

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМОРАЗВЕДКИ НА БАЗЕ ДАННЫХ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Н.К. Винниченко<sup>1</sup>, О.Н. Винниченко<sup>2</sup>, И.В. Глущенко<sup>1</sup>, В.Н. Степченко<sup>1</sup>, В.А. Багрянцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НПП “Специальный центр аэрокосмических технологий”, просп. К. Маркса, 81, оф.12, Днепропетровск 49000, Украина, e-mail: [aero\\_space@ukr.net](mailto:aero_space@ukr.net)

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Васильковская 90, Киев 03022, Украина, e-mail: [kse95641898@yandex.ua](mailto:kse95641898@yandex.ua)

На базе современных знаний о физике тепловых процессов, происходящих в геосреде, системно изложены термодинамические основы методов терморазведки на материалах дистанционных наблюдений в оптическом, инфракрасном диапазонах и радиодиапазоне электромагнитных волн. С использованием немногочисленных разрозненных публикаций сделана попытка популяризации основных принципов, послуживших отправной точкой для создания методов и технологий интроскопии (геотомографии), применение которых позволяет осуществлять зондирование Земли практически на произвольно заданную глубину, что дает возможность определять структуру и термодинамику среды. В частности, дано представление о методе видеотепловизионной генерализации Р.Д. Мухамедьярова, составляющем основу упомянутых технологий, что в некоторой степени восполнит пробел в научной периодике по заданной теме. Рассмотрены конкретные примеры применения технологии тепловой геотомографии, разработанной Специальным центром аэрокосмических технологий (г. Днепропетровск), для решения разноплановых геоструктурных и поисковых задач нефтегазового направления в различных условиях и разных регионах земного шара. Отмечено, что термодинамические особенности геосреды могут служить прямым индикатором наличия залежей углеводородов. Это отличает дистанционную терморазведку от других геофизических методов.

**Ключевые слова:** терморазведка, дистанционные методы, интроскопия, геотомография, метод видеотепловизионной генерализации, геосреда, углеводороды.

**Введение.** Дистанционные тепловые методы и технологии (интроскопии, геотомографии, инсайтинга и др.), основанные на цифровой обработке аэрокосмических сцен, применяются в геологии сравнительно недавно (10–15 лет). Поскольку их разработка первоначально была связана с военно-стратегическими целями и направлениями, публикации на эту тему закономерно отсутствовали или носили единичный характер и касались фундаментальных основ обработки данных [2].

На современном этапе, когда аналогичные технологии начали использоваться для научных и хозяйственных целей, накопленный опыт наших исследований, а также зарубежных коллег в направлении обработки данных дистанционного зондирования Земли свидетельствует, что дальний ИК-диапазон электромагнитных волн позволяет зондировать глубинную структуру Земли. При этом значительно возрастает объем информации о тектоническом строении земной коры, геодинамике, а также распределении в пространстве геосреды локальных зон (аномалий), связанных с углеводородными флюидами, водой и другими полезными ископаемыми, т. е. термодинамика геологической среды обладает свойством прямого индикатора.

Наличие доказанных фактов [1], подтверждающих последний тезис, автоматически переносит

тепловые дистанционные методы в конкурентную среду, где существует некоторая иерархическая структура других геофизических методов. Среди них сейсмический метод до последнего времени претендовал на главенствующую роль, если не сказать – на роль единственного метода для поисков и разведки нефтегазовых месторождений.

На фоне установленных взаимосвязей между тепловыми и упругими свойствами горных пород [11] поразительными представляются также аналогии в подходах, используемых при обработке информации:

- эффект тепловой интроскопии среды достигается в результате генерализации (обобщения) информации, содержащейся в многоспектральных космических снимках поверхности, что приводит к увеличению температурной чувствительности данных до значений, обеспечивающих проникновение из глубины Земли (или воссоздание глубинной термодинамики среды).
- эффект акустической интроскопии, какой по сути является сейсморазведка, и в частности увеличение глубины проникновения (глубинность), обязан своего рода генерализации, которая достигается при суммировании разноудаленных и, в меньшей мере, разночастотных сейсмических трасс по способу общей средней

точки. Это приводит к повышению соотношения сигнал/помеха, эффективному подавлению помех и в результате к увеличению глубины проникновения.

