



RS Global
Journals

Scholarly Publisher
RS Global Sp. z O.O.
ISNI: 0000 0004 8495 2390

Dolna 17, Warsaw, Poland 00-773
Tel: +48 226 0 227 03
Email: editorial_office@rsglobal.pl

JOURNAL	World Science
p-ISSN	2413-1032
e-ISSN	2414-6404
PUBLISHER	RS Global Sp. z O.O., Poland
ARTICLE TITLE	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАДИО-ТЕПЛОВИЗОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОИСКА РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПАЛЛАДИЯ
AUTHOR(S)	Степченко Владимир Николаевич, Родна Валентина Антоновна, Багрянцев Владимир Анатольевич, Шель Владимир Алексеевич
ARTICLE INFO	Stepchenko W. N., Rodna V. A., Bagryantsev W. A., Shel W. A. (2020) Using of the Method of Radio-Thermal Imaging Technology for the Search for ore Deposits of Platinum Group Metals, Including Palladium. World Science. 7(59). doi: 10.31435/rsglobal_ws/30092020/7197
DOI	https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092020/7197
RECEIVED	19 July 2020
ACCEPTED	27 August 2020
PUBLISHED	02 September 2020
LICENSE	 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License .

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАДИО-ТЕПЛОВИЗОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОИСКА РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПАЛЛАДИЯ

Степченко Владимир Николаевич,

Главный инженер, Главный конструктор, Специальный Центр Аэрокосмических Технологий “Центавр”, г. Днепр, Украина, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6161-8160>

Родна Валентина Антоновна,

Главный геолог, Специальный Центр Аэрокосмических Технологий “Центавр”, г. Днепр, Украина, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4880-7009>

Багрянцев Владимир Анатольевич,

Заместитель директора по новым технологиям, Специальный Центр Аэрокосмических Технологий “Центавр”, г. Днепр, Украина, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3835-4106>

Шель Владимир Алексеевич,

Ведущий инженер-разработчик геоинформационных систем и технологий, Специальный Центр Аэрокосмических Технологий “Центавр”, г. Днепр, Украина, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5772-2811>

DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092020/7197

ARTICLE INFO

Received: 19 July 2020

Accepted: 27 August 2020

Published: 02 September 2020

KEYWORDS

Radio-Thermal Imaging Technologies, Earth remote sensing, electromagnetic radiation, radio brightness temperature, aerospace imagery, Earth crust, thermal exploration, rocks, geothermal anomalies, geothermal sections, geological structures, intrusions, ore deposits, platinum group metals

ABSTRACT

The possibilities of the method of Radio-Thermal Imaging Technology for the search for ore deposits of platinum group metals, in particular - palladium, are considered on the example of the Elansky deposit of the Voronezh crystalline massif. Geothermal sections show a columnar geological structure (intrusion) of a main ore body containing palladium and other platinum group elements. The deep origin of ore deposits of platinoid-copper-nickel-palladium deposits, the connection of ore structures with dikes has been traced.

Citation: Stepchenko W. N., Rodna V. A., Bagryantsev W. A., Shel W. A. (2020) Using of the Method of Radio-Thermal Imaging Technology for the Search for ore Deposits of Platinum Group Metals, Including Palladium. *World Science*. 7(59). doi: 10.31435/rsglobal_ws/30092020/7197

Copyright: © 2020 Stepchenko W. N., Rodna V. A., Bagryantsev W. A., Shel W. A. This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Введение. Метод Дистанционного Зондирования Земли (ДЗЗ) Радио-Тепловизорной Технологии (РТТ), применительно к геологии, можно использовать для поиска подземных водных, углеводородных и рудных ресурсов. Для поиска рудных залежей платиновой группы, в особенности – палладия, послужило недавнее открытие его значительных запасов на Еланском месторождении. (Воронежская область, Россия). Это месторождение и было использовано как тестовый участок для отработки метода РТТ с дальнейшей целью геологического поиска аналогичных месторождений на других территориях.

В докембрийском фундаменте Воронежского кристаллического массива установлены ультрамафит-мафитовые и мафитовые комплексы еланского типа, сформировавшиеся в условиях реактивации позднеархейских структур [7] "Дайки сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Воронежского кристаллического массива (Чернышова М.Н. 2006)". Особое значение имеет пространственное картирование столбообразных интрузий и даек, которые являются важнейшими индикаторами рудных залежей платиноидно-медно-никелевых месторождений, содержащих палладий.

