

УДК 622'1:622.342:621.396.96

**ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД
РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕЧЕННОЙ И ОГРАНИЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ
МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

Куляндин Г.А.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН – обособленное подразделение
ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск, e-mail: kgavrilu@yandex.ru*

В представленной работе дано решение актуальной научно-практической задачи по повышению детализации и информативности метода георадиолокации при разработке россыпных месторождений криолитозоны. Определены основные факторы, осложняющие площадные георадиолокационные исследования и приводящие к искажению данных непрерывной съемки из-за неравномерного перемещения георадара: изрезанность рельефа, завалы валунов, водоемы и болота, инженерно-технические сооружения, горная техника и т.п. Предложена методика углового георадиолокационного сканирования и обосновано комплексное использование методик профилирования и углового сканирования в опорных точках в условиях пересеченной и ограниченной местности, что позволит существенно расширить область применения метода георадиолокации на действующих горнодобывающих предприятиях, охватив исследованиями ранее недоступные участки. Представлено описание методики углового георадиолокационного сканирования, а также приведены схемы формирования волновой картины для различных геологических разрезов. Показано, что георадиолокация по методике углового георадиолокационного сканирования позволяет выявлять на радарограмме волновые образы локальных объектов и протяженных отражающих границ между слоями горных пород. Определены основные преимущества предложенной методики по сравнению со стационарным зондированием. Апробация методики выполнена на месторождении россыпного золота р. Аллах-Юнь, георадаром «ОКО-2» с центральной частотой 250 МГц. На основе натурных данных проведено сравнение методик непрерывного профилирования, стационарного зондирования и углового георадиолокационного сканирования. Результаты апробации методики углового георадиолокационного сканирования показали возможность выделения на радарограмме осей синфазности сигналов от искоемых объектов, оценки фазы и времени регистрации сигнала, что обеспечивает достоверность интерпретации волновых картин при изучении строения и состояния массива горных пород на участках пересеченной и ограниченной местности.

Ключевые слова: россыпное месторождение золота, криолитозона, георадиолокация, строение массива горных пород, пересеченная местность

**STUDYING THE STRUCTURE OF ROCK MASSIFS IN ALLOWER DEPOSITS
IN CONDITIONS OF ROUGH AND LIMITED TERRAIN BY GPR**

Kulyandin G.A.

*N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk,
e-mail: kgavrilu@yandex.ru*

The presented work gives a solution to the urgent scientific and practical problem of increasing the detail and information content of the GPR method in the development of alluvial deposits in the permafrost zone. The main factors that complicate areal georadar studies and lead to distortion of continuous survey data due to uneven movement of the georadar are determined: relief indentation, blockages of boulders, reservoirs and swamps, engineering structures, mining equipment, etc. A technique for angular georadar scanning is proposed. The complex use of profiling and angular scanning techniques at reference points in conditions of rough and limited terrain is substantiated. This will significantly expand the scope of the GPR method at existing mining enterprises, covering previously inaccessible areas with research. A description of the method of angular georadar scanning is presented, as well as schemes for the formation of a wave pattern for various geological sections are given. It is shown that georadiolocation using the method of angular georadar scanning makes it possible to detect wave images of local objects and extended reflecting boundaries between rock layers on a radargram. The main advantages of the proposed technique in comparison with stationary sounding are determined. Approbation of the technique was carried out at the alluvial gold deposit of the river. Allah-Yun, georadar "OKO-2" with a center frequency of 250 MHz. On the basis of field data, a comparison was made between the methods of continuous profiling, stationary sounding and angular georadar scanning to identify the aquifer and the roof of bedrock. The results of approbation of the technique of angular GPR scanning showed the possibility of identifying the axes of in-phase signals from the desired objects on the radargram, estimating the phase and time of signal registration, which ensures the reliability of the interpretation of wave patterns when studying the structure and state of a rock mass in areas of rough and limited relief.

Keywords: placer gold deposits, permafrost, GPR, the structure of the rock, rough terrain

Эффективность освоения месторождений твердых полезных ископаемых криолитозоны во многом зависит от совершенствования технологических приемов

эксплуатационной разведки, которые были бы адаптированы к специфическим горно-геологическим особенностям их строения и состояния, а также к осложнениям в ус-

ловиях ведущихся горных работ. Наиболее прогрессивным методом для решения подобных задач является метод георадиолокации, позволяющий дистанционно и оперативно осуществлять исследования массива горных пород [1–3]. Однако очевидно, что получение геофизической информации методикой непрерывного профилирования на действующих месторождениях затруднено, а местами невозможно [4]. Это связано с наличием естественных и искусственных преград на пути перемещения георадара: изрезанность рельефа, завалы валунов, водоемы и болота, инженерно-технические сооружения, горная техника и т.п. Неравномерное перемещение георадара между отвалами или вблизи горной техники приводит к искажению данных непрерывной съемки. Кроме этого, на неровных участках и в местах скопления валунов не обеспечивается оптимальный режим излучения из-за потери контакта антенн с поверхностью. Недостаток информации может привести к искажению трехмерных построений при георадиолокационном картировании [5]. Повышение качества полевых данных может быть достигнуто разработкой новых способов регистрации сигналов георадиолокации [6].