Однако сейсморазведка далеко не всегда обеспечивает надежные поисковые критерии для успешного бурения и чаще акцентирует внимание на структурном факторе, обеспечивающем скопление углеводородов, как основном. Кроме того, применение технологической сейсморазведки в модификации 3D в значительной степени ограничено ее дороговизной и поверхностными условиями.

В таком ракурсе представляется рациональным позиционировать два рассматриваемых метода не как конкурирующие, а скорее как дополняющие друг друга для повышения эффективности геолого-разведочного процесса в целом, по крайней мере в приложениях нефтегазовой геологии.

В то же время дистанционные технологии терморазведки показали большую устойчивость результатов при прямой индикации вторичных залежей углеводородов.

В связи с изложенным выше для нас очевидной была необходимость написания статьи, которая бы освещала на доступном уровне теоретические основы и практические аспекты методов и технологий терморазведки на основе аэрокосмических данных; в этом и есть ее основное предназначение.

**Термодинамические основы терморазведки Земли.** В основе современных технологий теплового просвечивания Земли (тепловой геотомографии – ТТГ) лежит постулат, согласно которому излучаемая тепловая энергия, представленная непрерывным спектром электромагнитных волн, выражается физическим параметром, именуемым *радиационной (радиояркостной) шумовой температурой*.

Выделение тепловой энергии в виде электромагнитного излучения присуще всем природным и техногенным объектам. В нашем случае разогретое до температуры 6400 °С ядро Земли является источником электромагнитных волн, которые “просвечивают” мантию, астеносферу и литосферу, формируя на земной поверхности интегральное тепловое “изображение”, фиксирующее все неоднородности структуры и вещества Земли.

Любое электромагнитное излучение в виде радиационной температуры может быть принято на входе антенной системы (детекторной, оптической или радиоэлектронной). Например, астрономы с помощью радиотелескопов принимают шумовую температуру на длине волны 21 см – длине, свободной в радиозфире для ученых-астрофизиков.

В терморазведке планету Земля рассматривают как открытую термодинамическую геосистему,

в которой происходят процессы обмена веществом и энергией между внутренними частями планеты и мировым пространством через ее поверхность.

Динамика процессов, протекающих в приповерхностном слое, зависит от количества энергии, поступающей в геосистему. В общем дневном балансе тепловой энергии на поверхности Земли энергия солнечной радиации составляет 99,98 %, а энергия, поступающая из недр Земли, – 0,02 %; поэтому дневная солнечная энергия является главным двигателем ландшафтных природных процессов.

Ночью тепловой баланс Земли изменяется на противоположный дневному: количество тепловой энергии, поступающей из недр Земли, составляет 95 %, а энергии из космического пространства (небесные тела) – 5 %; поэтому ночной эндогенный восходящий тепловой поток практически не зависит от вариаций внешних тепловых факторов и, следовательно, температурный режим подстилающих горных пород определяется именно этим потоком, а также термодинамическими параметрами геосреды. К поверхности эндогенное тепло передается через горные породы посредством кондуктивной теплопроводности, конвекции и излучения.

Кондуктивная теплопроводность свойственна минералам, обладающим электронной проводимостью (металлы, полиметаллические руды и т. п.) с механизмом передачи тепла путем диффузии свободных электронов, а также минералам, в кристаллической решетке которых тепло передается колебаниями атомов.

При конвективной теплопроводности тепловая энергия переносится упругими колебаниями, которые передаются смежными молекулами, и тепло распространяется от одного слоя другому постепенно, что обуславливает низкий коэффициент теплопроводности флюидов.

Радиотепловое излучение подчинено механизму передачи тепла в полупрозрачных средах [1].

Как показано далее, существует принципиальная возможность установить положение геоблоков через кондуктивно-контактную теплопроводность, а зон разломов – через конвективно-молекулярную теплопроводность.

Излучательная способность различных типов поверхности суши колеблется в пределах  $\varepsilon = 0,4 \div 0,97$ , поэтому суша днем нагревается за счет солнечной радиации, а ночью довольно интенсивно остывает. Этот факт создает убедительные предпосылки для использования ночных космических снимков с целью выделения эндогенной компоненты.