Палладий редкий и дефицитный металл. Его спрос на мировом рынке превышает его добычу. Обладает крайне высокой значимостью не только за счет высокой стоимости, но и благодаря возможностям потенциального использования. Например, в авиации автомобилестроении и военных разработках. Основные обнаруженные запасы расположены в России и Южной Африке.

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 [8] "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 исследований Член-корреспондента РАН Чернышова Н.М. и Чернышовой М.Н. [3-7] "Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения Еланского типа (геология, закономерности размещения, минералогическо-геохимические особенности руд). Геолого-генетическая модель формирования. (Чернышов Н.М. 1998)", "Мамонский и Еланский типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений ВКМ (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2008)", "Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Статья 1. Сульфидные никелевые руды еланского типа месторождений и особенности распределения в них металлов платиновой группы. (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2011)", "Платиноносные и золото-платиноносные формации Воронежского кристаллического массива при различных геодинамических режимах формирования докембрийской литосферы. (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2012)", "Дайки сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Воронежского кристаллического массива. (Чернышова М.Н. 2006)". Для обработки спутниковых снимков использовался программный комплекс собственной разработки.

Метод Радио-Тепловизионной Технологии. Метод Радио-Тепловизионной Технологии является пассивным методом Дистанционного Зондирования Земли (ДЗЗ), основанный на регистрации излучаемой тепловой энергии, которая представлена непрерывным спектром электромагнитных волн и выражается физическим параметром – радиояркостная температура [T_r].

Интенсивность собственного излучения, как в оптическом, так и радиодиапазоне, в соответствии с приближением Рэлея-Джинса и законом Кирхгофа, характеризуется яркостной температурой [Y_T] T_y . Для радиодиапазона электромагнитных волн – является радиояркостной температурой. Определяется произведением коэффициента излучения [КИ] к среды на ее эффективную температуру [ЭТ] $T_{э.т}$. То есть, измеряется радиояркостная температура: $T_y = kT_{э.т}$, [9] "СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов." (Шутко А.М. 1986)".

Отличие метода РТТ от других методов ДЗЗ заложено в алгоритме обработки спутниковых материалов в получении контраста радиояркостных температур [ΔT_r], 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 радио-тепловизионную тепловую модель исследуемой площади в заданном расчетном масштабе [2] "Basics of Thermal Imaging Technologies and their experience. (Stepchenko V. N. et al. 2018)".

Используются спутниковые материалы 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 и др.) и имеют собственные коэффициенты излучения в пределах [$\epsilon \approx 0.01 \dots 0.02$]. По сравнению с базальтом, у которого этот коэффициент составляет [$\epsilon \approx 0.7$]. Таким образом, контраст радиояркой температуры, $\Delta T_{\text{як}} = k \Delta T_{\text{э}}$ фиксирует заполнение рудной составляющей более «горячими» золотом (палладием), в сравнение с «прохладными» вмещающими породами: гранит, базальт, глина [$\epsilon \approx 0.7 \dots 0.95$] (Таблица 1.).

Таблица 1. Типовые коэффициенты излучения материалов [ϵ]

Шкала	Качественная цветосинте- зированная шкала	Обозна- чение	Материал / Элемент	Коэффициент излучения ($\lambda = 8..14 \mu\text{м}$)	
				Min	Max
0,01		Au	Золото	0.01	0.1
		Ag	Серебро	0.02	0.2
Mg		Магний	0.02	0.1	
Cr		Хром	0.02	0.2	
0,05		Cd	Кадмий	0.02	
		W	Вольфрам	0.03	
		Pd	Палладий	0.05	
0,08		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
0,5		Pt	Платина	0.08	
		Mo, Zn	Молибден, Цинк	0.1	
		Al	Алюминий	0.1	0.3
		Be	Бериллий	0.18	
		Sb	Сурьма	0.28	0.31
		Bi	Висмут	0.34	
		Pb	Свинец	0.4	0.43
			Гранит	0.4	
		0,7	Ti	Титан	0.5
		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.

Результаты исследований методом Радио-Тепловизионной Технологии.