Таким образом, исследования, направленные на разработку более совершенного методического подхода по изучению строения и свойств горных пород в межпрофильном пространстве и получению данных георадиолокации в условиях пересеченной и ограниченной местности, позволяющего расширить область применения и повысить информативность георадиолокационного картирования массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, являются актуальными [7].

Материалы и методы исследования

Возможности метода георадиолокации в условиях пересеченной и ограниченной местности при исследовании строения грунтов и горных пород показаны в работах исследователей, занимающихся радиолокацией и использующих переориентацию антенн как способ получения данных из одного местоположения в стесненных условиях [8–10]. Однако применяемые устройства и способы не лишены недостатков, существенным из которых является то, что зондирование осуществляется в отрыве от поверхности исследуемых пород и грунтов. В результате часть волн отражается от поверхности и рассеивается, при

этом возможно появление сигналов-помех от окружающих объектов. Для устранения вышеуказанных недостатков автором предлагается методика углового георадиолокационного сканирования (УГС) для изучения строения и состояния массивов горных пород из одного местоположения в контакте с исследуемой поверхностью [11]. В случае ограниченной и пересеченной местности комплексное использование непрерывного профилирования и методики УГС позволит существенно повысить информативность данных площадных измерений при изучении строения и состояния массива горных пород на действующих месторождениях. Для этого полевые исследования проводятся по равномерной сети параллельных профилей, а в недоступных для прохождения местах измерения дополняются локальными зондированиями в опорных точках по методике углового георадиолокационного сканирования (рис. 1). Данные георадиолокации по профилям и в опорных точках синхронизируются с координатами системой спутникового позиционирования по площади картирования. Количество и расположение опорных точек определяется поставленной задачей и условиями местности. На приведенной для примера схеме на рис. 1 предложены три опорные точки. Точка УГС-1 – расположена на окраине участка, между объектами, препятствующими прохождению непрерывного георадиолокационного профиля. Другие опорные точки (УГС-2 и УГС-3) расположены перед объектами инженерно-технической инфраструктуры, до которых невозможно выполнить профилирование по причине изрезанности рельефа. В результате исследования в опорных точках должны дать более точную информацию о форме и условиях залегания искомого геологического объекта. Его границы подтверждаются по возможности данными бурения.

Исследования в опорных точках по методике углового георадиолокационного сканирования выполняются особым способом с использованием доработанного антенного блока (АБ) георадара (рис. 2) [12, 13]. Для этого в массиве горных пород подготавливают углубление полуцилиндрической формы и помещают в него антенный блок георадара (рис. 2, а). Изъятый грунт по бокам углубления формируется насыпь с уклоном, соответствующим предельным углам сканирования. Перед каждым зондированием производится корректировка положения АБ по стрелке-отвесу и шкале,

подсыпается или изымается грунт для достижения максимально возможного контакта АБ с поверхностью (рис. 2, б). Изменения углов происходят в секторе 70° с шагом 5° . В каждом из 15 угловых положений записывается файл длиной 100 трасс зондирования. Такое накопление трасс сигналов делается из соображений улучшения визуального восприятия радарограммы оператором при обработке и интерпретации, так как одной или единичных трасс для этого не-

достаточно. По завершении сканирования из всех файлов собирается синтезированная радарограмма общей длиной 1500 трасс.

Волновая картина УГС будет более приближена к картине, получаемой профилированием, чем стационарным зондированием (непрерывным накоплением трасс на одном месте), так как происходит пространственное изменение положения антенного блока и условия зондирования изменяются.