Геотермический градиент  $\Gamma(T)$  – величина, характеризующая изменение температуры с глубиной, может быть выражен через суммарную плотность тепловых потоков ( $q_{\Sigma} = q_k + q_{kb} + q_n$ ) и теплопроводность геофизической подосновы ( $\lambda_T$ ):

$$\Gamma(T) = -\frac{\partial T}{\partial h_N} = -\frac{q_z}{\lambda_T}.$$

Эта зависимость служит для определения зон неоднородности теплового поля, обусловленных кондуктивной теплопроводностью ( $q_k$ ), конвекцией ( $q_{кв}$ ) и излучением ( $q_n$ ) соответственно.

Теория терморазведки основывается на решении уравнения теплопроводности

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t},$$

характеризующего изменение температуры  $T$  по осям координат ( $x, y, z$ ) во времени  $t$  с учетом температуропроводности  $\alpha$ .

В теории терморазведки получена следующая формула для расчета вертикального теплового потока:

$$q_z = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \rho C V_z T, \text{ где } \frac{\partial T}{\partial z} = 1.$$

Здесь  $\rho$  – плотность;  $C$  – теплоемкость;  $V_z$  – вертикальная скорость конвекции (или скорость фильтрации подземных вод, если считать, что конвекция осуществляется в основном за счет подземных вод);  $T$  – температура на глубине. Если конвекция вод идет вверх, что наблюдается в слабопроницаемых слоях на глубинах свыше 100 м, то теплопроводный и конвективный тепловые потоки складываются ( $-V_z$ ), при фильтрации вниз – вычитаются ( $V_z$ ).

В скальных породах, а также в условиях стационарного теплообмена конвекцией можно пренебречь ( $V_z$ ), и тепловой поток равен  $q_z = -\lambda_T \Gamma$ , т. е. он определяется только теплопроводностью пород и температурным градиентом.

Таким образом, региональный тепловой поток Земли может быть рассчитан через измеренные на разных глубинах температуры и тепловые свойства среды, в основном теплопроводность.

Вторая производная температуры по глубине прямо пропорциональна скорости изменения температуры во времени, обратно пропорциональна коэффициенту температуропроводности и служит для более детального определения зон неоднородностей теплового поля и их границ по глубине проникновения  $h_N$  в плоскости глубинного разреза:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial h_N^2} = \frac{\partial \Gamma(T)}{\partial h_N} = -\frac{\rho C_M}{\lambda_T} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial T}{\alpha} \quad [\text{K}/\text{M}^2],$$

где  $C_M$  – удельная теплоемкость горных пород, пластовых жидкостей и газов;  $\partial T/\partial t$  – скорость изменения температуры со временем;  $\alpha = \lambda_T / (C_M \cdot \rho)$  – температуропроводность (выражает скорость изменения температуры при поглощении или излу-

чении тепла и связывает теплопроводность  $\lambda_T$ , удельную теплоемкость  $C_M$  и плотность  $\rho$ );

$$\lambda_T = \frac{dQ}{\frac{\partial T}{\partial h_N} dS d\tau} \quad [\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})] \text{ – теплопроводность,}$$

равная количеству теплоты  $dQ$  [Дж], которое проходит через сечение  $dS = 1 \text{ м}^2$  за 1 с при температурном градиенте  $\Gamma(T) = 1$ .

Количество теплоты, проходящее через элемент изотермической поверхности  $dS$  за промежуток времени  $d\tau$ , пропорционально геотермическому градиенту:

$$dQ = \lambda_T \frac{\partial T}{\partial h_N} dS d\tau.$$

Также можно построить прирост горизонтального геотермического градиента:

$$G(T) = \frac{\partial}{\partial h_N} \left( \frac{\partial T_T}{\partial L} \right),$$

где  $T_T$  – функция термодинамической температуры по горизонтали  $L$ .

Наибольшая дифференциация горных пород наблюдается по коэффициентам теплопроводности (или по обратной величине – тепловому сопротивлению  $\Gamma$ ). Теплопроводность возрастает с увеличением плотности горных пород и зависит от степени газо-, водо- и нефтенасыщения, что создает физические предпосылки для поиска месторождений углеводородов путем использования тепловых геофизических полей.

