



**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ЛЬДА
НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ МАССИВА МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД
ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

Р. А. Дягилева, К. О. Соколов

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,

E-mail: radadyagileva@mail.ru, k.sokolov@ro.ru, просп. Ленина 43, г. Якутск 677980, Россия

Рассмотрена проблема инженерно-геологического обеспечения буровзрывных работ в массиве мерзлых пород, где присутствуют подземные льды, снижающие эффективность их проведения. Для поиска льда в массиве мерзлых пород предложено использовать метод георадиолокации. На основе компьютерного моделирования в системе grgMax разработаны критерии идентификации подземных льдов, позволяющие упростить и ускорить обработку георадиолокационных данных.

Подземные льды, георадиолокация, моделирование, критерии интерпретации, буровзрывные работы, криолитозона

**DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR UNDERGROUND ICE DETECTION
BASED ON COMPUTER SIMULATION OF FROZEN ROCK MASS GEORADIOLOCATION
FOR ENGINEERING AND GEOLOGICAL SUPPORT OF DRILLING-AND-BLASTING OPERATIONS**

R. A. Dyagileva and K. O. Sokolov

Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,

E-mail: radadyagileva@mail.ru, k.sokolov@ro.ru, pr. Lenina 43, Yakutsk 677980, Russia

The problem of engineering and geological support for drilling-and- blasting operations in a frozen rock mass with underground ice reducing the blasting efficiency is considered. A survey of methods for underground ice searching is carried out and the georadiolocation method is proposed as one of the most operational and efficient. Underground ice identification criteria are developed which allow using the georadiolocation method for searching the formation ice, simplify and accelerate the georadiolocation data processing.

Underground ice, GPR, simulation, interpretation criteria, drilling-and-blasting operations, cryolithic zone

При вскрышных работах для разрушения крепких горных пород широко применяется буровзрывной способ [1], который также часто используется при добыче россыпных месторождений криолитозоны, где породы из-за нахождения в мерзлой среде и присутствия в них подземных льдов обладают высокой крепостью. Инженерно-геологическое обеспечение буровзрывных работ (БВР) мерзлых пород предусматривает поиск подземных льдов, так как в них происходит интенсивное затухание взрывной волны [2]. Такие работы обычно проводятся геологическими методами, требующими обнажений мерзлых грунтов или, использующих скважины в случае отсутствия обнажений [3]. Получаемые данные при этом дискретны и не отражают полностью геокриологические особенности массива горных пород. Более достоверную информации дают геофизические методы, например, георадиолокация, успешно используемая не только для изучения строения многолетнемерзлых горных пород, но для обнаружения криогенных объектов [4].

В настоящее время отсутствует методическое обеспечение для интерпретации данных георадиолокационных измерений, позволяющее надежно выявлять лед в массиве мерзлых пород. Для решения этой проблемы проведено компьютерное моделирование распространения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в массиве мерзлых пород с пластовым льдом с помощью программы grgMax [5].

Модель представляет массив мерзлых горных пород, в котором расположены три пластовых льда прямоугольной формы толщиной 0.72, 0.6 и 0.29 м, находящиеся на глубине 0.72, 0.84 и 0.75 м соответственно (рис. 1). Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ для льда равна 3.2, для мерзлой среды — 4. Моделирование выполнено для георадаров с центральными частотами 400, 500, 900, 1200 МГц.

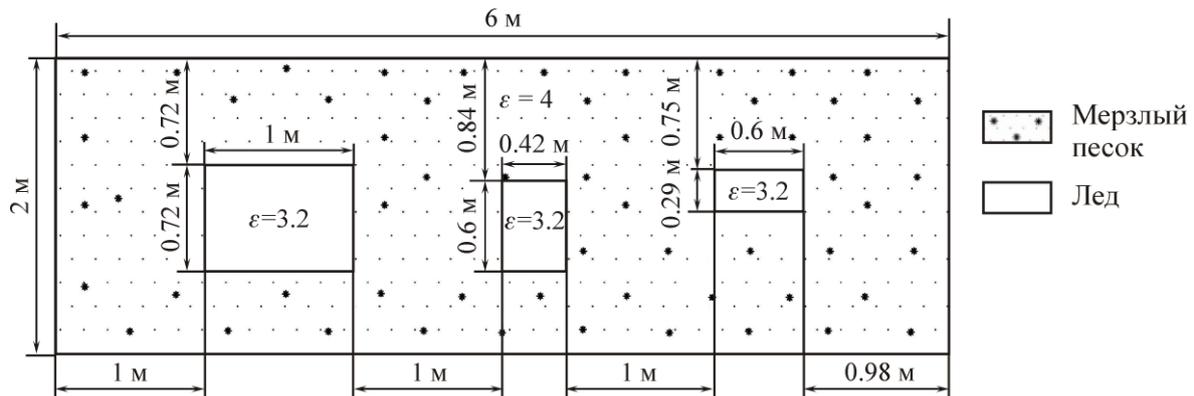


Рис. 1. Схема расположения пластовых льдов в мерзлой среде, используемых для моделирования

