

УДК 622:55:621:96

ИЗУЧЕНИЕ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «МАЯТ» НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Федорова Л.Л., Соколов К.О., Саввин Д.В.

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru

Повышение эффективности разработки россыпных месторождений полезных ископаемых может быть осуществлено за счет более детального изучения геологических условий таким дистанционным и оперативным геофизическим методом, как георадиолокация. В настоящее время аппаратное и методическое обеспечение георадиолокации развивается, и для увеличения полноты извлечения полезной информации и оперативности обработки данных в настоящей работе предлагается использовать современные методы анализа данных. Представлен опыт применения методов статистического и частотно-временного анализа при обработке и интерпретации данных георадиолокационных исследований геологического разреза россыпных алмазоносных месторождений Якутии. Построены структурно-георадиолокационные модели и по результатам моделирования показано, что повышение значений дисперсии амплитуд георадиолокационных сигналов по разрезу позволяет выделять границы реликтовых водотоков, участки валунных включений, зоны повышенной трещиноватости коренных пород. Применен метод вейвлет-анализа для обработки данных площадных георадиолокационных зондирований с целью картирования разрывных нарушений. В качестве критерия их выявления использовано соотношение (K) высоких и низких частот вейвлет-спектра георадиолокационных сигналов. Высокие значения соотношения (K) характерны для слоистых сред, а низкие для горных пород с высоким затуханием электромагнитной энергии. По результатам проведенных расчетов построены карта аномалий участка «405» месторождения «Маят» и 3D представление расчета соотношения (K). Использование разработанных методик обработки данных георадиолокационных исследований в комплексе с геологическим опробованием позволит оптимизировать объемы разведочной сети и технологию отработки месторождений посредством селективной выемки продуктивных песков.

Ключевые слова: георадиолокация, россыпное месторождение, криолитозона, неоднородность, дисперсия, вейвлет-анализ, интерпретация, методика обработки

THE STUDY OF THE GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE DEPOSIT «MAYAT» ON THE BASIS OF MODERN METHODS OF GPR DATA

Fedorova L.L., Sokolov K.O., Savvin D.V.

Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru

Improving the efficiency of development of placer deposits of minerals it can be accomplished through a more detailed study of the geological conditions in such a remote and operational geophysical method as georadar. Currently, hardware and methodological support GPR developed and to increase the completeness of extraction of useful information and speed data in this paper, we propose the use of modern methods of data analysis. Experience in the application of statistical methods and time-frequency analysis in the processing and interpretation of GPR data studies of the geological section of diamond placer deposits in Yakutia. Built-GPR structural models and simulation results show that the increase in the section amplitude variance values GPR signals allows you to select relic border watercourses, sections of boulder inclusions, zones of increased fracturing of bedrock. Applying wavelet analysis method to data Areal GPR soundings to map faults. As a criterion used to identify their ratio (K) of high and low frequency wavelet spectrum GPR signals. The high values of the ratio (K) characteristic for layered media, and lower for rocks with high attenuation of electromagnetic energy. The results of the calculations are built card «405» area anomalies field «Mayat» and 3D representation of the calculation of the ratio (K). Using the developed GPR survey data processing techniques in conjunction with the testing of geological exploration will allow to optimize the volume of network technology and mining of deposits through selective mining productive sands.

Keywords: GPR, placer deposit, permafrost, heterogeneity, variance, wavelet analysis, interpretation, methods of processing

Успешная разработка россыпных месторождений полезных ископаемых в первую очередь зависит от точности локализации мест, где возможно скопление добываемых минералов. Для поиска этих зон применяют электроразведку, а также магнитную съемку и сейсморазведку [1, 9, 10]. Эти геофизические методы трудоемки и не всегда способны предоставить данные с требуемой детальностью. Более перспективным для подобных исследований геофизиче-

ским методом является георадиолокация, которая позволит выявить и картировать зоны возможной концентрации полезных ископаемых, благодаря небольшой мощности рыхлых отложений на россыпях криолитозоны и невысокому значению затухания электромагнитной энергии в них [3, 5]. Вместе с тем масштабы применения георадиолокации существенно ограничиваются сложностью обработки больших объемов данных для детального изучения строения

массива мерзлых горных пород. Известные программные средства обработки георадиолокационных данных не позволяют в полной мере и в автоматическом режиме использовать амплитудно-временные характеристики сигнала, несущие полезную информацию как о строении, так и о состоянии геологической среды. Для повышения полноты извлечения полезной информации и оперативности обработки данных в настоящей работе предлагается использовать современные методы анализа данных, которые позволят значительно расширить область применения георадиолокации.