Основной параметр в терморазведке – теплопроводность, характеризующая способность сред и горных пород передавать тепло. В теории терморазведки доказано, что при значениях, достигающих 1000 °С, теплопроводность обратно пропорциональна температуре. В связи с этим средняя теплопроводность до глубин около 100 км, где ожидаются такие температуры, понижается примерно в 3 раза по сравнению со средней теплопроводностью поверхностных отложений. На глубинах свыше 100 км теплопроводность постепенно повышается, что объясняется ростом с глубиной давления и лучистого теплообмена. Указанная зона пониженной теплопроводности в мантии служит препятствием для оттока тепла к поверхности и способствует возрастанию температур с глубиной.

В целом теплопроводность горных пород зависит от минерального состава, структуры, текстуры, плотности, пористости, влажности, температуры. Минеральный состав магматических, метаморфических и осадочных пород не очень влияет на их теплопроводность. Плотность, пористость и давление, под которым находятся горные породы, связаны между собой. При повышении плотности и давления, а значит понижении

пористости, теплопроводность пород повышается. С увеличением влажности горных пород их теплопроводность резко увеличивается. Например, изменение влажности с 10 до 50 % может увеличить теплопроводность в 2–4 раза. Повышение температуры снижает теплопроводность кристаллических и сухих осадочных пород и увеличивает – водонасыщенных пород. В целом влияние различных, иногда взаимно противоположных природных факторов на теплопроводность горных пород весьма сложно и недостаточно изучено. Магматические и метаморфические породы обладают коэффициентом теплопроводности 0,2–0,4 (в среднем 0,3) Вт/(м·К), осадочные – 0,03–0,5 (в среднем 0,125), нефтегазонасыщенные – меньше 0,05 Вт/(м·К).

Теплоемкостью горных пород объясняется их способность поглощать тепловую энергию. Она отличается сравнительным постоянством и возрастает с увеличением водонасыщенности. Теплоемкость магматических и метаморфических пород при обычных температурах изменяется в пределах  $(0,6–0,9) \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), осадочных –  $(0,7–1,0) \cdot 10^3$ , металлических руд –  $(0,9–1,4) \cdot 10^3$  Дж/(кг·К). С ростом температуры она увеличивается.

Температуропроводность характеризует скорость изменения температур при поглощении или отдаче тепла. У различных горных пород она изменяется в пределах  $(4–10) \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

Тепловая инерция пород  $Q$  [Дж/(м<sup>2</sup>·с<sup>1/2</sup>·К)] – одна из обобщенных тепловых характеристик земной поверхности. Она используется при тепловых аэрокосмических съемках и отражает суточный ход температур над разными ландшафтами и акваториями. Породы со слабой тепловой инерцией (сухие почвы и пески) отличаются низкими ее значениями:  $Q < 500$  Дж/(м<sup>2</sup>·с<sup>1/2</sup>·К), и подвергаются большим колебаниям суточных температур (до 60 °С). Для пород и сред с высокой тепловой инерцией (обводненные породы, заболоченные участки) значения  $Q$  достигают 3000 Дж/(м<sup>2</sup>·с<sup>1/2</sup>·К) при суточном изменении температур до 30 °С. Над акваториями крупных рек, морей и океанов  $Q > 10000$  Дж/(м<sup>2</sup>·с<sup>1/2</sup>·К), суточный ход температур составляет несколько градусов.

Перечисленные тепловые свойства горных пород определяют лабораторными методами. Для этого образцы горных пород помещают в плоские, цилиндрические или сферические датчики, через которые пропускают стационарный или импульсный тепловой поток от источника тепла. Измерив проходящий поток, градиент температур за время опыта и зная геометрические размеры датчика, можно определить тепловые свойства пород.

Знание тепловых свойств горных пород необходимо для интерпретации результатов термомет-

рии скважин и донных осадков; при глубинных геотермических исследованиях; выявлении тех или иных полезных ископаемых; при проведении тепловых расчетов с целью установления зависимостей тепловых свойств от физических, геологических, водно-коллекторских параметров.

К оптическим свойствам горных пород относятся: альbedo, характеризующее отражательные свойства поверхности (%); коэффициент яркости, т. е. отношение яркости поверхности в рассматриваемом направлении к яркости белой, идеально рассеивающей поверхности; степень черноты, показывающая, во сколько раз плотность излучения данного объекта при длине волны  $\lambda$  меньше плотности излучения абсолютно черного тела при той же температуре, и др. Эти свойства играют основную роль при ИК-съемке.