Пример георадиолокационных данных, полученных с помощью моделирования в grgMax, представлен на рис. 2, где отмечены оси синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ льда. В результате анализа радарограммы установлены критерии обнаружения льда в массиве мерзлых горных пород.

Первым критерием для идентификации льдов прямоугольной формы является параллельность их верхней и нижней границ, отображающихся в виде параллельных осей синфазности георадиолокационных сигналов, выделяемых на границе раздела сред мерзлый песок–лед и лед–мерзлый песок. Этот критерий находится без особых трудностей, достаточно первичных этапов обработки.

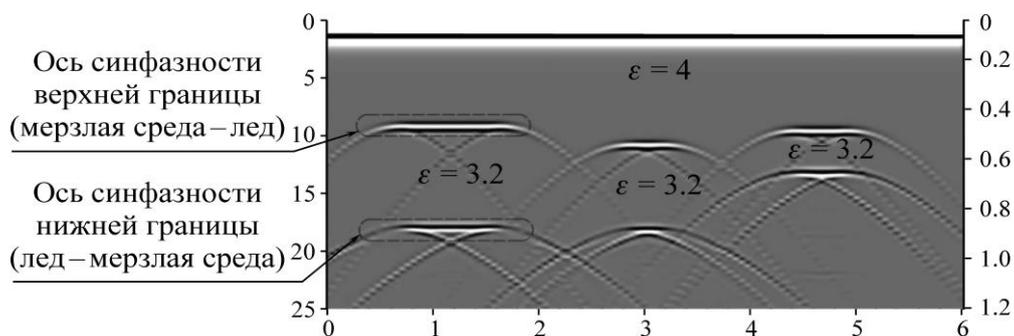


Рис. 2. Радарограмма при частоте 1200 МГц по схеме, приведенной на рис. 1

Второй критерий, присущий всем подземным льдам в мерзлой среде, — изменение фазы сигнала от нижней границы (лед–мерзлая среда). Это можно наблюдать на рис. 3, где изображен фрагмент радарограммы (рис. 3а) и георадиолокационная трасса, на которой показаны сигналы (рис. 3б), входящие в профиль [6]. Фаза сигнала, отраженного от нижней границы (лед–мерзлая среда), противоположна сигналу верхней (мерзлая среда–лед), и на фрагменте радарограммы можно увидеть соответствующее изменение окраски с черно-бело-черной на бело-черно-белую (рис. 3а).

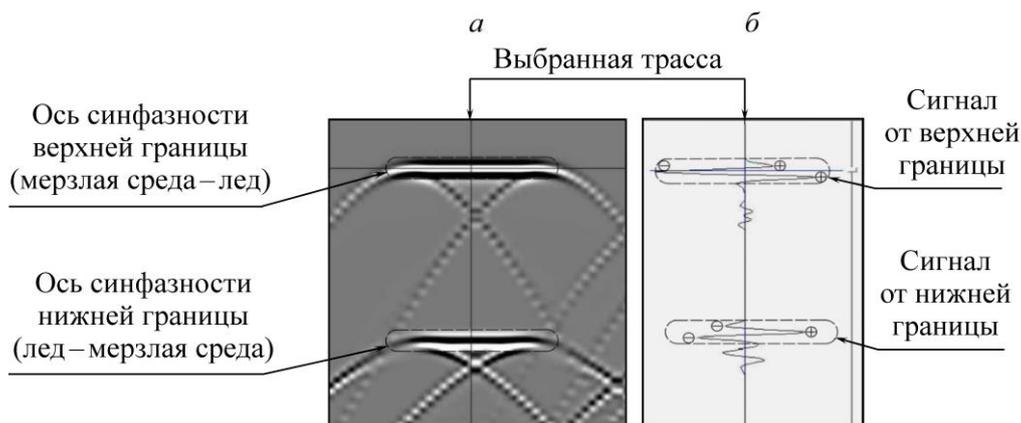


Рис. 3. Результат моделирования пластового льда мощностью 0.72 м для АБ-1200 МГц 1, представленный фрагментом радарограммы (а) и георадиолокационной трассой (б)