Исследование структурных неоднородностей массива горных пород на основе дисперсии амплитуд георадиолокационных сигналов

Обзор исследований россыпных месторождений Якутии показал, что в генетическом плане выделяются в основном аллювиальные месторождения. Глубина залегания плотика таких месторождений в среднем находится в пределах 6–12 м. Одним из главных факторов образования этих россыпей является эрозионно-аккумулятивная деятельность речных потоков, которые размывают коренные породы, переносят обломочный материал и отлагают его в речных долинах. Исходя из условий формирования россыпи, в качестве зон, перспективных для разработки, отмечают такие особенности строения, как палеорусла, западения плотика, валунистость и т.д., в которых преимущественно происходит концентрация полезных минералов.

При прохождении сверхширокополосного георадиолокационного импульса в среде на его характеристики влияют различные параметры (влажность и плотность горных пород, форма, размеры, взаимное расположение и ориентация минеральных зёрен или частиц и т.п.), которые отражаются на таких электрофизических свойствах пород, как диэлектрическая проницаемость и электропроводимость. При формировании георадиолокационной трассы от них зависят значения амплитуд сигналов, время задержки и частотный состав регистрируемых сигналов.

На основе разработанного в лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН программно-методического обеспечения построены структурно-георадиолокационные модели включающие неоднородности горного массива: палеорусло (рис. 1, а) и зона валунистости (рис. 1, б). Для упрощения

расчетов моделирования принято, что влияние электропроводимости невелико (10^{-2} – 10^{-7} См) [4]. Этот случай соответствует использованию низкочастотных георадаров (50–100 МГц) при изучении мерзлых горных пород, что позволяет не учитывать в теоретических расчетах затухание электромагнитной энергии. Расчеты проведены для различных вариантов диэлектрической проницаемости горных пород, определенных по литературным источникам. На рис. 1, а представлена модель с чередованием слоев мощностью от 0,7 до 1,8 м ($\epsilon_{1;3;5;7} = 6$; $\epsilon_{2;4;6;8} = 5$), при этом слой 6 в расчетах замещается на характерные по параметрам (размер, состав, количество границ) слой глины ($\epsilon_{\text{гл}} = 12$) и слой разнородных песков ($\epsilon_{\text{п}} = 9$), указывающих на специфические условия осадконакопления в части реликтовых водотоков. На рис. 1, б показана модель с замещением слоя 4 на глыбовые и валунные отложения ($\epsilon_{\text{гтв}} = 8$ –12) в западении плотика.

При зондировании нарушенных и неоднородных структур в трассах регистрируются сигналы, являющиеся результатом переотражений, связанных с увеличением количества отражающих границ. В результате расчетов обосновано, что локальные изменения свойств пород проявляются на георадиолокационном разрезе зонами с хаотичным распределением осей синфазности, которые используются в качестве информационных сигналов (рис. 1, в, г). Наличие подобных сигналов приводит к увеличению такой статистической характеристики, как дисперсия, которая показывает отклонение энергии сигналов от среднего ожидаемого значения. При этом появление новых границ в разрезе влияет на крутизну изменения дисперсии, величина которой зависит от количества хаотично распределенных сигналов в выбранном временном окне для ее расчета. Анализ особенностей характера изменения значения дисперсии амплитуд сигналов по разрезу позволяет определять тип геологической неоднородности. Относительно сглаженное изменение дисперсии соответствует слоистой структуре, а хаотично-распределенное изменение дисперсии – нарушенной структуре с локальными неоднородностями.

