации 20.09.2024

Original article

# GPR for deep geological research, main areas of application

**A.I. Berkut<sup>1</sup>, P.A. Morozov<sup>2</sup>, A.V. Popov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> JSC VNIISMI (Moscow, Russia)

<sup>2,3</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS (Moscow, Troitsk, Russia)

<sup>1</sup> lozaberk@yandex.ru, <sup>2</sup> pmoroz5@yandex.ru, <sup>3</sup> popov@izmiran.ru

## Abstract

Problem statement. Deep penetration radar (DPR) allows one to easily explore, in a non-disruptive way, the range of depths characteristic for the development of dangerous geological processes. DPR makes it possible to receive continuous information about the state of the geological environment to the depths up to several hundred meters, with a step of tens of cm. Results. The report provides the most demanded areas of DPR application, based on about 25 years of experience in geophysical surveys. The examples of experimental data interpretation: detection of characteristic geological structures and assessment of environmental parameters, based on theoretical models, are presented.

Practical importance. The authors have accumulated an extensive experience in GPR research for the needs of geological exploration and engineering geology.

## Keywords

*Deep penetration radar (DPR), pulsed electromagnetic sensing, inverse problem, radar image, ore-controlling structures*

## For citation

*Berkut A.I., Morozov P.A., Popov A.V.* GPR for deep geological research, main areas of application. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 5. P. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-14> (in Russian)

## References

1. *Berkut A.I., Edemsky D.E., Kopeikin V.V., Morozov P.A., Prokopovich I.V., Popov A.V.* Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation. In *Proceedings of the 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2017)*. R. 1–6, Edinburgh, UK, 2017.
2. *Berkut A.I., Krinitsky L.M., Kopeikin V.V., Morozov P.A., Popov A.V., Prokopovich I.V.* Deep Penetration Radar: Hydrogeology and Paleorelief of Underlying Medium. 17th International Conference on Ground Penetrating Radar – GPR-2018. Rapperswil, Switzerland. June 18 – 21. 2018. R. 394–398.
3. *Berkut A.I., Morozov P.A., Ul'yancev N.A., Kozachenko I.V., Morozov F.P.* E`ffektivnost` primeneniya georadarnoj s`emki dlya poiskov i izucheniya stroeniya karstovyx struktur. Gorno-geologicheskij forum «MINGEO SIBIR` 2022», doklad. SFU (Sibirskij federalnyj universitet), Krasnoyarsk, 25–26 maya 2022 g.
4. *Morozov P.A., Volkov V.A., Kopeikin V.V.* Perspektivy` primeneniya georadarov dlya issledovaniya processov karstooobrazovaniya i opolznej. *Razvedka i ohrana neдр*. 2012. № 7
5. *Morozov P., Morozov F., Lazarev M., Bogolyubov L., Popov A.* Characterization of antenna radiation pattern and penetration depth in ground penetrating radar field missions. *Remote Sensing*. V. 15. No 23. R. 5452. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15235452>.

## Information about the authors

**Andrei I. Berkut** – Dr.Sc. (Eng.), Professor

**Pavel A. Morozov** – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

**Alexei V. Popov** – Dr.Sc. (Phys.-Math.), Principal Research Scientist

The article was submitted 02.08.2024

Approved after reviewing 09.09.2024

Accepted for publication 20.09.2024