

УДК 550.8.056

ГРНТИ 37.31.15

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАДИО-ТЕПЛОВИЗОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОИСКА ЗАЛЕЖЕЙ ЛИТИЕВЫХ РУД

Авторы:

Степченко Владимир Николаевич
Главный инженер. Главный конструктор
<https://orcid.org/0000-0001-6161-8160>,

Родна Валентина Антоновна
Главный геолог
<https://orcid.org/0000-0003-4880-7009>,

Соавторы:

Багрянцев Владимир Анатольевич
Заместитель директора по новым технологиям
<https://orcid.org/0000-0003-3835-4106>,

Шель Владимир Алексеевич
Ведущий инженер-разработчик гео-информационных систем и технологий
<https://orcid.org/0000-0001-5772-2811>
volfersmail@gmail.com

"Специальный Центр Аэрокосмических Технологий 'Центавр'",
пр. Д. Яворницкого 81, оф. 12, г. Днепр, Украина.

***Аннотация:** Рассмотрены возможности метода Радиотепловизорной Технологии для поиска залежей литиевых руд на примере Полоховского месторождения Полоховского кристаллического массива. На геотермических разрезах показана вертикальная геологическая структура (интрузия) главного рудного тела, содержащего литий и другие сопутствующие элементы. Отслежено глубинное происхождение рудных залежей литиевых месторождений, связь столбообразных рудных структур с аплит-пегматитовыми гранитами.*

***Abstract:** The possibilities of the method of Radio-Thermal Imaging Technology for the search for deposits of lithium ores are considered on the example of the Polokhovsky deposit of the Polokhovsky crystalline massif. Geothermal sections show the vertical geological structure (intrusion) of the main ore body containing lithium and other associated elements. The deep origin of ore deposits of lithium deposits, the connection of pillar-like ore structures with aplite-pegmatite granites are traced.*

Ключевые слова: Радио-Тепловизорные Технологии, дистанционное зондирование Земли, электромагнитное излучение, радиояркостная температура, аэрокосмические снимки, Земная кора, терморазведка, горные породы, геотермические аномалии, геотермические разрезы, геологические структуры, рудные залежи, литий, пегматиты.

Keywords: Radio-Thermal Imaging Technologies, Earth remote sensing, electromagnetic radiation, radio brightness temperature, aerospace imagery, Earth's crust, thermal exploration, rocks, geothermal anomalies, geothermal sections, geological structures, ore deposits, lithium, pegmatites.

Введение

Метод Дистанционного Зондирования Земли (ДЗЗ) Радио-Тепловизорной Технологии (РТТ), применительно к геологии, можно использовать для поиска подземных водных, углеводородных и рудных ресурсов. Поиск залежей литиевых руд, в настоящее время является актуальным.

По разведанным запасам и прогнозным ресурсам лития Украина может считаться самой богатой в Европе. Литий – литофильный элемент, типичный для гранитных магм. Кларк лития в земной коре составляет $2,2 \cdot 10^{-3}$ %. Чаще всего он накапливается в позднемагматических образованиях с большим количеством летучих компонентов – пегматитах [6]. Редкометальные гранитные пегматиты являются основными источниками промышленной добычи лития.

Одно из самых крупных месторождений в Европе – Полоховское (Кировоградская область, Маловисковский район), расположенное в западной части Ингульського мегаблока Украинского щита. В геологическом отношении – в пределах нижнепротерозойской синклинали, которая обрамляет с запада и юго-запада Корсунь-Новомиргородский плутон. В металлогеническом отношении площадь Полоховского месторождения находится в пределах Шполян-Ташлыкского рудного района. Открыто месторождение в 1990 году ГРЭ № 47 КП “Кировгеология”. Рудная минерализация связана с петалит- и сподумен- содержащими пегматитами

протерозойского возраста [9]. Прогнозные ресурсы месторождения — не менее 180 тыс тонн оксида лития [7]. Это месторождение и было использовано как тестовый участок для отработки метода РТТ с дальнейшей целью геологического поиска аналогичных месторождений на других территориях.