**Физико-методические основы технологий интроскопии, базирующихся на данных многоспектральных космических съемок.** Принципиальная возможность интроскопии (проникновения внутрь) геосреды на базе данных многоспектральных космических съемок частично обоснована в работах Р.Д. Мухамедьярова [2–8]. Видеотепловизионная съемка входит в состав методов терморазведки, объединяющих физические методы исследования естественного теплового поля Земли.

Метод видеотепловизионной генерализации является прикладным следствием леммы – гипотезы Р.Д. Мухамедьярова, выдвинутой в 1991 г.: тепловое излучение Земли несет память о своем происхождении; в тепловой энергии, излучаемой любым объектом, заключена информация о глубинных процессах, происходящих внутри объекта [3, 9, 10].

Современные видеотепловизоры имеют различные пространственные спектральные и радиометрические разрешения и устанавливаются на различные носители (спутники, самолеты, дирижабли). При последовательном увеличении высот носителей происходит естественная генерализация (обобщение) информации, отображаемой на космоснимках.

Объединение свойств естественной (оптической) и динамической генерализации, использующей данные многоспектральных сцен тепловизионных съемок, позволяет охватить весь спектр решения геолого-разведочных и геотехногенных задач на материках и акваториях земного шара.

Практически реализуется эффект непрерывного зондирования и выявления аномалий плотности геосреды по распределению глубинных аномалий теплового поля, полученного с использованием весовой функции, на основе трехмерной пирамиды вклада теплового излучения элементов земной коры в результирующее излучение элементов поверхности  $\delta_{x,y}$ . Другими словами, в результате использования интеграль-

ных преобразований экспериментальных данных в рамках фундаментального соотношения

$$\delta_{xy}^l \cdot \Delta T_p = \text{const},$$

где  $\delta_{x,y}$  – элемент пространственного разрешения;  $\Delta T_p$  – эквивалент шумовой радиационной температуры, характеризующий основные фундаментальные параметры аэрокосмической аппаратуры видеотепловизионной съемки;  $l = 2,5 \div 2,72$  (константа), происходит обмен пространственного разрешения на температурную чувствительность. Степень генерализации определяется рядом целочисленных величин 1, 2, 3, 4, 5..., причем первый слой объемной тепловой модели является исходным тепловым цифровым изображением, а нулевой – панхроматическим изображением (диапазон видимого электромагнитного спектра – 450–900 нм).

В частном случае функцию пространственной генерализации можно выразить в виде

$$\varphi(\delta_{x,y}) = \left[ \frac{\sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} (k_{ij} \cdot E_{ij})^\alpha}{\sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} (k_{ij} \cdot E_{ij})^\beta} \right]^{\frac{1}{\alpha-\beta}},$$

при  $\alpha = 0, \beta = \alpha - 1$

$$\varphi(\delta_{x,y}) = \frac{N_x N_y}{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} (k_{ij} \cdot E_{ij})^{-1}} - \text{среднее гармоническое},$$

при  $\alpha = 1, \beta = \alpha - 1$

$$\varphi(\delta_{x,y}) = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} (k_{ij} \cdot E_{ij})}{N_x N_y} - \text{среднее арифметическое}.$$

Сигнал на  $i$ -м приемнике определяется выражением

$$E_{ij} = A \cdot S_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} \varepsilon_{\lambda_T} \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]^{-1} \alpha_{\lambda_i} d\lambda.$$

Здесь  $A$  – коэффициент, характеризующий оптическую систему;  $S_{\lambda_{\max}}$  – максимальная спектральная чувствительность;  $\alpha_{\lambda}$  – относительная характеристика приемника;  $\alpha_{\lambda_T}$  – спектральное распределение плотности энергии излучения:

$$b_{\lambda_T} = \varepsilon_{\lambda_T} \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]^{-1},$$

где  $\varepsilon_{\lambda_T}$  – излучательная способность объекта;  $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-12}$  Вт·см<sup>2</sup>;  $c_2 = 1,4388$  см·К;  $\lambda$  – длина волны излучения, мкм;  $T$  – температура.

Для определения классов геолого-геофизической среды  $\alpha$  и  $\beta$  могут быть дробными и позволяют выбрать значение глубины проникновения  $h_N$  при каждой ступени генерализации  $N$ .

Видеотепловые аэрокосмические съемки привязаны к радиометрической температуре ( $T_p$ ):

$$T_p = T_r \sqrt[4]{\varepsilon},$$

где  $\varepsilon$  – излучательная способность объекта поиска;  $T_r$  – термодинамическая температура.