На рис. 2, а показан георадиолокационный глубинный разрез участка «405» месторождения «Маят». По данным бурения коренные породы участка исследований представлены доломитами, в верхней части сильно трещиноватыми. Перекрывающие породы сложены илами, песчаными

и суглинистыми отложениями (рис. 2, а – скв. 4 и 5.5). После предварительной обработки по разрезу выделяется интервал глубин с характерными амплитудно-временными изменениями георадиолокационных сигналов. Во временном окне, определенном по параметрам отраженных сигналов, соответствующий глубинам 15–20 м, произведен расчет дисперсии сигналов.

По результатам оценки единичного профиля построен график значений дисперсии

(рис. 2, б). Установлено, что максимальные значения дисперсии выделяются в пределах $\Delta L_1 = 280\text{--}460$ м по разрезу профиля. Увеличение значений дисперсии на графике связано с повышением количества хаотично отраженных сигналов, что свидетельствует о нарушенности слоистой структуры участка исследований. Данные разведочного бурения позволили заверить выявленные аномалии (рис. 4, а) и подтвердили результаты их интерпретации, как нарушенные коренные породы.

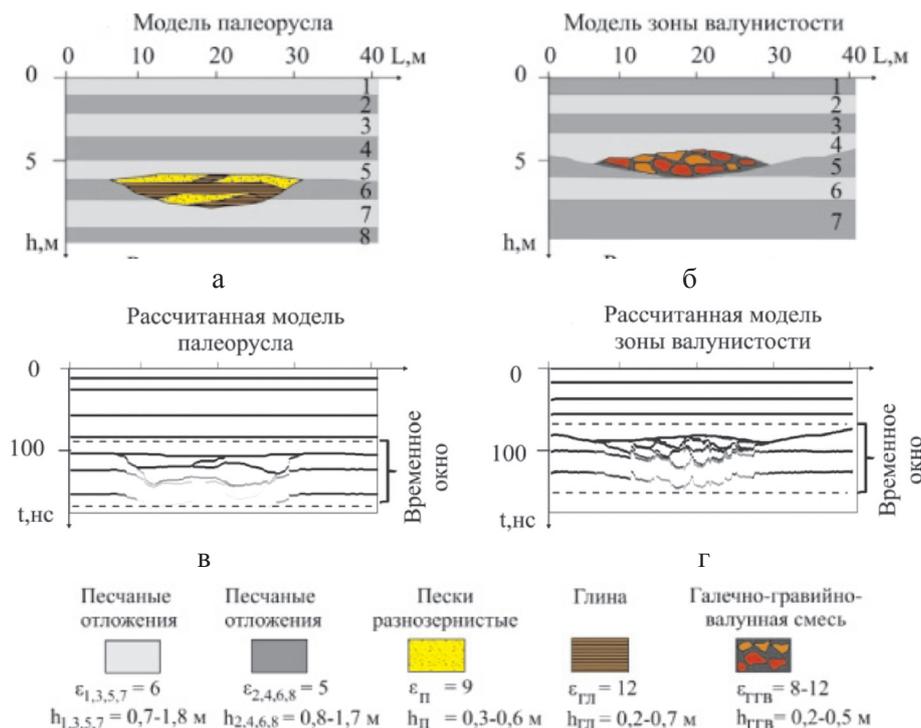


Рис. 1. Структурно-георадиолокационное моделирование неоднородностей горного массива: а, б – модели условных разрезов, имитирующих палеорусло, зону валунистости; в, г – графическая численная модель зон слоистой и хаотичной структуры

