

УДК 004.41/42:622.1/2

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ВЛАЖНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД КРИОЛИТОЗОНЫ

Соколов К.О., Федорова Л.Л., Саввин Д.В., Стручков А.С.

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, e-mail: k.sokolov@ro.ru

Статья посвящена разработке алгоритма обработки данных георадиолокационного мониторинга, включающих зоны развития криогенных процессов в массиве горных пород (участки повышенной влажности и пучения пород, пустоты, просадочные деформации и разуплотнения горных пород, поверхностные воды или надмерзлотные воды сезонно-талого слоя). По результатам анализа геологического строения и электрофизических свойств горных пород в этих зонах установлены особенности амплитудно-временных характеристик георадиолокационных сигналов и волновых картин. Предложены признаки их выявления и интерпретации, основанные на расчете дисперсии и корреляции амплитудно-временных значений данных георадиолокации, полученных в результате мониторинговых измерений. Разработан алгоритм, реализующий поиск выработанных признаков в данных георадиолокации и дополняющий существующее программно-методическое обеспечение георадиолокационного мониторинга влажности горных пород криолитозоны. В алгоритме анализ данных по выявлению большей части аномалий проводится в едином цикле.

Ключевые слова: георадиолокация, мониторинг, криолитозона, неоднородность, влажность, георадиолокационная модель, интерпретация, горные породы, грунты, процедуры обработки

SUBSTANTIATION OF STRUCTURE AND FUNCTIONALITY OF ALGORITHMIC SUPPORT OF GPR MONITORING OF ROCK HUMIDITY OF PERMAFROST ZONE

Sokolov K.O., Fedorova L.L., Savvin D.V., Struchkov A.S.

Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk, e-mail: k.sokolov@ro.ru

The article is devoted to the development of an algorithm for the processing of GPR monitoring data, including the zones of development of cryogenic processes in a rock massif (areas of high humidity and rock drill, voids, subsidence deformation and rock decomposition, surface waters or the under-frosted waters of the seasonally thawed layer). Based on the results of the analysis of the geological structure and electrophysical properties of rocks, the features of the amplitude-time characteristics of GPR signals and wave patterns are established in these zones. The signs of their detection and interpretation based on the calculation of dispersion and correlation of the amplitude-time values of the GPR data obtained as a result of monitoring measurements are proposed. An algorithm has been developed that implements the search for the developed features in the GPR data and complements the existing software and methodological support for GPR monitoring of the humidity of the rocks in the permafrost zone. In the algorithm, the analysis of data on the detection of most of the anomalies is carried out in a single cycle.

Keywords: GPR, monitoring, permafrost, heterogeneity, humidity, model GPR, interpretation, rocks, soils, methods of treatment

Промышленное освоение месторождений криолитозоны показало необходимость контроля влажности горных пород, которая является весьма важной характеристикой, т.к. влияет на основные физико-механические свойства пород. Знание распределения влажности в горных породах криолитозоны необходимо как при эксплуатационной разведке месторождений, так и при контроле устойчивости грунтов оснований горнотехнических сооружений. В работах [1–3] обоснована и предложена методика георадиолокационного мониторинга криогенного состояния горных пород, позволяющая дистанционно определять влажность пород по результатам анализа данных разносезонных георадиолокационных измерений. Методика ориентирована на изучение влажности горизонтально-слоистых сред и не учитывает наличие аномалий георадиолокационных разрезов, связанных с развитием кри-

огенных процессов в грунтах. Выявление подобных аномалий возможно с помощью специализированных алгоритмов обработки данных георадиолокации.

Для создания соответствующего программно-методического комплекса георадиолокационного мониторинга влажности горных пород необходима разработка алгоритмического обеспечения, включающего модели неоднородностей мерзлых горных пород, связанных с криогенными процессами, алгоритмы их выявления, а также процедуры для автоматизированной обработки, хранения и визуализации данных о выявленных неоднородностях.