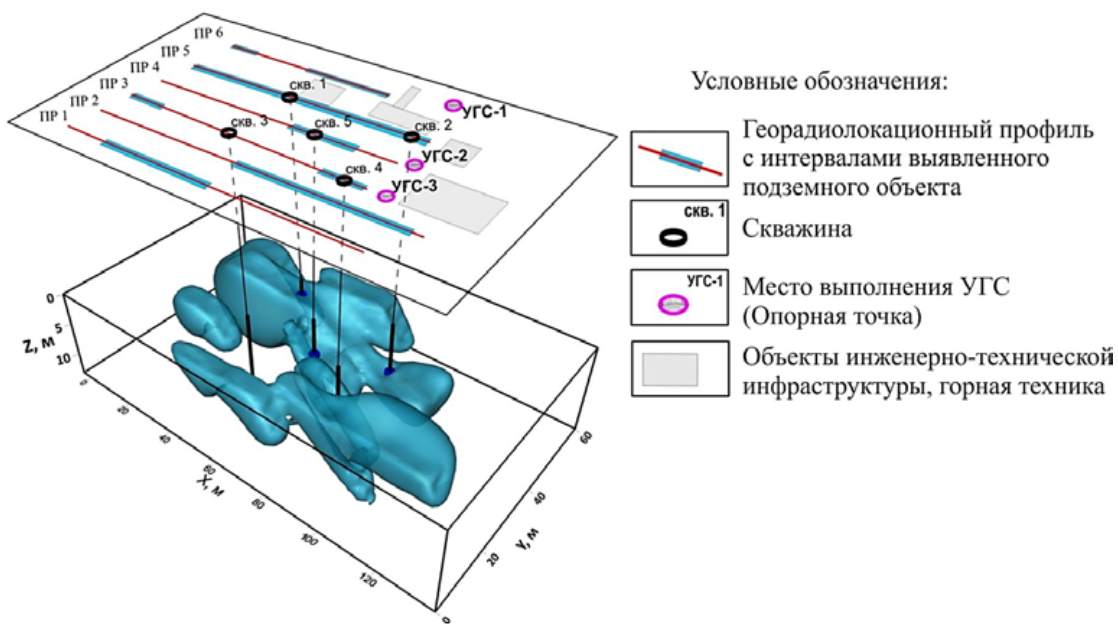


Рис. 1. Схема георадиолокационного картирования структурных неоднородностей массивов многолетнемерзлых горных пород с использованием УГС в опорных точках в условиях пересеченной и ограниченной местности, где профилирование невозможно



а)

б)

Рис. 2. Угловое георадиолокационное сканирование:
 а) схема выполнения углового георадиолокационного сканирования;
 б) доработанный антенный блок георадара «ОКО-2»

Для примера на рис. 3 представлены геологические разрезы и схемы формирования волновых картин в однородных слоистых средах и с присутствием локального объекта. Приемник и передатчик при угловом сканировании совмещены, поэтому в волновых схемах приняты как одна точка, из которой во все стороны распространяется сферическая волна. Каждая точка поверхности, на которую падает волна, становится источником сферических волн. Их регистрация в различных угловых положениях обеспечивается широкой диаграммой направленности экранированных антенн типа «бабочка» (рис. 2, а) [6, 14]. Построение отраженных волн в схемах выполнено с учетом закона Снеллиуса (угол падения равен углу отражения) и принципа Ферма (распространение волны происходит по кратчайшему пути), а углы преломления при переходе через границу не учитываются для упрощения построений. В схемах маленькими стрелками указаны направления падающей и отраженной волны по нормали к отражающей поверхности, так как эти волны будут достигать приемника, а остальные рассеются и поэтому не рассматриваются.

Как видно на рис. 3, а, горизонтальная граница при двухслойном разрезе формирует волновую картину, состоящую из слегка изогнутой оси синфазности отраженных сигналов. Ее искажение на временном разрезе составит не более Δt (для антенны 250 МГц георадара «ОКО-2», Δt составит не более 2,3 нс) и фактически связано с формой углубления, где выполняют угловое сканирование (рис. 1). Это практически незаметно на радарограмме для горизонтальных геологических границ в естественных условиях с неидеально ровными контактными поверхностями горных пород и грунтов.

В случае, когда граница между слоями горных пород наклонная, на радарограмме формируется схожая по направлению наклона ось синфазности, но изогнутая в вершине, напоминающая годограф, вершина которого смещена в сторону подъема границы (рис. 3, б).

Формирование волновой картины от локального объекта при угловом сканировании схоже с радарограммой профилирования (рис. 3, в). Дифрагированными волнами образуется ось синфазности, схожая с гиперболой, что позволяет различить на радарограмме волновые образы локальных объектов и протяженных отражающих границ между слоями горных пород. Возможно, это является главным преимуществом УГС

перед стационарным зондированием, с помощью которого также можно получать локальные данные. Однако во всех трех случаях, приведенных выше (рис. 3), данные, получаемые стационарным зондированием, сформируют волновую картину из горизонтальных осей синфазности и потому будут недоступны для некоторых критериев оценки, например для определения конфигурации осей синфазности отраженных волн (параллельные, наклонные, волны дифракции), фазы и времени регистрации.