По результатам исследований методом РТТ в масштабе 1:5 000 (горизонтальный и вертикальный) на площади Еланского месторождения построен трехмерный куб и 18 вертикальных разрезов с шагом 100 м. Шаг исследований может быть различным, исходя из масштаба исследований, поставленных задач и пространственных размеров картируемых структур в геологическом массиве. Расположение разрезов показано на Рис.3.а. Глубина исследований: до горизонта -3000 м в абсолютных отметках. Линии разрезов G 1 – G 9 W-E направления, линии разрезов V 1 – V 9 S-N направления. В качестве иллюстрации в данной работе приведены вертикальные разрезы G 3 и V 1 (Рис.1., Рис.2.), проходящие через интрузию, которая включает главное рудное тело, содержащее палладий и сопутствующие металлы. Кроме того, построено 3 горизонтальных среза (слайса) по горизонтам: +100 м, -500 м, -2200 м в абсолютных отметках.

Главное рудное тело хорошо оконтуривается по результатам спектрального анализа в виде термодинамической аномалии, соответствующей столбообразной залежи норит-диоритовой фазы. Рудное тело падает на восток под углом 88°. На север - 86°, т.е. практически вертикально. Размер по вертикали: 900-1300 м, сечением 100-300 м в интервале глубин – 120÷-1420 м (в абсолютных отметках). Вмещающие породы: нориты, нориты с ортопироксенитом, диориты, гранодиориты [5] "Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Статья 1. Сульфидные никелевые руды еланского типа месторождений и особенности распределения в них металлов платиновой группы. (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2011)". По периферии залежи выделяются вкрапления руды в норитах и ортопироксенитах. Ниже рудного тела зафиксирована дайка, что подтверждает многофазность интрузии, а глубинный (мантийный) характер формирования залежи хорошо иллюстрируется на горизонтальном срезе (Рис.3.d), где «корень» рудного тела распространяется на глубину -2200 м и более.

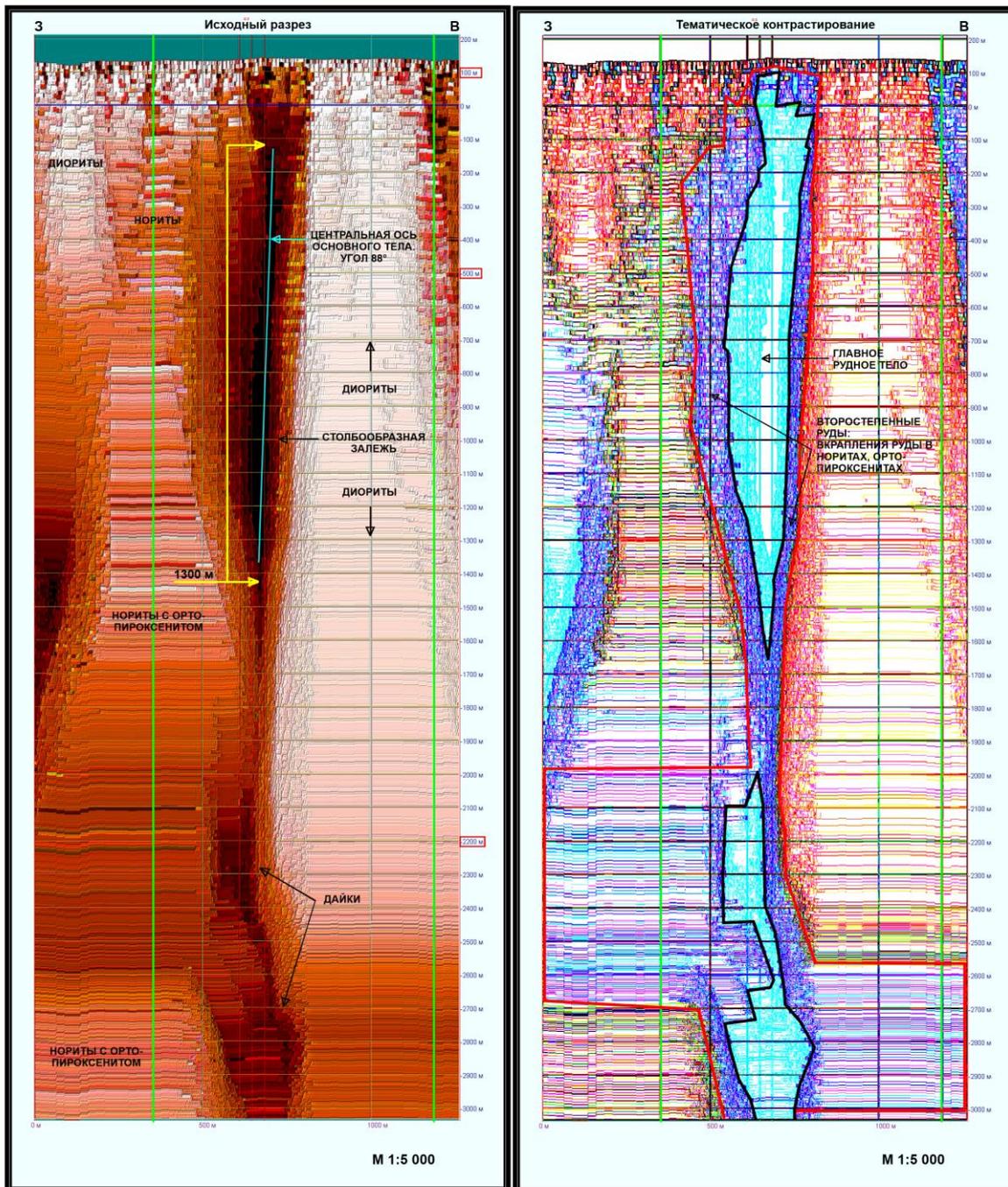
Следует отметить, что столбообразный характер рудных тел и зон Еланского месторождения подтвержден геологическими исследованиями до глубины 1500 м. Содержание Pd по данным [5] "Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Статья 1. Сульфидные никелевые руды еланского типа месторождений и особенности распределения в них металлов платиновой группы. (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2011)" составляет 0,031-1,14 г/т. Важнейшие рудные минералы: главные – пирротин, пентландит, халькопирит; второстепенные и редкие: никелин, кобальтин, арсенопирит, пирит, виоларит, аргентопентландит, хромшпинелиды, ильменит, титаномагнетит, магнетит, золото, платина и др. [4, 5] "Мамонский и Еланский типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений ВКМ (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2008)", "Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Статья 1. (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2011)".