Аномалии георадиолокационных разрезов, связанные с криогенными процессами

При разработке алгоритмического обеспечения необходимо основываться на

моделях геологических разрезов, включающих изучаемые криогенные процессы (рис. 1), и особенностях распространения в них электромагнитных волн. Одним из основных электрофизических свойств горных пород является комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП): $\hat{\epsilon} = \epsilon' + j\epsilon''$. Мнимая часть $\hat{\epsilon}$ характеризует поглощение электромагнитной энергии в среде, а действительная часть определяет скорость распространения электромагнитных волн в среде и их коэффициент отражения (k) на границе двух сред: $k = (\sqrt{\epsilon'_1} - \sqrt{\epsilon'_2}) / (\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2})$.

Опыт проведения георадиолокационных исследований показывает, что основными аномалиями георадиолокационных разрезов, связанными с криогенными процессами, являются (рис. 2):

а) переотражение сигналов на участках повышенной влажности;

б) высокие значения амплитуд сигналов в зонах пучения пород;

в) скачкообразное изменение времени задержки сигналов, характерное для пустот;

г) разрывы осей синфазности сигналов с изменением времени задержки сигналов в зонах просадочных деформаций;

д) «хаотичные» сигналы на участках разуплотненных пород;

е) оси синфазности высокоамплитудных сигналов, характерные для границ сброса поверхностных вод или миграции надмерзлотных вод сезонно-талого слоя.

При исследовании участков повышенной влажности методом георадиолокации на границе мерзлых ($\epsilon'_1 = 4-6$) и талых увлажненных ($\epsilon'_2 = 20-30$) горных пород коэффициент отражения составляет около 0,4 и, соответственно, 40% энергии отражается вверх. Далее происходит циклическое переотражение электромагнитной волны в мерзлом слое горных пород, которое формирует на радарограмме кратные по времени регистрации сигналы (рис. 2, а).