Рис. 3. Схемы формирования волновой картины для различных геологических разрезов при угловом георадиолокационном сканировании: а) горизонтально-слоистый разрез, б) наклонно-слоистый разрез, в) однородный разрез с включением локального объекта

Физическое моделирование в емкости с песком показало, что при угловом сканировании происходит накопление отраженных сигналов от исследуемой горизонтальной границы [11]. В результате накопления данных зондированиями из одного местоположения интенсивность регулярных сигналов на радарограмме возрастает, а непо-

стоянные сигналы-помехи распределяются по временной области, теряя свою интенсивность, за счет этого повышается точность и достоверность исследований.

На данный момент возможностей стандартного программного обеспечения GeoScan32, входящего в комплект поставки георадара «ОКО-2», достаточно для обработки результатов углового сканирования. Первичная обработка включает сборку радарограмм углового сканирования из отдельных файлов и выбор временного окна обработки. Далее осуществляется обработка радарограммы с применением различных процедур (фильтрация, коррекция затухания, регулировка контрастности радарограмм и т.д.) с целью выделения осей синфазности от отражающей границы.

Результаты исследования и их обсуждение

Описанная методика изучения горного массива в условиях ограниченной и пересеченной местности методом георадиолокации успешно апробирована на месторождении россыпного золота р. Аллах-Юнь. Для выявления водоносного горизонта и кровли коренных пород георадиолокационные исследования проведены георадаром «ОКО-2» с центральной частотой антенного бло-

ка 250 МГц. На участке, подготавливаемом к дражной обработке, получены данные профилирования, стационарного зондирования и углового георадиолокационного сканирования. При интерпретации использована информация по ближайшему шурфу (шурф № 9, шурфовая линия № 46), расположенному на удалении 0,5 км (рис. 4).

По данным профилирования на глубине около 2 м выявлен водоносный горизонт в толще мерзлых песчано-гравийно-галечных отложений. На радарограмме он представлен протяженной осью синфазности (линия, соединяющая импульсы волн с одной фазой), образованной высокоамплитудными сигналами от верхней границы водоносного горизонта.

По аналогичным признакам водоносный горизонт прослеживается и на радарограмме стационарного зондирования. При угловом сканировании в результате изменения пространственного положения антенного блока, сигналы-помехи (волны дифракции от валунов, гальки и прочего обломочного материала) разошлись по времени регистрации, благодаря чему появилась возможность выделить протяженные оси синфазности сигналов, соответствующих верхней и нижней границе водоносного горизонта, а также кровлю коренных пород.

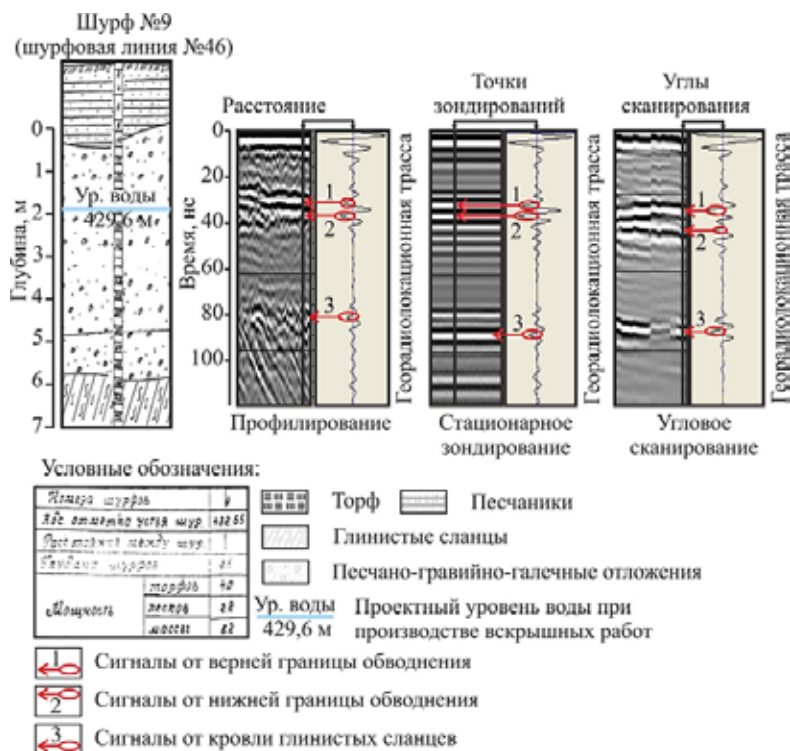


Рис. 4. Результат применения разработанной методики УГС для локального сбора данных георадиолокации на подготавливаемом к дражной обработке участке