В мире существует множество разведанных месторождений, большинство из них расположено на территориях Чили, Аргентины, Китая и Австралии, значительная часть залежей находятся в труднодоступных местах. Все известные месторождения и проявления лития в Украине связаны с редкометальными пегматитами, распространенными в пределах западных частей Ингульского и Приазовского мегаблоков Украинского щита, который является уникальной редкометальной провинцией. А Кировоградский рудный район выделен учеными (Старостенко В.И., Гинтова О.Б., 2014 [10]) как палеопротерозойский центр коро-мантийного интрузивного магматизма и рудообразования.

В настоящее время спрос на литий растет. Его используют в мобильной электронике, при производстве литиевых аккумуляторов, применяемых в авиации и автомобилестроении и других отраслях. С появлением новых технологий цены на «белую нефть» значительно выросли. В 1990-х годах литий стартовал с 1,5 тыс. дол за тонну, а в 2017 году достиг 20 тыс. дол за тонну. Отличительной чертой почти всех месторождений лития является их комплексность: из редкометальных пегматитов, кроме лития, извлекают тантал, ниобий, рубидий, цезий, олово, бериллий [8].

Глубинные факторы формирования месторождений лития и сопутствующих металлов на верхних структурных горизонтах земной коры из мантийных рудогенных компонентов [3] позволяет использовать метод РТТ для пространственного картирования рудных залежей, металлогенического районирования, прослеживания редкометального оруденения по глубине, определения глубинных источников минерализации металлов.

Радиотепловые дистанционные методы исследований изучаются учеными во всем мире более 70 лет. Начиная с 1960 г. применяются для решения прикладных задач, в том числе для изучения поверхности Земли [13] "Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Том 1. С.20-26 (Шарков Е.А. 2014)".

В качестве исходных данных использовалась информация, полученная со спутников Земли в радиотепловом диапазоне электромагнитных волн. Интерпретация термодинамических аномалий выполнялась с использованием результатов геологических поисково-разведочных работ, в том числе данных буровых скважин по материалам ДНВП «Гоінформ України» [7], а также результатов исследований ученых: Бакаржиева А.Х. и др., 2005 [1], Иванова Б.Н. и др., 2011 [3], Калашника А.А., 2015, 2016 [4, 5], Курило С.И. и др., 2018 [6], Старостенко В.И., Гинтова О.Б., 2014 [10], Усенко О.В., 2013 [12]. Для обработки спутниковых снимков использовался программный комплекс собственной разработки.

Метод Радио-Тепловизорной Технологии

Метод Радио-Тепловизорной Технологии является пассивным методом Дистанционного Зондирования Земли (ДЗЗ), основанный на регистрации излучаемой тепловой энергии, которая представлена непрерывным спектром электромагнитных волн и выражается физическим параметром - радиояркостьная температура [$T_{я}$].

Интенсивность собственного излучения, как в оптическом, так и радиодиапазоне, в соответствии с приближением Рэля-Джинса и законом Кирхгофа, характеризуется яркостью температурой [$ЯТ$] $T_{я}$. Для радиодиапозона электромагнитных волн - является радиояркостьной температурой. Определяется произведением коэффициента излучения [$КИ$] к среды на ее эффективную температуру [$ЭТ$] $T_{э.т}$. То есть, измеряется радиояркостьная температура: $T_{я}=кT_{э}$

Отличие метода РТТ от других методов ДЗЗ заложено в алгоритме обработки спутниковых материалов в получение контраста радиоярких температур $[\Delta T_{\text{я}}]$, и как следствие – суммарной плотности теплового потока, позволяющего рассчитать все неоднородности Земной коры. Технология позволяет аппроксимировать достаточное множество точек, несущих исходную априорную информацию о структурной геологической литологии, повышать контраст температурной чувствительности и разрешающую способность материалов, и как следствие – получать объемную радиотепловизионную тепловую модель исследуемой площади в заданном расчетном масштабе [11] "Basics of Thermal Imaging Technologies and their experience. (Stepchenko V. N. et al. 2018)".

Используются спутниковые снимки в микроволновом диапазоне.

Физика процесса распознавания рудных образований с использованием технологий РТТ.