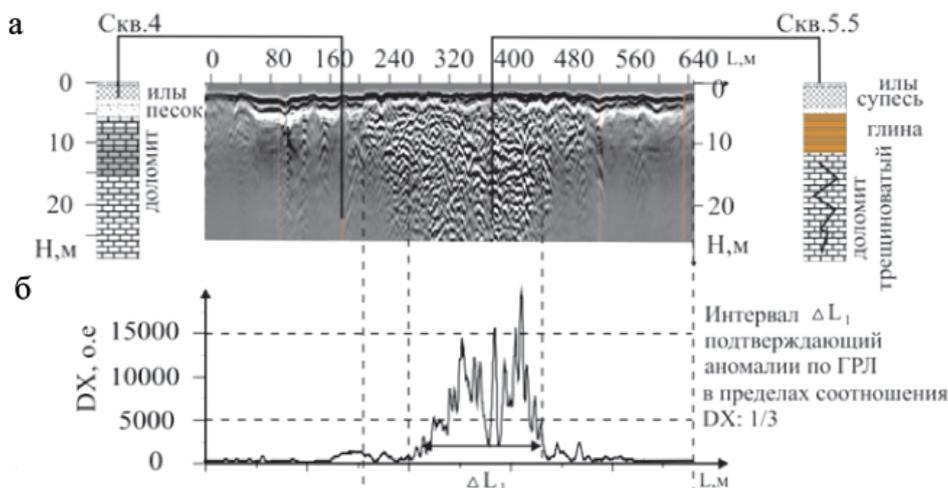


Рис. 2. Пример георадиолокационного разреза (а) и результата расчета дисперсии георадиолокационных сигналов (б)

**Применение вейвлет-анализа
для выявления фрагментов разломов
по данным георадиолокации**

Объектами георадиолокационного изучения на россыпных месторождениях криолитозоны являются также зоны нарушенных пород (эрозионно-тектонического типа), карстовые явления с осложненной поверхностью плотика, с разрушенной кровлей коренных пород и т.д. Из них наиболее интересны карстовые полости, которые могут содержать породы с очень высокой концентрацией полезного компонента, однако, распределение его крайне неравномерное, а форма образуемой россыпи весьма сложна. В зонах разрывных нарушений подобные карстовые формы могут создавать уникальные россыпные месторождения, как по запасам, так и по содержанию [2]. Карстовые явления успешно изучаются методом георадиолокации, но для россыпных месторождений, приуроченных к разрывным нарушениям, необходимо знать местоположение и направление простирания разломов, чтобы эффективно проводить поиски и разведку полезных ископаемых. Для выявления и картирования сложнопостроенных промежуточных коллекторов в зонах разломов и в различных палеопотоках по данным георадиолокации необходимо определить признаки наличия разрывных нарушений на георадиолокационном разрезе и разработать способы их картирования в трехмерном приближении по данным площадной съемки.

Как следует из данных, представленных в [6–8], георадиолокационные трассы, полученные при зондировании пород внутри разлома, имеют более низкочастотный

спектр и меньшие амплитуды сигналов, что объясняется отсутствием четких отражающих границ и наличием большого количества глинистых частиц, в которых интенсивно поглощаются высокие частоты, смещая спектр в область низких частот.

Анализ георадиолокационных данных зондирования участка «405» месторождения «Маят» на основе непрерывного вейвлет-преобразования показал, что основная часть энергии сигналов, полученных вне зоны разлома, находится в области частот около 40 МГц, а в сигналах из зоны разлома энергия распределена в диапазоне от 20 до 45 МГц. Можно условно разделить вейвлет-спектр на две части, высокочастотную от 30 до 50 МГц, куда попадают сигналы, имеющие строение, типичное для слоистых сред, и на низкочастотную от 10 до 30 МГц, характерную для сигналов из зоны разлома. Так как вследствие разнообразного наложения сигналов, помех и шумов во всех трассах могут присутствовать частоты из обоих указанных интервалов, то предлагается оценивать каждую трассу отношением энергии всего спектра к энергии низкочастотной части спектра. Таким образом, чем больше это соотношение, тем больше в трассе сигналов, характерных для слоистой структуры. Его уменьшение показывает преобладание в спектре низких частот, указывающих на повышение электропроводности изучаемых пород и увеличение поглощения электромагнитной энергии в них.

На рис. 3, а представлен фрагмент георадиолокационного разреза, во временном интервале 200–400 нс (глубина 10–20 м при $\epsilon = 9$), на котором присутствуют сигналы, отраженные от слоистых структур