Температуру ( $T_p$ ) выделенных объектов по их тепловому излучению определяют из функционального соотношения, связывающего выбранный сигнал второго из трех выделенных спектральных диапазонов (как пример), и при  $\lambda_2 \cdot T_p \leq 1200$  мкм·К

$$T_p = \sqrt[3]{\frac{2C_2}{\left[ -\frac{f_{\lambda\lambda}''}{f(\lambda_2)} + \left( \frac{f_{\lambda}'(\lambda_2)}{f(\lambda_2)} \right)^2 + \frac{5}{\lambda_2^2} \right] \lambda_2^3}},$$

где  $C_2$  – постоянная Планка;  $f(\lambda_2)$  – оцифрованное значение сигнала второго спектрального диапазона;  $f_{\lambda}'(\lambda_2) = \left( -\frac{5}{\lambda_2} - \frac{K_2}{\lambda_2^2} \right) f(\lambda_2)$  – пер-

вая производная по длине волны значения сигнала второго спектрального диапазона,

$$f_{\lambda}''(\lambda_2) = \left[ \frac{5}{\lambda_2^2} + \frac{2K_1}{\lambda_2^3} + \left( \frac{f_{\lambda}'(\lambda_2)}{f(\lambda_2)} \right)^2 \right] f(\lambda_2) - \text{вторая}$$

производная по длине волны значения сигнала второго спектрального диапазона.

Коэффициенты ( $K_1, K_2$  и  $K_3$ ) вычисляются по следующим соотношениям:

$$K_1 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[ \frac{q_3 - q_1}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{q_2 - q_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right],$$

$$K_2 = q_1 - \frac{K_1}{\lambda_1} - K_3 \lambda_1,$$

$$K_3 = \frac{q_3 - q_1}{\lambda_3 - \lambda_1} + \frac{K_1}{\lambda_1 \lambda_3},$$

где  $q_i = \ln[f(\lambda) \lambda_i^5]$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Излучательную способность ( $\varepsilon$ ) в каждом из выбранных спектральных диапазонов определяют из соотношения

$$\varepsilon(\lambda, T_p) = f(\lambda) \lambda_i^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda_i T}\right) - 1 \right]. \quad (1)$$

Таким образом, зная из экспериментальных данных функцию излучательной способности по длинам волн различных геологических сред, мож-

но их идентифицировать по данным аэрокосмических видеотепловизионных съемок.

Увеличение количества спектральных диапазонов позволяет намного точнее измерять температуру объектов и по измеренной температуре определять их излучательную способность в каждом из поддиапазонов.

Дистанционные данные, при обработке которых применяется видеотепловизионная генерализация, получают с геостационарных спутников (линейное разрешение 1440 м в тепловом и 360 м – в видимом диапазонах) или спутников на солнечно-синхронной орбите высотой  $H = 700$  км (линейное разрешение 70 м в видимом и 140 м – в тепловом диапазонах с захватом на местности  $6H = 4200$  км), а также с воздушных дирижаблей или вертолетов на высотах от 50 до 6000 м с использованием аппаратуры, обладающей сверхвысоким линейным разрешением от 1 до 120 мм и температурным разрешением порядка 0,01 К (табл. 1).

Генерализация через интегральные преобразования позволяет довести температурную чувствительность до  $1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-6}$  К, что приводит к эффекту послойного (2–200 слоев) проникновения вглубь Земли. Это позволяет непрерывно контролировать движение литосферных плит толщиной до 20–35 км, вызывающих скольжение, растяжение или разрывы (разломы), а также бо-

лее информативно качественно характеризовать термодинамическое состояние инженерных сооружений и технологических установок [5].

Таким образом, при обработке спутниковых данных осуществляется проникновение вглубь Земли на 0,4–100 км, а при обработке авиационных данных – от 2 мм до 2 км.

Видеотепловое зондирование глубинного строения термодинамического поля Земли реализуется при наличии следующих условий:

- увеличение количества спектральных диапазонов видеотеплорадиометра, в котором тепловой ИК-диапазон привязан к радиометрической температуре;
- увеличение пространственного разрешения дальнего теплового ИК-диапазона;
- последовательное увеличение температурной чувствительности (контраста) от 0,2 до  $1 \cdot 10^{-6}$  К за счет “обмена” избыточного пространственного разрешения на температурную чувствительность и селективное погоризонтное проникновение вглубь геологического разреза.