Тектонические структуры задерживают тепло, которое выделяет мантия и ядро Земли. Энергия теплопереноса происходит посредством электромагнитных волн, которые распространяются (с выделением тепловой энергии) из глубин по направлению от ядра Земли и теряет ее часть на фоне, в том числе рудной составляющей зависящей от коэффициента излучения [КИ]. По величине этих потерь мы можем судить о количестве и качестве рудосодержащих пород. В классическом понимании рудные породы состоят из металлосодержащих компонентов, обладающих собственными коэффициентами излучений (поглощений), поднятых к поверхности Земли из глубин мантии с различных ее горизонтов. На практике мы наблюдаем эти компоненты как потери радиотепловых контрастов на фоне стабильных характеристик радиотепловых геофизических полей вмещающих пород. Эти потери состоят из материалов (золото, хром, литий, платина и др.) и имеют собственные коэффициенты излучения в пределах $[\varepsilon \approx 0.01 \dots 0.08]$. По сравнению с базальтом, у которого этот коэффициент составляет $[\varepsilon \approx 0.7]$. Таким образом, контраст радиояркой температуры, $\Delta T_{\text{я}} = k \Delta T_{\text{с}}$

фиксирует заполнение рудной составляющей более «горячими» золотом, литием, палладием, в сравнение с «прохладными» вмещающими породами: гранит, базальт, глина [$\varepsilon \approx 0.4 \dots 0.95$] (*Таблица 1*).

Таблица 1: Типовые коэффициенты излучения материалов [ε]

Шкала	Качественная цветосинте- зированная шкала	Обозна- чение	Материал / Элемент	Коэффициент излучения (λ = 8..14 μm)	
				Min	Max
0,01		Au	Золото	0.01	0.1
		0,02	Ag	Серебро	0.02
Mg		Магний	0.02	0.1	
Cr		Хром	0.02	0.2	
0,05		Cd	Кадмий	0.02	
		W	Вольфрам	0.03	
0,08		Li	Литий	0.04	0.09
		0,1	Pd	Палладий	0.05
0,1		Cu	Медь	0.05	0.1
		Hg	Ртуть	0.05	0.15
0,1		Fe	Железо	0.05	0.2
		Ni	Никель	0.07	0.08
0,1		Pt	Платина	0.08	
		Mo, Zn	Молибден, Цинк	0.1	
0,5		Al	Алюминий	0.1	0.3
		Be	Бериллий	0.18	
0,5		Sb	Сурьма	0.28	0.31
		Bi	Висмут	0.34	
0,7		Pb	Свинец	0.4	0.43
			Гранит	0.4	
0,9	Ti	Титан	0.5	0,6	
		Базальт	0.7		
0,9		Уголь	0.8	0.9	
		Песок	0.9		
0,95		Вода, Кварц	0.93		
		Глина, Гравий, Мрамор белый	0.95		

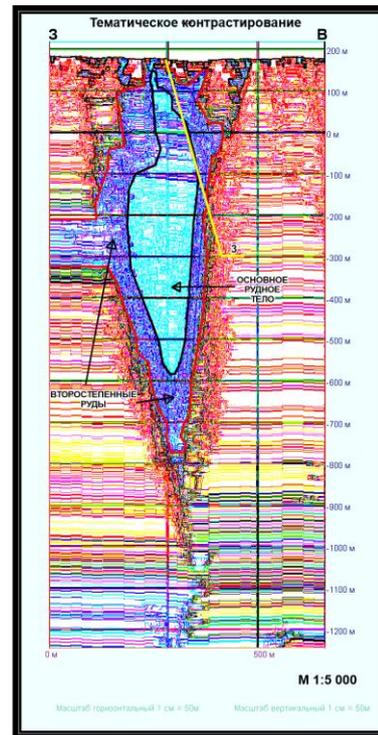
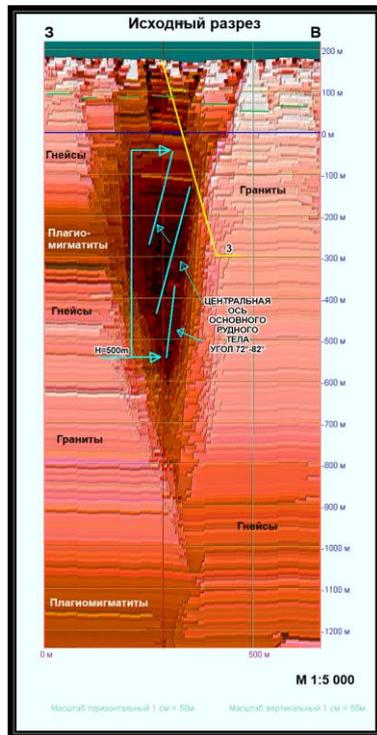
Следует понимать, что горные породы состоят из различных минералов и элементов, что дает сочетание компонентов различных образований, например: слоистую текстуру гнейсов и амфиболитов.