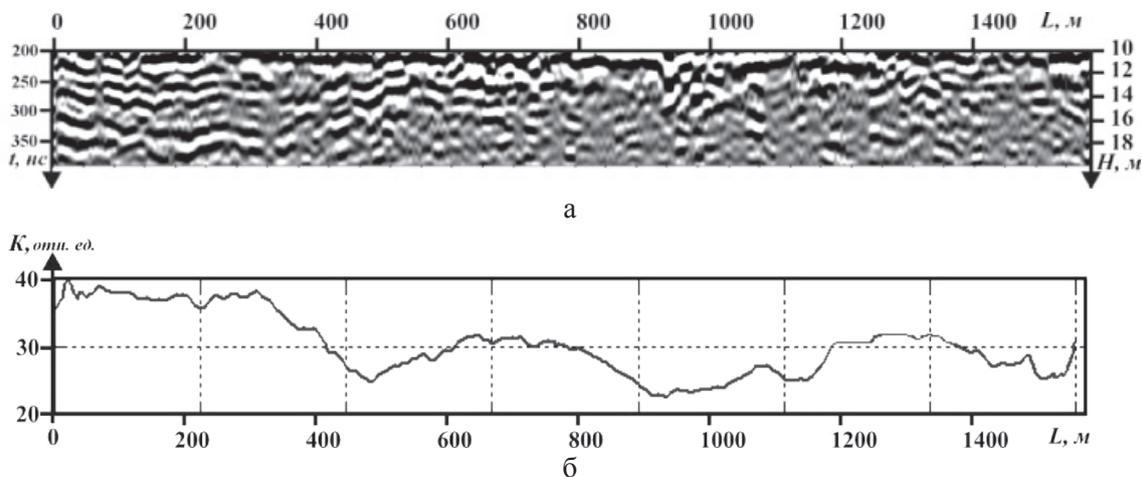


Рис. 3. Фрагмент георадиолокационного разреза (а) и его оценка на основе результатов расчета непрерывного вейвлет-преобразования (б)

(0–300 м по профилю) и область зоны разлома (300–1600 м). Расчет соотношения (K) энергий высоких и низких частот (рис. 3, б) показал, что в области ненарушенных пород значения оценки находятся в интервале 37 ± 3 отн. ед., в остальной части разреза значения составляют 28 ± 4 отн. ед., что позволяет уверенно определять зоны со слоистой структурой. Расчет производился в Matlab R2010a, с использованием вейвлета 'gaus2' и сглаживания результатов по алгоритму скользящего среднего для устранения мелких осцилляций.

Результаты обработки данных георадиолокационных зондирований месторождения «Маят» на примере участка «405»

По результатам ранее проведенных прогнозно-поисковых работ территория, в пределах которой расположен участок «405», была отнесена к перспективным на обнаружение промышленных объектов россыпного генезиса. По данным магниторазведки была выявлена область, содержащая объекты эрозионно-карстового и эрозионно-тектонического типов. Природа выявленной области связана с Догой-Куойкским (ДК) региональным разломом и с его ближайшей зоной динамического влияния, которая в свою очередь расположена в зоне Эбелях-Уджинского (ЭУ) регионального разлома субмеридионального направления. Внутриразломные зоны являются промежуточными коллекторами, аккумулируя россыпи.

Георадиолокационная съемка площади 2×2 км, через 100 м, на участке «405» была проведена георадаром ОКО-2М с АБ-150 и АБДЛ «Тритон». В результате обработки

данных площадных измерений выделены четыре (I–IV) аномальные зоны с повышенными значениями дисперсии амплитуд георадиолокационных сигналов (рис. 4, а), которые соответствуют объектам эрозионно-карстового типа. По результатам расчета соотношения энергий (K) были картированы фрагменты ДК и ЭУ разломов (рис. 4, б).

Заключение

По результатам экспериментальных исследований больших объемов данных георадиолокации, подтвержденных бурением, обоснована возможность повышения точности и информативности оценки строения горного массива россыпных месторождений криолитозоны (на примере месторождения «Маят») методом георадиолокации. На основе данных моделирования распространения, георадиолокационных сигналов и результатов экспериментальной георадиолокации, подтвержденных данными опробования определены признаки выявления зон структурных неоднородностей (зон повышенной трещиноватости, валунных включений, границ реликтовых водотоков и т.д.) на основе анализа дисперсии амплитудно-временных характеристик георадиолокационных сигналов. Анализ результатов вейвлет-преобразования георадиолокационных данных позволил оценить строение геологического разреза (слоистое или нарушенное) и электропроводность слагающих его пород, на основе соотношения энергий низких и высоких частот (K). Эта информация позволяет создать алгоритм автоматического картирования участков пород, в которых отсутствует слоистая структура и наблюдается повышенное затухание электромагнитной энергии, что характерно для