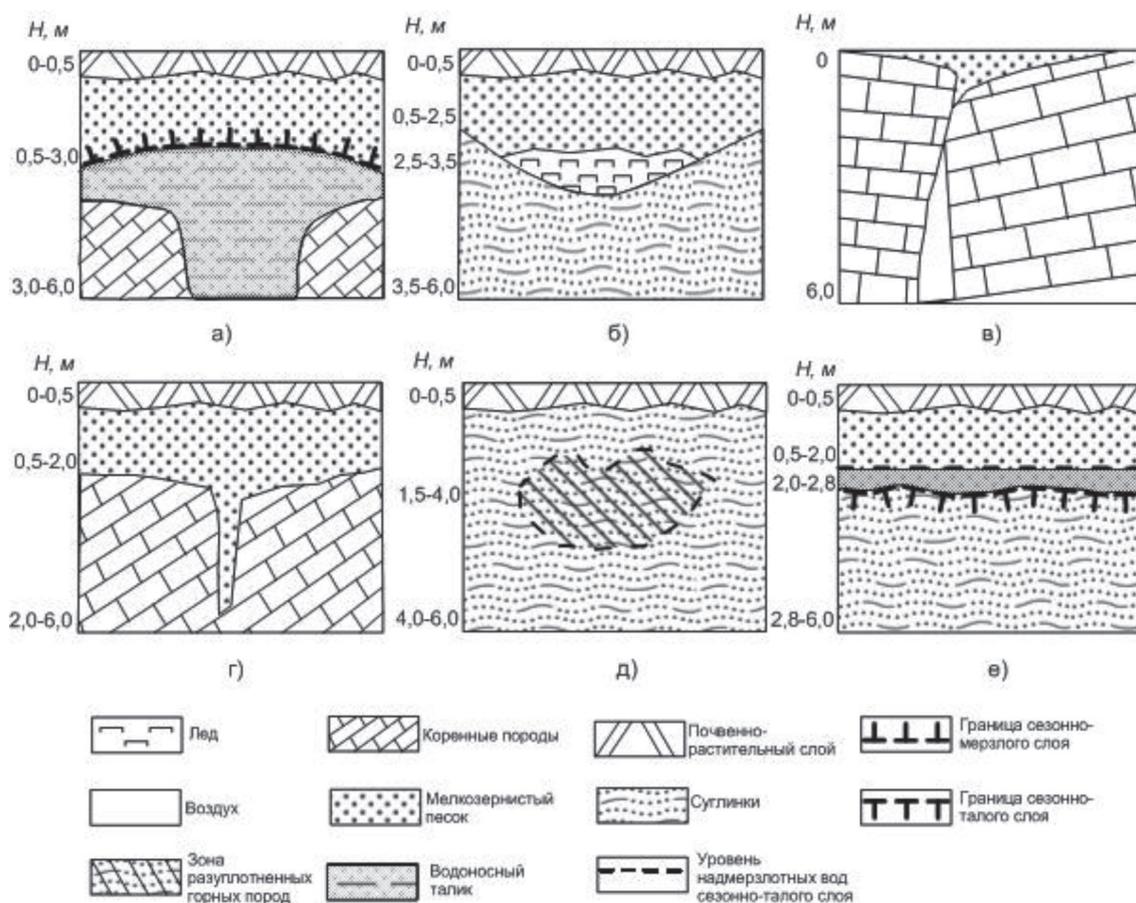


Рис. 1. Модели геологических разрезов, формирующие аномальные волновые картины в данных георадиолокации

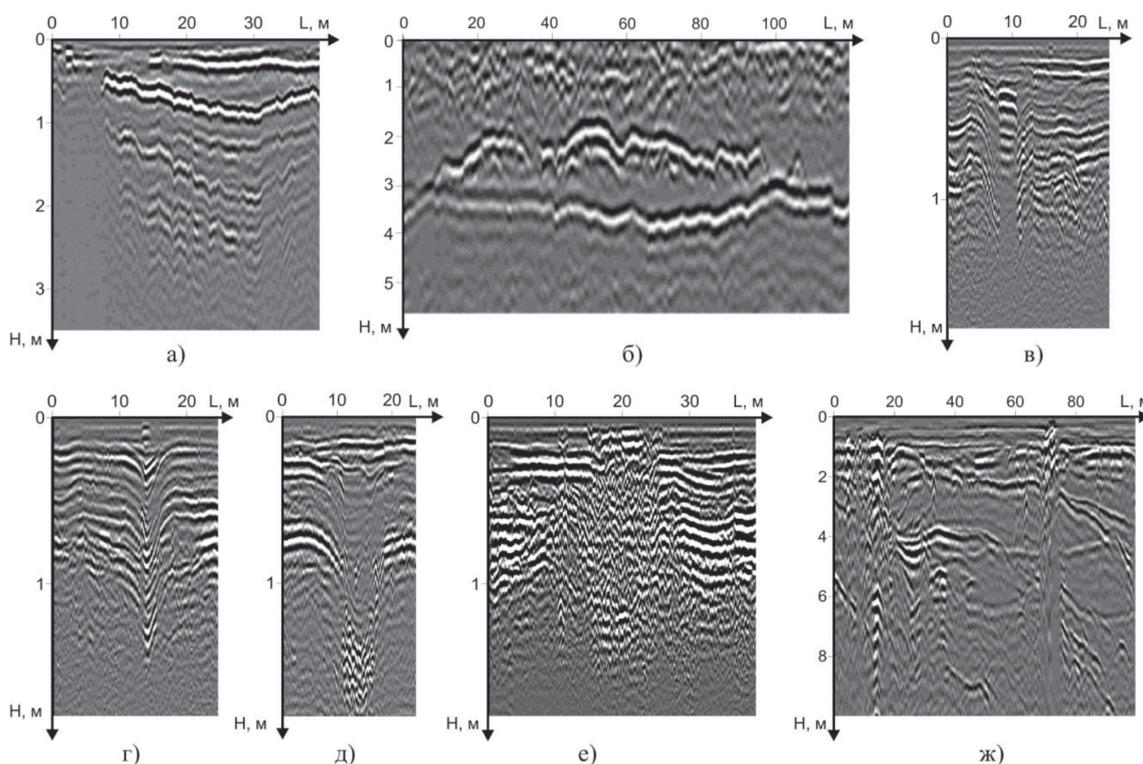


Рис. 2. Фрагменты георадиолокационных разрезов, пересекающих зоны развития криогенных процессов

Зоны пучинистых горных пород в мерзлом состоянии на радарограмме представляются в виде линзообразных объектов (рис. 2, б). При георадиолокационном зондировании пустот оси синфазности сигналов, отраженных от нижней границы полости, имеют локальный характер и аномально малые значения времени регистрации (сигналы «прыгают» вверх) из-за высокой скорости распространения электромагнитных волн в воздухе (рис. 2, в). Зона просадки горных пород состоит из горизонтального участка просадки поверхности пород, в пределах которого просадка достигает максимальной величины, и двух боковых криволинейных участков (в виде круто наклонных осей синфазности), на которых просадка изменяется от максимальной величины до нуля (рис. 2, г, д). Зоны разуплотнения образуются в результате выноса водным потоком части горных пород определенной фракции, что приводит к образованию искусственной трещиноватости и нарушениям текстуры пород.