Калибровка модели выполняется для каждого объекта поисков, в зависимости от полезного ископаемого и геолого-тектонических условий региона. В нашем случае калибровка выполнялась по материалам поисково-разведочных работ на Полоховском месторождении, в том числе по данным буровых скважин [1, 7].

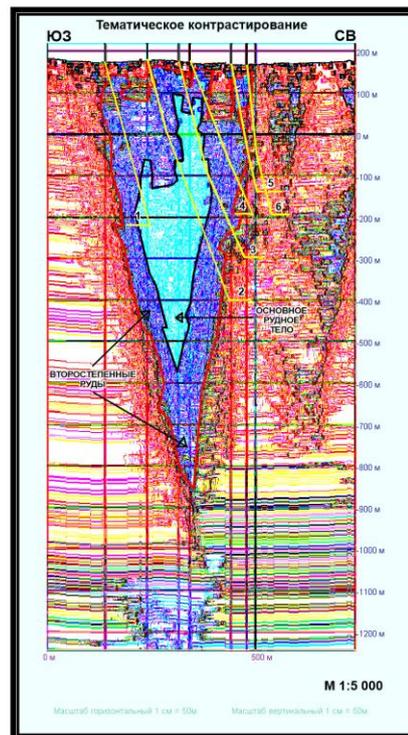
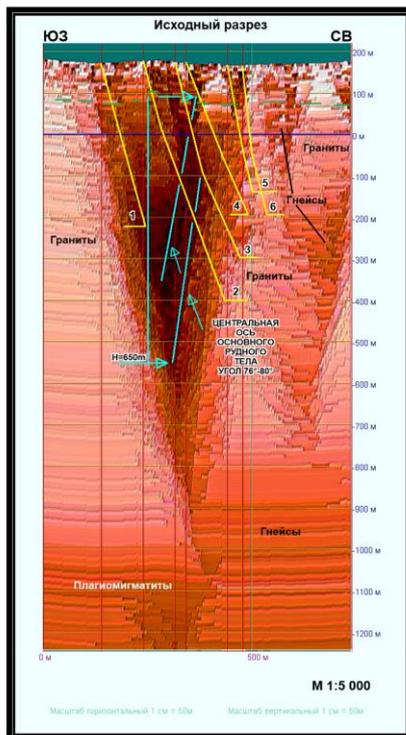
Результаты исследований методом Радио-Тепловизорной Технологии

По результатам исследований методом РТТ в масштабе 1:5 000 (горизонтальный и вертикальный) на площади Полоховского месторождения построен трехмерный куб и 2 вертикальных геотермических разреза: G 09 и 5-5 (*Рисунок 1*). Расположение разрезов показано на *Рисунке 2*. Глубина исследований: до горизонта -1200 м в абсолютных отметках. Линия разреза G 09 W-E направления, линия разреза 5-5 SW-NE направления, совмещенная с геологическим разрезом 5-5. Соответствие номеров скважин на геологическом и геотермическом разрезах показано на *Рисунке 3*. Кроме того, в качестве иллюстрации на *Рисунке 2 (С)* построен горизонтальный срез (слайс) по горизонту +160 м в абсолютных отметках.

А - ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ G 09



В - ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ 5-5



Легенда:

- Линия уровня моря
- Рудное тело главное [Литий]
- Рудное тело второстепенное
- Граница коры выветривания



Линия ствола буровой скважины и ее номер на геотермическом разрезе. Соответствующие номера скважин на геологическом разрезе показаны на Рисунке 3

Рисунок 1: Полоховское месторождение. Вертикальные геотермические разрезы G 09 (А) запад - восток, 5-5(В) юго-запад - северо-восток.