Пространственно-генетическая связь золото-платинометалльного оруденения с геодинамическим режимом наиболее интенсивной эндогенной активности и структурной дифференциации земной коры, обуславливают и формирование формационно-генетических типов платиносодержащих месторождений и рудопроявлений ВКМ [6] "Платиноносные и золото-платиноносные формации Воронежского кристаллического массива при различных геодинамических режимах формирования докембрийской литосферы (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2012)".

Анализ многочисленных горизонтальных срезов с шагом 50 м и меньше показывает, что формирование залежи происходило при вихревом движении восходящих конвективных потоков по направляющей, в виде спирали против часовой стрелки. Данный механизм приводит к воронкообразному виду интрузии, что наблюдается на вертикальных разрезах (Рис.1., Рис.2.).

ЕЛАНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ
 ПОИСК РУД ПЛАТИНОИДНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ-ПАЛЛАДИЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
 И ДРУГИХ СОПУТСТВУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ
 ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ G 3

МЕТОД РАДИО-ТЕПЛОВИЗОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ



Легенда:

- Линия уровня моря
- Линии границ лицензионного участка
- 500 Глубина горизонтального среза
- Рудное тело главное [Платина, Медь, Никель, Палладий] *
- Рудное тело второстепенное [Золото, Серебро, Родий, Осмий, Иридий, Рутений, Селен, Теллур, Молибден, Мышьяк, Сурьма, Висмут, Свинец] *

* Источник: "ВЕСТНИК ВГУ, СЕРИЯ: ГЕОЛОГИЯ, 2011, № 1, ЯНВАРЬ-ИЮНЬ"
 "Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений". Член-корр. РАН Н. М. Чернышов, М. Н. Чернышова

Рис.1. Еланское месторождение. Вертикальный геотермический разрез G 3 запад-восток.