Третьим установленным критерием является соотношение амплитуд сигналов, отраженных от верхней и нижней границы льда. Представим, что амплитуда сигнала, падающего на лед, равна A_o , тогда по [7] амплитуда отраженной волны от верхней границы равна

$$A_{\text{верх}} = A_o R_{1-2}, \quad (1)$$

где $R_{1-2} = \frac{\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2}}{\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}} = 0.055$ — коэффициент отражения от верхней границы, ε'_1 , ε'_2 — диэлектрическая проницаемость мерзлой среды и льда соответственно. Амплитуда отраженной волны от нижней границы:

$$A_{\text{нижн}} = A_o R_{2-1} T_{1-2} T_{2-1} e^{-2\gamma h}, \quad (2)$$

где R_{2-1} — коэффициент отражения от нижней границы; T_{1-2} , T_{2-1} — коэффициенты прохождения от верхней и нижней границ соответственно, причем $T_{1-2} = T_{2-1} = 0.945$; h — мощность пластов; γ — постоянная распространения в слое.

Соотношение амплитуд сигналов, отраженных от нижней и верхней границ:

$$\frac{A_{\text{нижн}}}{A_{\text{верх}}} = \frac{A_o R_{2-1} T_{1-2} T_{2-1} e^{-2\gamma h}}{A_o R_{1-2}} = T_{1-2}^2 e^{-2\gamma h} = 0.9 e^{-2\gamma h}. \quad (3)$$

Здесь 0.9 — постоянное значение отношения амплитуд, в котором учитываются только потери на отражение. Если учитывать все факторы (затухание и т. д.), то, используя формулу (1), получим выражение для расчета постоянной распространения:

$$\gamma = \frac{\ln \frac{A_{\text{нижн}}}{0.9 A_{\text{верх}}}}{-2h}, \quad (4)$$

По формуле (4) проверяется общее поглощение электромагнитной энергии в слое. Для условий вечной мерзлоты γ находится в пределах от 0.1 до 5 [8].

В процессе обработки радарограмм построены зависимости амплитуд сигналов от частоты при разных мощностях льда (рис. 4), а также определены постоянные распространения (для льда мощностью 0.6 м — $\gamma_{400} = -0.7$, $\gamma_{500} = -0.6$, $\gamma_{900} = -0.42$, $\gamma_{1200} = -0.4$). Результаты вычислений показали, что постоянная распространения для данной модели зависит от центральной частоты антенного блока и при частоте 1200 МГц будет максимальной, при частоте 400 МГц — минимальной. Зависимость амплитуд от частоты объясняется небольшой глубиной расположения льдов и разрешающей способностью георадара при заданных частотах антенных блоков.