Увеличение температурного разрешения до  $2 \cdot 10^5$  раз позволяет обнаруживать даже незначительные изменения излучательной способности вещества геосреды. В частном случае нефтяные залежи при одинаковых температуре и глубине залегания по отношению к воде проявятся более холодными аномалиями.

Таблица 1. Схема уровней генерализации аэрокосмических видеотепловых данных [7]

Уровень генерализации	Пространственное разрешение	Глубина проникновения, км	Масштаб	
			по глубине	горизонтальный
<b>1. Космический</b>				
1.1. Глобальный	250 ÷ 1000 м	20 ÷ 100	1 : 100 000 1 : 500 000	1 : 500 000 1 : 2 000 000
1.2. Континентальный	60 ÷ 1000 км	8 ÷ 50	1 : 30 000 1 : 250 000	1 : 100 000 1 : 1 000 000
1.3. Региональный	15 ÷ 90 м	2,6 ÷ 9	1 : 13 000 1 : 45 000	1 : 50 000 1 : 200 000
1.4. Локальный	15 ÷ 60 м	1,2 ÷ 6	1 : 6 000 1 : 30 000	1 : 24 000 1 : 12 000
1.5. Сверхлокальный	2 ÷ 10 м	0,4 ÷ 3	1 : 2 000 1 : 15 000	1 : 8 000 1 : 60 000
<b>2. Авиационный (дирижабельный, самолетно-вертолетный)</b>				
2.1. Обзорный	2 ÷ 20 м	0,2 ÷ 2	1 : 1 000 1 : 10 000	1 : 4 000 1 : 40 000
2.2. Детальный	0,2 ÷ 2 м	0,02 ÷ 0,2	1 : 100 1 : 1 000	1 : 400 1 : 4 000
2.3. Сверхдетальный	0,02 ÷ 0,5 м	0,002 ÷ 0,05	1 : 10 1 : 50	1 : 40 1 : 100

Для оценки глубины проникновения  $h_N$  на уровне слоя  $N$  обычно используется формула [5]

$$h_N = \frac{H^2}{H_T + H} \left( \frac{N\delta}{2} + \frac{N^2\delta^2}{4} \right), \quad (2)$$

где  $N$  – номер горизонтального слоя;  $H_T$  – предполагаемое расстояние от объекта исследования до земной поверхности;  $H$  – расстояние от датчика съемочной аппаратуры до земной поверхности;  $\delta$  – угловое пространственное разрешение съемочной аппаратуры в радианах.

Учитывая, что величина второго слагаемого в скобках пренебрежимо мала при  $N \leq 100$ , в случае, когда  $H_T \leq H$ , что имеет место при космической съемке с больших высот, выражение (2) можно упростить:

$$h_N = H\delta \frac{N}{2}.$$

Наиболее эффективным инструментом космической съемки в тепловом ИК-диапазоне на сегодня является прибор ETM+, установленный на борту спутника “Landsat 7” (США); его пространственное разрешение на местности в 6-й тепловой спектральной зоне составляет 60 м, или  $8,51 \cdot 10^{-5}$  рад. Тогда из формулы (1) следует, что при высоте орбиты 705 км глубина проникновения на уровне 1-го слоя ( $N = 1$ ), или шаг проникновения, составляет 30 м.

В силу того что исходное тепловизионное изображение, несущее информацию о собственной излучательной способности земной поверхности, уже обладает определенной проникающей способностью вглубь, обычно принимается, что изображение в 6-й тепловой спектральной зоне ETM+ представляет собой 1-й слой проникновения ( $h_1 = 30$  м), а нулевой слой ( $N = 0$ ) – это изображение, получаемое в 8-й панхроматической спектральной зоне и характеризующее солнечное

излучение, отраженное от земной поверхности в видимом диапазоне (табл. 2).

Для повышения послойного пространственного разрешения, т. е. уменьшения шага между соседними слоями проникновения по глубине, применяется метод синтезирования\* двух растровых изображений:

– теплового канала (пространственное линейное разрешение  $\delta_T = 60$  м);

– панхроматического канала ( $\delta_n = 15$  м).