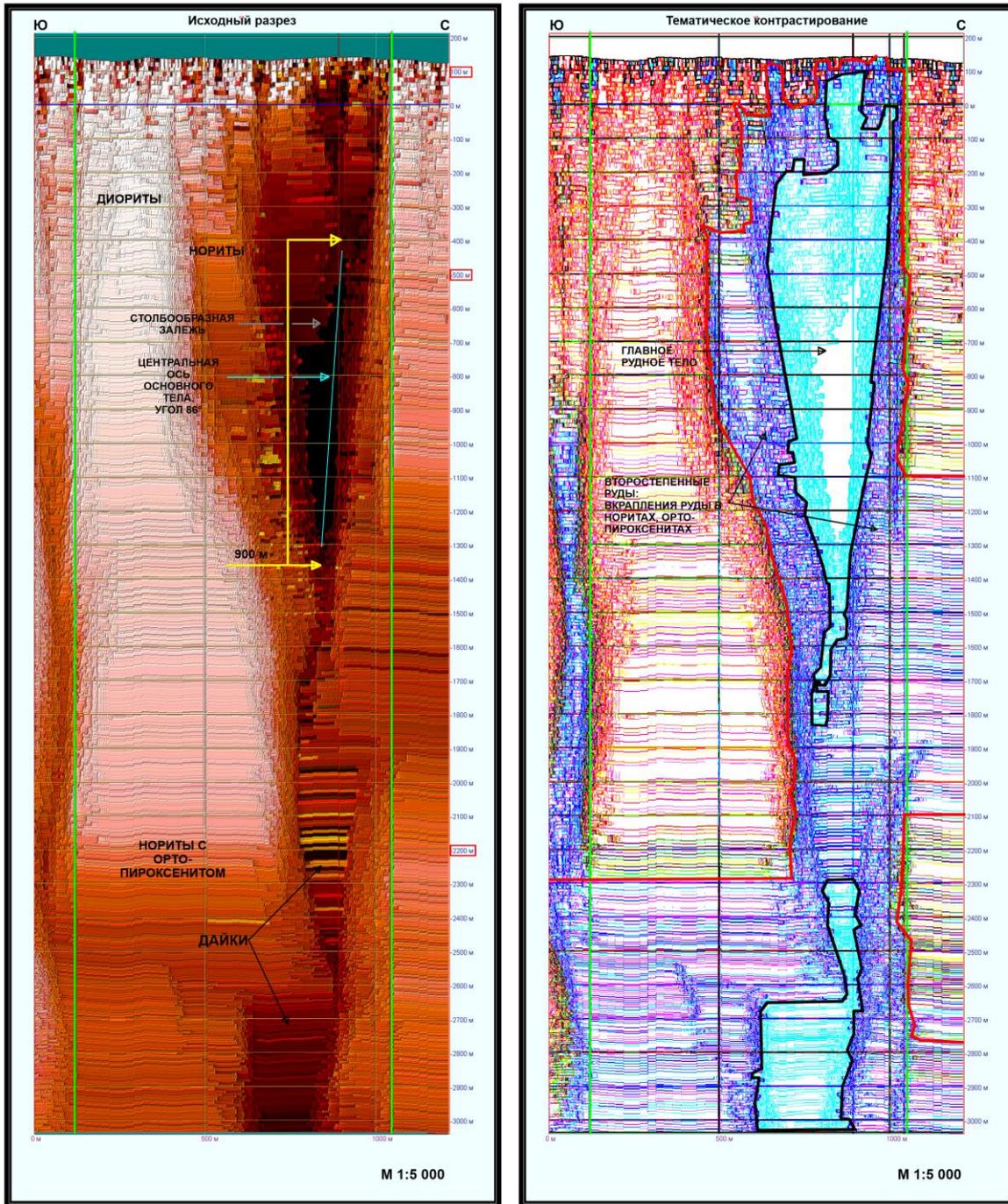
*Перечень элементов приведен по данным [5] "Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Статья 1. (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2011)"

ЕЛАНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

МЕТОД РАДИО-ТЕПЛОВИЗОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**ПОИСК РУД ПЛАТИНОИДНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ-ПАЛЛАДИЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
И ДРУГИХ СОПУТСТВУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ**

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ V 5



Легенда:

- Линия уровня моря
- | Линии границ лицензионного участка
- 500 Глубина горизонтального среза
- Рудное тело главное [Платина, Медь, Никель, Палладий] *
- Рудное тело второстепенное [Золото, Серебро, Родий, Осмий, Иридий, Рутений, Селен, Теллур, Молибден, Мышьяк, Сурьма, Висмут, Свинец] *

* Источник: "ВЕСТНИК ВГУ, СЕРИЯ: ГЕОЛОГИЯ, 2011, № 1, ЯНВАРЬ-ИЮНЬ"
* Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений". Член-корр. РАН Н. М. Чернышов, М. Н. Чернышова

Рис.2. Еланское месторождение. Вертикальный геотермический разрез V 5 юг-север.