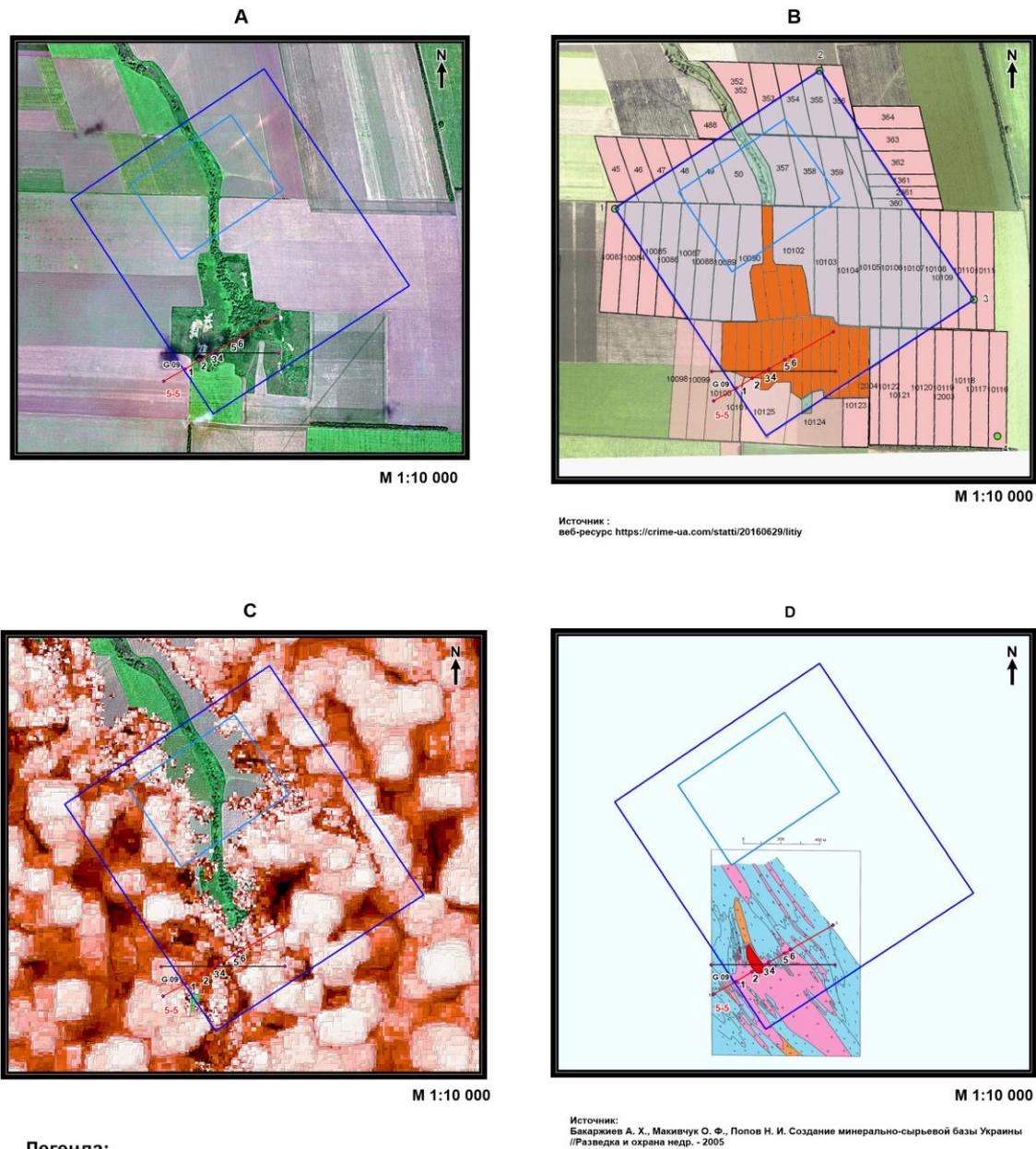


Рисунок 2: Полоховское месторождение. А – линии разрезов на спутниковом снимке, В – линии разрезов на лицензионных участках, С – горизонтальный геотермический срез на отметке +160 м от уровня моря, Д – линии разрезов на геологической карте месторождения.