На радарограмме зоны разуплотнения отображаются в виде «хаотичных» сигналов, не имеющих выраженных осей синфазности (рис. 2, е). Миграция надмерзлотных вод сезонно-талого слоя происходит по кров-

ле многолетнемерзлых пород, представляющих собой водоупор. Коэффициент отражения электромагнитных волн (k) на границе обводненных и мерзлых пород очень высок, вследствие чего георадиолокационные сигналы, отраженные от этой границы, имеют высокие амплитудные значения (рис. 2, ж). В данном случае кратного переотражения сигналов не происходит из-за значительного поглощения электромагнитной энергии в талых породах ($\epsilon'' \approx 3$ [4]).

Статистические методы оценки данных георадиолокационных исследований

Для автоматизированной обработки георадиолокационных данных возможно использование таких статистических методов, как дисперсионный и корреляционный анализ. Опыт георадиолокационных зондирований неоднородного массива мерзлых пород и натурные эксперименты показали, что локальные изменения свойств пород проявляются на георадиолокационном разрезе зонами с хаотичным распределением осей синфазности сигналов [5]. Появление подобных сигналов приводит к увеличению такой статистической характеристики, как дисперсия (DX), которая определяет отклонение амплитуд сигналов от средне-

го ожидаемого значения. Анализ особенностей характера изменения значения дисперсии амплитуд сигналов по разрезу позволяет определять тип геологической неоднородности: относительно сглаженное изменение дисперсии определяет слоистую неоднородную структуру, резкие изменения дисперсии соответствуют нарушенной структуре с многочисленными локальными неоднородностями [6].

Корреляционный анализ является оптимальным методом обнаружения сигнала известной формы на фоне белого шума [7]. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при прослеживании осей синфазности георадиолокационных сигналов. При обработке данных, полученных в непрерывном режиме съемки, коэффициент корреляции соседних сигналов, отраженных от одной геологической границы, составляет 0,95–0,99, что позволяет с высокой точностью прослеживать отражающие границы даже в случаях резкого изменения положения на временной оси [8].

Перечисленные выше аномалии георадиолокационных разрезов, связанные с криогенными процессами, могут быть картированы в автоматическом режиме на основе использования указанных статистических методов. В зонах с переотражениями сигналов в георадиолокационных трассах присутствуют сигналы одинаковой формы, на кратных временах задержки и с убывающими амплитудными значениями (закономерность убывания зависит от электрофизических свойств исследуемых горных пород). В этом случае в результате вычисления коэффициента корреляции искомого сигнала-образца по всей длине анализируемой трассы будет присутствовать несколько локальных максимумов, проверка времени задержки которых позволит выявить их кратность и картировать зоны повышенной влажности горных пород. Если в результатах расчета коэффициента корреляции количество максимумов равно 2, то после проведения опережающей проверки последующих трасс (для исключения случайных выбросов) возможно прослеживание обеих осей синфазности. После анализа радиофизических характеристик сигналов временной промежуток между выявленными границами может быть отмечен как пучинистые породы. В случае, когда после расчета коэффициента корреляции количество максимумов равно 1 и время задержки максимума значительно отличается, то после проведения опережающей проверки последующих трасс до возвращения границы на прежний уровень, этот участок следует отметить как пустоту.

Просадочные деформации горных пород, проявляющиеся на радарограммах в виде круто наклонных границ, могут быть выявлены посредством вычитания из каждой трассы разреза соседней трассы (данные берутся по абсолютным значениям). Это исключит из георадиолокационного разреза горизонтальные элементы и оставит высокоамплитудные сигналы, имеющие наклонные оси синфазности. Полученный разрез будет содержать наибольшие значения в местах просадки. Для более точного определения участка просадки необходимо рассчитать мощность георадиолокационных сигналов вдоль разреза.