* Перечень элементов приведен по данным [5] "Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Статья 1. (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2011)"

ЕЛАНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

МЕТОД РАДИО-ТЕПЛОВИЗОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

ПОИСК РУД ПЛАТИНОИДНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ-ПАЛЛАДИЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ДРУГИХ СОПУТСТВУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ

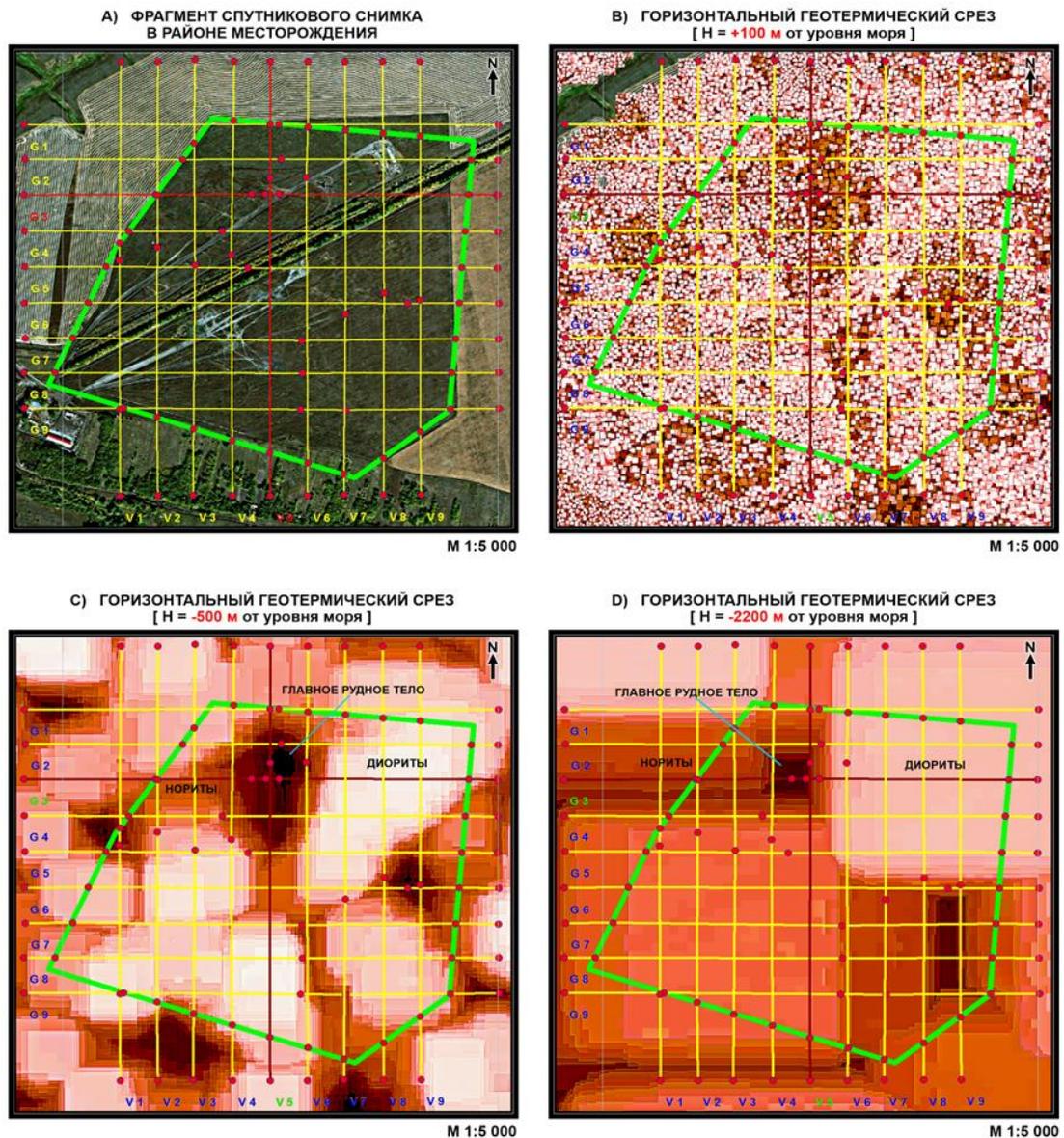


Рис.3. Еланское месторождение. А – линии разрезов на спутниковом снимке, В, С, D – горизонтальные геотермические срезы.