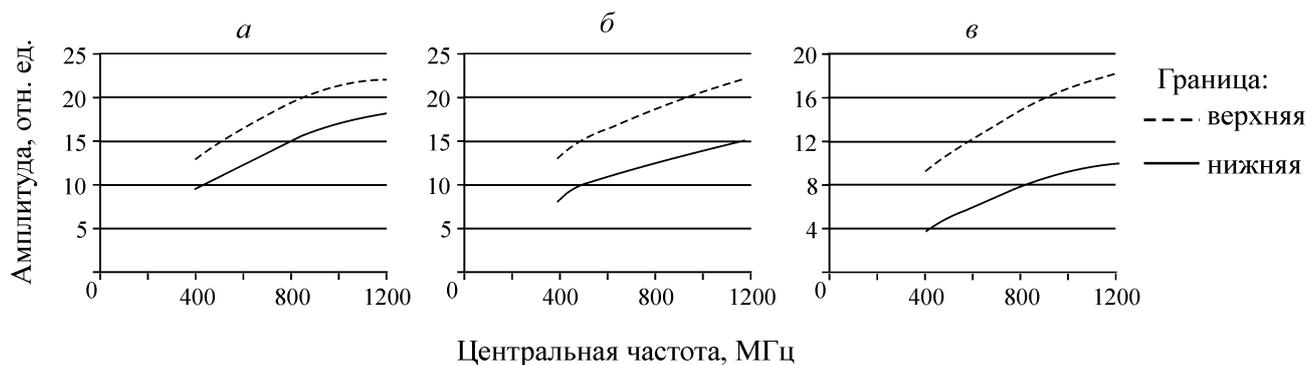


Рис. 4. Зависимость амплитуды от частоты при h , м: a — 0.29; b — 0.6; v — 0.72

Для обоснования установленных критериев проведена их апробация при анализе результатов физического моделирования георадиолокации пластового льда. Физическая модель представлена в виде трехслойной среды: мерзлый песок ($\epsilon' = 4$), речной лед ($\epsilon' = 3.2$, $h = 0.72$ м) и суглинок ($\epsilon' = 12$). Как видно из рис. 5, первый и второй критерий подтверждаются. На георадиолокационной трассе (рис. 5б) отмечено, что фазы сигналов верхней и нижней границ противоположны. Амплитуды сигналов, отраженных от верхней и нижней границы льда равны $A_{\text{верх}} = -221$ отн. ед., $A_{\text{нижн}} = 639$ отн. ед., а $\gamma = -0.7$.



Рис. 5. Результат георадиолокационных зондирований физической модели для частоты антенного блока 1200 МГц, представленный фрагментом радарограммы (a) и георадиолокационной трассой (b)

ВЫВОДЫ

В результате исследования установлены георадиолокационные критерии для идентификации подземных льдов в массиве мерзлых горных пород, которые позволят успешно применять метод георадиолокации для изучения геокриологических особенностей участков буровзрывных работ. В процессе обработки и интерпретации радарограмм установлено, что верхняя и нижняя границы льдов параллельны и фаза сигнала от нижней границы льда изменяется на противоположную. Определено соотношение амплитуд сигналов, отраженных ото льда в мерзлой среде, и выведена формула, с помощью которой проверяется общее поглощение электромагнитной энергии и вычисляются значения постоянных распространения.

Предложенные критерии дают возможность использовать метод георадиолокации для обнаружения пластовых льдов, упрощают и ускоряют обработку георадиолокационных данных, что делает этот метод наиболее эффективным для исследований участков буровзрывных работ в условиях криолитозоны. В дальнейшем предполагается автоматизировать поиск выявления пластового льда и исследовать другие его типы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **VSN 281-71.** Technical rules for blasting on the surface of the day. Ed. 5th, Rev. and add., MMSS USSR, Moscow, Nedra, 1972 [**ВСН 281-71.** Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. Изд. 5-е, перераб. и доп. / ММСС СССР — М.: Недра, 1972.]
2. **Bondarenko I. F., Zharikov S. N., and Zyryanov I. V.** Blasting in kimberlite open pits of Yakutia, Ekaterinburg, Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 2017, pp. 172 (in Russian) [**Бондаренко И. Ф., Жариков С. Н., Зырянов И. В.** Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017— 172 с.]
3. **Vtyurin B. I.** Recommendations on methods of studying underground ice and cryogenic structure of permafrost soils—Moscow, PNIIS, 1969, 50 pp. (in Russian) [**Втюрин Б. И.** Рекомендации по методике изучения подземных льдов и криогенного строения многолетнемерзлых грунтов. — М.: ПНИИИС, 1969. — 50 с.]
4. **Bricheva S. S.** Development of methods for the study of cryogenic objects using GPR: Synopsis of Cand. Geol.-Miner. Sci. Thesis, Moscow, MSU, 2018, 25 pp. (in Russian) [**Бричева С. С.** Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. — М.: МГУ, 2018. — 25 с.]
5. **Warren C., Giannopoulos A., and Giannakis I.** gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar, Computer Physics Communications, 2016, vol. 209, pp. 163–170.
6. **GeoScan32:** “ОКО-2” Georadar control program and data visualization: illustrated user guide [**GeoScan32:** программа управления Георадаром “ОКО-2” и визуализации получаемых данных: иллюстрированное руководство пользователя. URL: <http://logsys.ru/download/new/geoscan32manual.pdf> (Дата обращения 05.08.2019).]
7. **Finkelstein M. I., Mendel'son, V. L., and Kutev V. A.** Radar layered earth covers; under the editorship of M. I. Finkelstein, Moscow, Owls. radio, 1977, 167 pp. (in Russian) [**Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А.** Радиолокация слоистых земных покровов / под ред. М. И. Финкельштейна. — М.: Сов. радио, 1977. — 167 с.]
8. **Daniels D. J.** Ground Penetrating Radar, 2nd edition. UK, London, The Institute of Electrical Engineers, 2004, 726 pp.