Зоны разуплотнения грунтов на георадиолокационном разрезе отображаются высокоамплитудными, «хаотичными» сигналами, эти участки автоматически можно выделить по высоким значениям дисперсии амплитудных значений сигналов. Так как на подобных участках, как правило, появляются нерегулярные сигналы, которые сильно отличаются по своим радиофизическим характеристикам от сигналов, полученных при зондировании слоистых сред.

Границы талых и мерзлых горных пород, по которым осуществляется сброс поверхностных вод или миграция надмерзлотных вод сезонно-талого слоя, отличаются высокими значениями амплитуд. Для выявления таких границ необходимо отслеживать повышенные амплитудные значения при автоматизированном выявлении осей синфазности георадиолокационных сигналов с помощью расчета коэффициента корреляции.

Алгоритм обработки данных георадиолокационного мониторинга

В благоприятных условиях георадиолокационная съемка может быть оперативно проведена по длинным (в несколько километров) профилям, а при использовании транспортных средств длина профиля ограничена только характеристиками аппаратного и программного обеспечения георадара. Большой объем получаемых георадиолокационных данных требует рационального подхода к созданию алгоритма их обработки. Для выявления указанных выше аномалий георадиолокационного разреза предлагается проводить обработку по алгоритму, представленному на рис. 3.

В начале обработки производится ввод исходных данных:

1. Количество трасс в георадиолокационном разрезе (КТ).
2. Сигнал-образец.
3. Амплитуда сигнала образца (А).
4. Время задержки сигнала-образца (ВЗС).