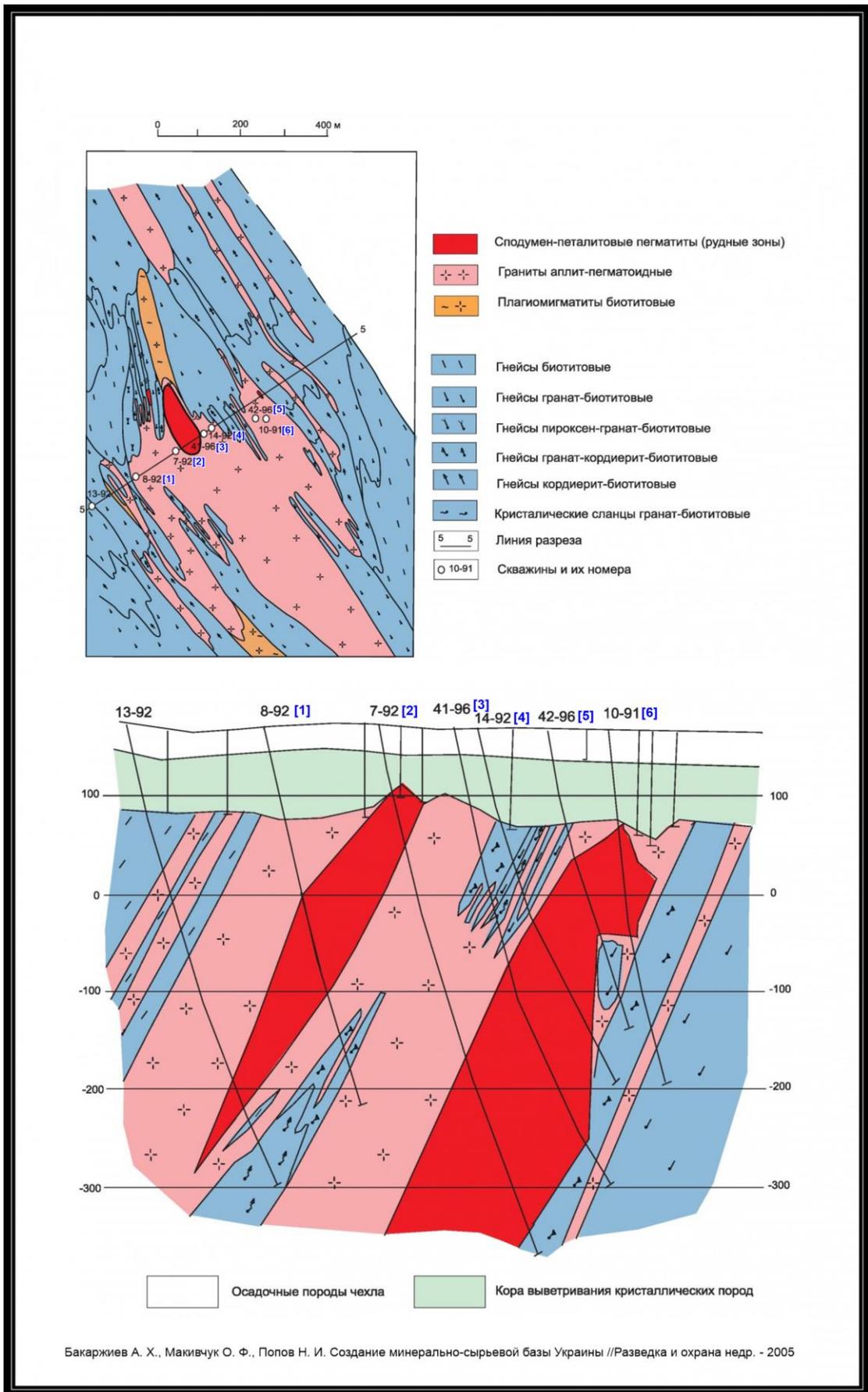


Рисунок 3: Полоховское месторождение. Геологическая карта и геологический разрез по материалам [1].

Главное рудное тело хорошо оконтуривается по результатам спектрального анализа в виде термодинамической аномалии, соответствующей столбообразной залежи, локализованной в лейкократовых аплит-пегматоидных гранитах Полоховского массива. Центральная ось рудного тела падает под углом 72° - 82° , т.е. практически вертикально. Размер по вертикали: 500-650 м, максимальным сечением 150-200 м, в интервале глубин – $+50\div-590$ м (в абсолютных отметках). Нижняя граница оруденения при геологических исследованиях не оконтурена. Основными рудосодержащими попродами являются пегматоидные, аплит-пегматоидные граниты. Вмещающими для них служат метаморфические породы ингуло-ингулецкой серии, среди которых преобладают биотитовые, кордиерит-биотитовые гнейсы и граниты [1, 7]. По периферии залежи выделяются вкрапления руды в пегматитах. Ниже рудного тела зафиксирована дайка (предположительно), что подтверждает глубинный (мантийный) характер формирования залежи. Пространственная близость месторождений урана и лития Ингульского мегаблока отражает проекцию размещения локальных неоднородностей в единой крупной астеносферной ловушке [5]. На горизонтальном срезе (**Рисунок 2 (С)**) по горизонту $+160$ м термодинамические аномалии, соответствующие редкометальной минерализации, зафиксированы и в коре выветривания.