Результаты апробации показали, что угловым георадиолокационным сканированием, в отличие от стационарного зондирования, получают радарограмму с набором уникальных трасс сигналов, записанных под различными углами к отражающей границе из одного местоположения. При этом на радарограмме формируется волновая картина, позволяющая выделить оси синфазности сигналов от искомым объектов и оценить фазу и время регистрации сигнала для достоверной интерпретации данных по различным критериям выявления геокриологических структур. Локальность сбора георадиолокационных данных по методике УГС позволяет получить достаточную информацию о поисковых объектах в межпрофильном пространстве и на участках, где профилирование невозможно, что обеспечивает в комплексе с данными георадиолокационного профилирования эффективное изучение особенностей строения и состояния массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны по площади картирования.

Заключение

Площадные георадиолокационные исследования, проводимые на участках месторождений, осложненных изрезанным рельефом или присутствием горной техники и инженерно-технических сооружений, могут быть дополнены точечными измерениями в труднодоступных местах по методике углового георадиолокационного сканирования. На основе выполненных построений волновых картин для однородных слоистых сред и с включением локальной неоднородности установлено, что георадиолокация по методике углового георадиолокационного сканирования позволяет выявлять на радарограмме волновые образы локальных объектов и протяженных отражающих границ между слоями горных пород, что является существенным преимуществом перед альтернативным способом получения точечных данных – стационарным зондированием. Апробация методики углового георадиолокационного сканирования в натурных условиях показала возможность выделения на волновой картине осей синфазности сигналов от искомым объектов, оценки фазы и времени регистрации сигнала и, соответственно, возможность применения различных критериев интерпретации данных.

В результате показано, что развитие методики георадиолокации в условиях огра-

ниченной местности позволяет охватить исследованиями ранее недоступные для георадиолокации участки и тем самым повысить детализацию и информативность картирования геологических объектов на действующих горнодобывающих предприятиях.

При проведении полевых работ использовано оборудование ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Список литературы

1. Судакова М.С., Владов М.Л. Современные направления георадиолокации // Вестник Московского университета. Сер. 4. 2018. № 2. С. 3–12.
2. Мельников Н.Н., Калашник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Максимов Д.А. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1. С. 39–49.
3. Николаев С.П., Заровняев Б.Н., Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Оценка состояния массива георадиолокационным зондированием для совершенствования буровзрывных работ в условиях криолитозоны // Горный журнал. 2018. № 12. С. 9–13. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.02.
4. Великин С.А., Марченко Ю.Л., Бажин К.И. Геофизические исследования при изучении инженерно-геокриологического состояния вмещающих горных пород восточного карьера «Нюрбинский» (Западная Якутия). // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 3. Вып. № 27. С. 35–46.
5. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
6. Нерадовский Л.Г. Способ георадиолокации многолетнемерзлых пород // Патент РФ № 2490671. Патентообладатель Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. 2013. Бюл. № 23.
7. Туренко С.К., Дружинина К.В. О системном подходе к повышению эффективности исследований объектов криолитозоны геофизическими методами // Известия высших учебных заведений нефть и газ. 2018. № 2. С. 27–31. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-2-27-31.
8. Michael J. Martin. Portable locator system with jamming reduction // Патент США № US7755360B1. Патентообладатель Seektech, Inc. 2010.
9. Paul Albats, Jr., Macyln Burns, Mark Dalton, Anthony DeRubeis, Cliff Evans, Jakob Haldorsen, Thorkild Hansen, Douglas E. Miller, Michael L. Oristaglio. Rotating scanning antenna apparatus and method for locating buried objects // Патент США № US6388629B1. Патентообладатель Witten Technologies, Inc. 2002.
10. Dennis H. Cowdrick. Oblique scanning ground penetrating radar // Патент США US006094157A. Патентообладатель Underground Imaging, Inc. 2000.
11. Kulyandin G.A., Omelyanenko A.V., Omelyanenko P.A. Methods of GPR angular scanning. Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. 2014. P. 571–574. DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970489.
12. Куляндин Г.А., Омеляненко П.А. Способ георадиолокации в условиях ограниченного пространства // Патент РФ № 2561769. Патентообладатель Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. 2015. Бюл. № 25.
13. Куляндин Г.А., Омеляненко П.А. Антенный блок георадара // Патент РФ № 141971. Патентообладатель Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. 2014. Бюл. № 17.
14. Lampe B., Holliger K., Green A.G. A finite-difference time-domain simulation tool for ground-penetrating radar antennas. Geophysics. 2003. Vol. 68. No. 3. P. 971–987.