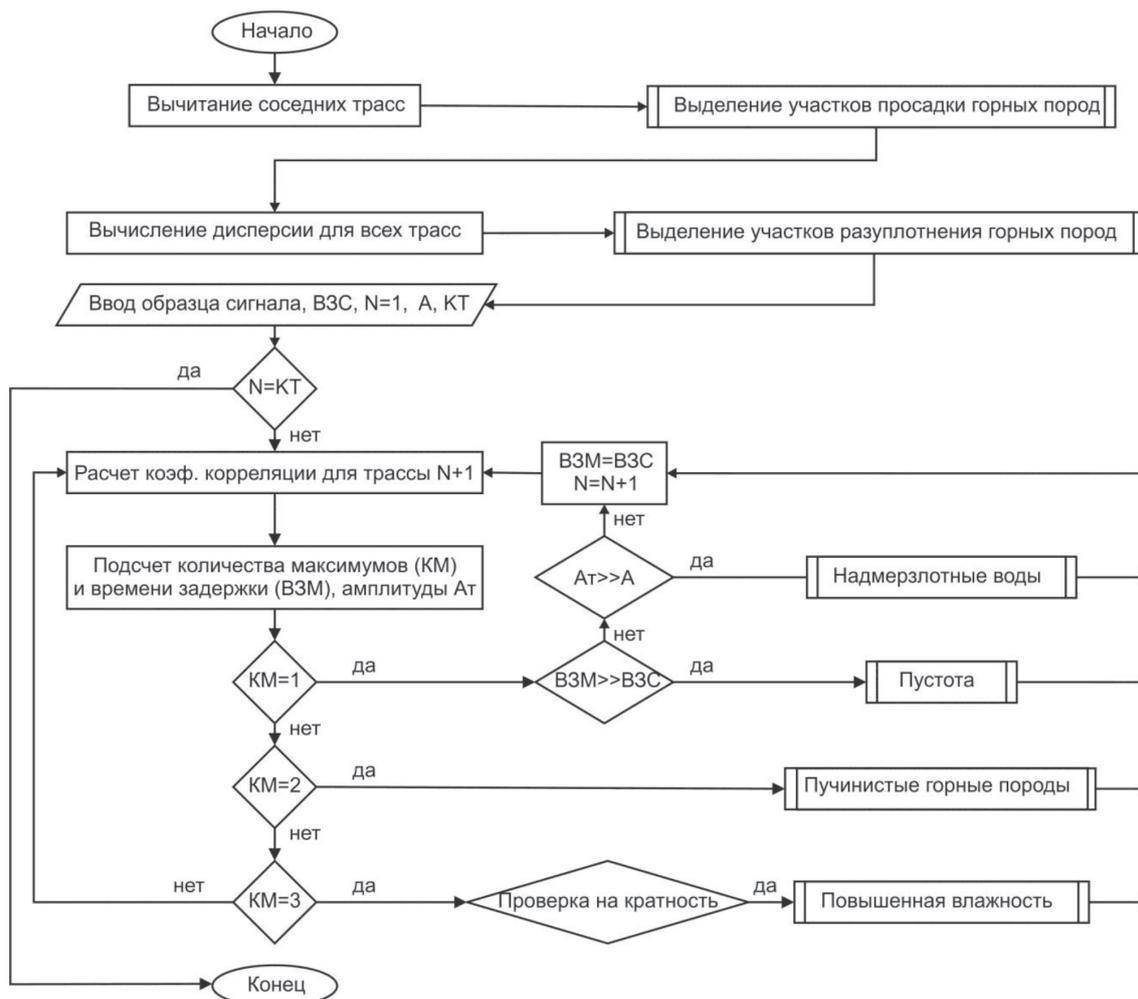


Рис. 3. Блок-схема алгоритма обработки данных аномалий георадиолокационных разрезов при дистанционном мониторинге влажности горных пород

5. Номер обрабатываемой трассы (N). Выполнение первых двух процедур позволяет выявить аномалии г) и д), для определения наличия аномалий остальных типов производится последовательный расчет коэффициента корреляции сигнала-образца со всеми трассами анализируемого георадиолокационного разреза.

Далее анализируется количество максимальных совпадений (КМ), т.е. производится поиск сигналов максимально похожих на образец, при этом регистрируется время задержки для каждого максимума (ВЗМ) и амплитудное значение сигнала (Ат). Наличие остальных аномалий определяется на основе анализа параметра КМ, в соответствии с выявленными амплитудно-временными особенностями георадиолокационных сигналов.

Предлагаемый алгоритм обработки аномалий георадиолокационного разреза до-

полняет ранее разработанное программно-методическое обеспечение [5], как решение подзадачи «Картирование неоднородностей».

Заключение

В результате проведенного анализа особенностей амплитудно-временных характеристик сигналов в зонах аномалий георадиолокационных разрезов установлены признаки их выявления и интерпретации, что позволило в сочетании с существующим программно-методическим обеспечением разработать алгоритмическое обеспечение георадиолокационного мониторинга влажности горных пород криолитозоны. Разработанный алгоритм основан на использовании статистических характеристик (дисперсии и корреляции), расчет которых не требует больших вычислительных мощностей и может быть эффективно использован при обработке больших объемов данных.

Список литературы

1. Основы информационно-программного обеспечения георадиолокационных исследований состояния грунтов автострад криолитозоны в режиме мониторинга / Л.Л. Федорова [и др.] // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2015. – № 30 – С. 325–332.
2. Исследование изменения параметров георадиолокационных сигналов в процессе оттайки мерзлых дисперсных горных пород различной влажности / Л.Л. Федорова [и др.] // Наука и образование. – 2016. – № 3 – С. 42–46.
3. Программно-методическое обеспечение георадиолокационного мониторинга криогенных процессов в подповерхностных грунтах / Л.Л. Федорова [и др.] // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2016. – № 8 (Спец. вып. 21). – С. 154–163.
4. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов.– Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. – 607 с.
5. Георадиолокационное картирование структурных неоднородностей массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны / Л.Л. Федорова [и др.] // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – № 11. – С. 267–273.
6. Fedorova L.L., Sokolov K.O., Savvin D.V., Fedorov V.N. GPR modeling of placer deposits geological profiles of permafrost zone / GPR-2014: Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, Belgium, June 30 – July 4, 2014. – P. 301–304.
7. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / С. Смит. – М.: Додэка-XXI, 2012. – 720 с.
8. Стручков А.С. Способ автоматического выделения границ раздела слоев на георадиолокационном разрезе массива многолетнемерзлых горных пород // ЭРЭЛ-2016: материалы Всерос. конф. научной молодежи (Якутск, 1–25 ноября 2016 г.). – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2016. – С. 258–260.