Среднее содержание лития в рудах месторождения 1.17% Li_2O , максимальное - 1.202 - 1.256% . Кроме лития руды месторождения содержат рубидий (0.045%), тантал (0.002%) и ниобий (0.003%). Рудные минералы представлены петалитом, сподуменом, фукситом, холмквиститом при абсолютном преобладании петалита (80 - 90%). Кроме того руды содержат значительные количества микроклина, альбита и кварца [7].

Выводы

Результаты представленной работы позволяют констатировать, что метод ДЗЗ РГТ способен выявлять рудные месторождения, в том числе,

литиевые и других сопутствующих металлов. Это наглядно демонстрируют вертикальные геотермические разрезы (*Рисунок 1*) и горизонтальный срез (*Рисунок 2 (С)*). Анализ полученного 3-D куба на площади, показанной на *Рисунке 2* позволяет сделать следующие выводы:

- глубинная, более 500 метров структура, в виде вертикальной V-образной рудной залежи в поперечнике – близкой к округлой формы;
- центральная ось основного рудного тела находится в пределах близких к углу 80 градусов;
- предполагается формирования рудной залежи из мантийных глубин Земли;
- по коэффициенту излучения элементов геологического разреза и соответствующим спектрам цветовой шкалы (*Таблица 1*) можно предположить, что геологическая структура имеет рудное образование, содержит редкометалльные элементы.

Геологические исследования позволяют выполнить калибровку и интерпретацию модели, уточнить содержание полезных элементов в рудной залежи.

На геотермических разрезах выделена практически вертикальная рудная залежь, содержащая литий на Полоховском рудном поле, что позволяет рекомендовать данный метод для поисков руд лития и сопутствующих металлов на других территориях.

Метод ДЗЗ РТТ является экологически безопасным. Позволяет оптимизировать экономические и экологические риски при проектировании и разработки месторождений.

Список литературы

1. Бакаржиев А.Х., Макивчук О.Ф., Попов Н.И. *Создание минерально-сырьевой базы урана Украины. Разведка и охрана недр*, 2005, №10, с. 50-58 [Bakarzhiev A.Kh., Makivchuk O.F., Popov N.I. *Creation of the uranium mineral resource base in Ukraine. Exploration and protection of mineral resources*. 2005, №10, pp. 50-58. (In Russ.)].

2. Грінченко О.В., Курило М.В., Михайлов В.А. та ін. *Металічні корисні копалини України*. Підручник. Київ. Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», **2006**, стр. 179-184. [Grinchenko O.V., Kurilo M.V., Mikhailov V.A. etc. *Metallic minerals of Ukraine*. Textbook. Kiev. Kyiv University Publishing and Printing Center, **2006**, pp. 179-184. (In Ukr.)]
3. Иванов Б.Н., Косюга В.Н., Погукай В.И. *Площадные и экзоконтактовые редкометальные метасоматиты Шполянско-Ташлыкского рудного района*. Геохімія та рудоутворення, **2011**, вип.30, стр. 10-17. [Ivanov B.N., Kosyuga V.N., Pogukai V.I. *Area and exocontact rare-metal metasomatites of the Shpolyansko-Tashlyk ore district*. Geochemistry and ore formation, **2011** №30, pp. 10-17. (In Russ.)]
4. Калашник А. А. *Глубинные факторы формирования крупных промышленных месторождений лития в редкометальных пегматитах Шполяно-Ташлыкского рудного района Украинского щита. Статья 1. Основные физико-химические свойства элементов парагенезиса руд в редкометальных пегматитах Шполяно-Ташлыкского рудного района и геохимическая характеристика метасоматитов*. Мінеральні ресурси України, **2015**, № 2. [Kalashnik A.A. *Deep factors of formation of large industrial lithium deposits in rare-metal pegmatites of the Shpolyano-Tashlyk ore district of the Ukrainian Shield. Article 1. Basic physicochemical properties of elements of ore paragenesis in rare-metal pegmatites of the Shpolyan-Tashlyk ore region and geochemical characteristics of metasomatites*. Mineral resources of Ukraine, **2015**, № 2. (In Russ.)]
5. Калашник А. А. *Основные факторы металлогенического разнообразия и интенсивного рудогенеза центральной части Украинского щита*. Вестник ВГУ. Серия: Геология, **2016**, № 2. [Kalashnik A.A. *The main factors of metallogenic diversity and intensive ore genesis of the central part of the Ukrainian shield*. VGU Bulletin. Series: Geology, **2016**, № 2. (In Russ.)]
6. Курило С.І., Сьомка В.О., Бондаренко С.М., Степанюк Л.М., Карли З.В. *Літієва мінералізація Інгільського мегаблоку Українського щита*. УДК 55(477) Геологія і корисні копалини України: Збірник тез наукової конференції, присвяченої 100-річному ювілею Національної академії наук України та Державної служби геології та надр України (Київ, 2–4 жовтня 2018 р.) / НАН України, Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка. Київ, **2018**, стр. 265. [Kurilo S.I., Siomka V.O., Bondarenko S.M., Stepanyuk L.M., Karli Z.V. *Lithium mineralization of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield*. Geology and Minerals of Ukraine: Proceedings of the Scientific Conference Dedicated to the 100th Anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Service of Geology and Subsoil of Ukraine (Kyiv, October 2–4, 2018) / NAS of Ukraine, Inst. geochemistry, mineralogy and ore formation. M.P. Semenenko. Kyiv, **2018**, p. 265. (In Ukr.)]
7. Примушко С.І., Білошапська Т.Д., Величко В.Ф., ДНВП «Гоінформ України». *Мінеральні ресурси України. Полохівське родовище літію*. Київ,