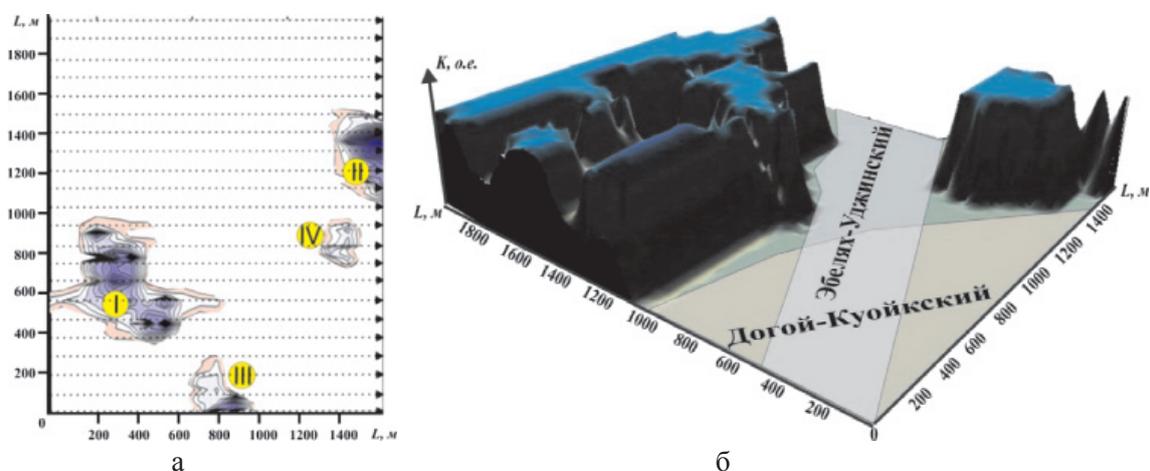


Рис. 4. Результаты георадиолокационных исследований участка «405»: а – карта аномалий; б – 3D представление расчета соотношения K

пород, слагающих внутриразломное пространство.

В результате реализации георадиолокационных исследований в комплексе с геологическим опробованием появляется возможность оптимизировать объемы разведочной сети и технологию отработки месторождений посредством селективной выемки продуктивных песков.

Работа выполнена частично в рамках проекта РФФИ № 15-45-05119.

Список литературы

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач. – М.: GDS Production, 1998. – 81 с.
2. Лунев Б.С., Наумова О.Б. Атлас геологии россыпей. Том первый. Факторы россыпеобразования. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2005. – 344 с.
3. Ним Ю.А. Электромагнитная импульсная модель технологии поисков и картирования россыпных месторождений криолитозоны // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы докл. Всероссий. конф. (Якутск, 6–8 апреля 2016 г.). – Якутск, 2016. – С. 587–598 с.
4. Омеляненко А.В., Федорова Л.Л. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.
5. Финкельштейн М.И. Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпунин, В.А. Кутев. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.
6. Avila-Olivera J.A., Garduño-Monroy V.H. GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico // Engineering Geology. – 2008. – Vol. 100, № 6. – P. 69–81.
7. Ercoli M., Pauselli C., Frigeri A., Forte E. «Geophysical paleoseismology» through high resolution GPR data: A case of shallow faulting imaging in Central Italy // Journal of Applied Geophysics. – 2013. – Vol. 90, № 3. – P. 27–40.
8. Shokouhi, P, Gucunski, N, Maher, A. Application of Wavelets in Detection of Cavities Under Pavements by Surface Waves // Journal of the Transportation Research Board. – 2003. – Vol. 1860, № 1. – P. 57–65.
9. Smith R. Electromagnetic Induction Methods in Mining Geophysics from 2008 to 2012 // Surveys in Geophysics. – 2014. – Vol. 35, № 3. – P. 123–156.
10. Robert F. Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types, Ore Deposits and Exploration Technology // Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration (Toronto, Sept 9 to 12, 2007). – Toronto, 2007. – P. 691–711.