Выводы. Результаты представленной работы позволяют констатировать, что метод ДЗЗ РТТ способен выявлять рудные месторождения, в том числе, платиноидно-медно-никелевые-палладиевые и других сопутствующих металлов. Это наглядно демонстрируют вертикальные геотермические разрезы (Рис. 1., Рис. 2.0) и горизонтальные срезы (Рис.3.). Полный анализ материалов, в том числе, представленных в настоящей статье, позволяет сделать следующие выводы:

- глубинная, более одного километра структура, в виде столбообразной залежи в поперечнике – округлой формы;

- центральная ось основного рудного тела находится в пределах близких к углу 90 градусов;

- залежь формировалась по направляющей в виде спирали, против часовой стрелки;

- отслеживается путь 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 элементы платиновой группы металлов [2] "Basics of Thermal Imaging Technologies and their experience. (Stepchenko V.N. et al., 2018)".

Геологические исследования позволяют уточнить содержание элементов в рудной залежи [1, 3-7] "Геология МПИ (Лебедев И.П. и др., 2009)", "Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения Еланского типа (геология, закономерности размещения, минералого-геохимические особенности руд). Геолого-генетическая модель формирования (Чернышов Н.М., 1998)", "Мамонский и Еланский типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений ВКМ (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н., 2008)", "Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Статья 1. (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2011)", "Платиноносные и золото-платиноносные формации Воронежского кристаллического массива при различных геодинамических режимах формирования докембрийской литосферы (Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. 2012)", "Дайки сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Воронежского кристаллического массива (Чернышова М.Н. 2006)".

На геотермических разрезах выделена столбообразная рудная залежь, содержащая палладий на Воронежском кристаллическом массиве, что позволяет рекомендовать данный метод для поисков руд металлов платиновой группы, золота и сопутствующих металлов на других территориях.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев И.П., Кориш Е.Х., Савко К.А., и др. (2009) Геология МПИ. Воронежский ГУ.
2. Stepchenko V.N., Bagryancev V.A., Rodnaya V.A. (2018) Basics of Thermal Imaging Technologies and their experience. World of Geotechnics 2(58), 2018.
3. Чернышов Н.М., (1998) Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения Еланского типа (геология, закономерности размещения, минералого-геохимические особенности руд). Геолого-генетическая модель формирования. Вестн. ВГУ, сер. Геол., 1998. – N5. – стр.120-151.
4. Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. (2008) Мамонский и Еланский типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений ВКМ (состав, генетические особенности, перспективы освоения). ВГУ. Проблемы рудогенеза докембрийских щитов. Труды Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию юбилею члена-корреспондента РАН Г.И. Горбунова. Апатиты, 17-18 ноября 2008г.
5. Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. (2011) Особенности распределения и модель механизма фракционирования металлов платиновой группы в сульфидных никелевых рудах еланского типа месторождений. Статья 1. Сульфидные никелевые руды еланского типа месторождений и особенности распределения в них металлов платиновой группы. Вестн. ВГУ, сер. Геол., – N1. – стр.117-132.
6. Чернышов Н.М., Чернышова М.Н. (2012) Платиноносные и золото-платиноносные формации Воронежского кристаллического массива при различных геодинамических режимах формирования докембрийской литосферы. Вестн. ВГУ, сер. Геол. – N1. – стр.122-146.
7. Чернышова М.Н. (2006) Дайки сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Воронежского кристаллического массива. Автореферат диссертации. Воронежский государственный университет. Воронеж.
8. Шарков Е.А. (2014) Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Том 1. ИКИ. Москва. стр.20-26
9. Шутко А.М. (1986) СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. Москва. НАУКА. стр. 10-11