- 2014, стр. 68-69. [Primushko S.I., Biloshapska T.D., Velychko V.F., DNVP "Goinform of Ukraine". Mineral resources of Ukraine. Polokhiv lithium deposit. Kyiv, 2014, pp. 68-69. (In Ukr.)]
8. Самойлов В.И., Винокурова Т.А. *Литийсодержащие руды как комплексное сырье, содержащее литий, бериллий, другие редкие и цветные металлы*. Усть-Каменогорск: Медиа – Альянс, 2006, стр. 63-69. [Samoilov V.I., Vinokurova T.A. *Lithium-containing ores as a complex raw material containing lithium, beryllium, other rare and non-ferrous metals*. Ust-Kamenogorsk: Media - Alliance, 2006, pp. 63-69. (In Russ.)]
 9. Сивий М., Паранько І., Іванов Є. *Географія мінеральних ресурсів України : монографія*. Львів: Простір М, 2013, стр. 684. [Syvy M., Paranko I., Ivanov E. *Geography of mineral resources of Ukraine: monograph*. Lviv: Prostir M, 2013, p. 684. (In Ukr.)]
 10. Старостенко В.И., Гинтов О.Б. *Геотектоника, глубинное строение и рудные месторождения Кировоградского рудного района Украинского щита по геофизическим данным*. Mineral. Journal (Ukraine), 2014, 36, No 2. [Starostenko V.I., Gintov O.B. *Geotectonics, deep structure and ore deposits of the Kirovograd ore district of the Ukrainian Shield according to geophysical data*. Mineral. Journal (Ukraine), 2014, 36, No 2. (In Russ.)]
 11. Stepchenko V. N., Bagryancev V. A., Rodnaya V. A. *Basics of Thermal Imaging Technologies and their experience*. World of Geotechnics 2(58)'2018.
 12. Усенко О. В. *Месторождения полезных ископаемых Кировоградского рудного района Украинского щита: связь с глубинным процессом*. Геофизический журнал, 2013, № 6, т.35. [Usenko O.V. *Deposits of minerals of the Kirovograd ore district of the Ukrainian shield: connection with deep process*. Geophysical Journal, 2013, № 6, vol.35. (In Russ.)]
 13. Шарков Е.А. *Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы*. т.1, ИКИ, Москва, 2014, стр. 20-26. [Sharkov E.A. *Radio thermal remote sensing of the Earth: physical bases*. v.1, IKI, Moscow, 2014, pp. 20-26.]
 14. Шутко А.М. *СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов*. Москва. Наука. 1986, стр. 10-11. [Shutko A.M. *Microwave radiometry of water surface and soils*. Moscow. Science. 1986, pp.10-11. (In Russ.)]