Получившееся в результате синтеза изображение будет иметь пространственное разрешение 30 м, а шаг проникновения (интервал между соседними слоями)  $\Delta h$  при обработке такого синтезированного изображения будет равен 10 м. Он определяется в общем случае следующим выражением:

$$\Delta h = \Delta h_T \frac{\delta_\Sigma - \delta_n}{\delta_T - \delta_n},$$

где  $\delta_T$  – линейное пространственное разрешение изображения теплового канала на местности;  $\delta_n$  – линейное пространственное разрешение изображения панхроматического канала на местности;  $\delta_\Sigma$  – линейное пространственное разрешение синтезированного изображения на местности;  $\Delta h_T$  – шаг проникновения при обработке изображения теплового канала.

Оценка глубины проникновения по слоям для космических снимков “Landsat 7” приведена в табл. 3.

**Технология тепловой геотомографии для целей картирования опасных геологических процессов.** ТТГ (технология послойной радиометрической термометрии) относится к области термодинамики открытых систем и теории информации. Любые разрушения или предразрушения (изменения) можно трактовать как изменение повышения энтропии, а любое ее преобразование отражает изменение энергии, в том числе тепловой. На стыке

Таблица 2. Температурное разрешение по слоям

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta T_K$	0,2	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$
$N$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\Delta T_K$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$
$N$	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$\Delta T_K$	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$4,05 \cdot 10^{-5}$	$3,88 \cdot 10^{-5}$	$3,85 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$3,01 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$
$N$	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
$\Delta T_K$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$
$N$	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
$\Delta T_K$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$1,002 \cdot 10^{-5}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$

Примечание.  $\Delta T_K = \left( \frac{\delta_N}{\delta_K} \right)^{2,5}$ ;  $\Delta T_N = \frac{0,2}{N^{2,5}}$  – цена температурной чувствительности между  $N$  и  $N-1$  слоями.

\* По данным специалистов SCAT, возможно синтезирование лишь ближних, средних и дальних тепловых каналов, так как излучательная способность многих элементов исследуемых поверхностей в видимом и тепловом диапазонах инверсно отличается (частично). Это может привести к значительной погрешности полученных результатов.

Таблица 3. Глубина проникновения по слоям, м

Изображение	Слой, N									
	1	3	5	10	20	30	50	100	150	200
Тепловое	30	90	150	300	600	900	1500	3000	4500	6000
Синтезированное	10	30	50	100	200	300	500	1000	1500	2000

термодинамики, информатики и применения аэрокосмических методов мониторинга в области электромагнитных волн была разработана технология дистанционного диагностирования на основе послойной радиометрической термометрии.

ТТГ – один из эффективных методов зондирования подповерхностных геодинамических процессов, особенно это касается дальнего ИК-диапазона, в физической сути которого лежит измерение собственного электромагнитного излучения исследуемых объектов. При этом наблюдается закономерность: чем выше чувствительность и больше длина волны приемников электромагнитного излучения, тем выше его проникающая способность, исходящая из глубины объекта. При выполнении термометрического зондирования с использованием результатов нескольких спектральных диапазонов специальные технологии позволяют исключить (уменьшить) влияние поверхности и ближней подповерхности Земли на результаты регистрации основного излучения, принимаемого с больших глубин.

ТТГ подповерхности Земли позволяет успешно выполнять структурно-геологическое и геодинамическое картирование.

- Составление тепловых карт Земли. Линейно-полосовые тепловые аномалии, выявляемые при ИК-съемке, интерпретируются как зоны разломов, а площадные и концентрические – как тектонические или орографические структуры. ИК-съемка в настоящее время применяется для решения специальных задач, особенно при поисках полезных ископаемых, выявлении опасных геологических процессов и в инженерной геологии.
- Картирование многих природных и техногенных ситуаций, в том числе разрывных нарушений и тектонических опорных площадок, скрытых водных потоков и бассейнов, карстовых пустот и разуплотненных грунтов (М 1 : 2 000 000–1 : 25 000), с использованием космических съемок. В детальных масштабах диагностируются инженерные сооружения (М 1 : 10 000 – 1 : 500) с использованием авиасъемочных работ.
- Составление тепловых карт инженерных сооружений, что дает возможность строить эпюры тепловых напряжений, связанных с упругими деформациями отдельных конструкций.

- Метод послойной радиометрической термометрии позволяет строить 3D термодинамические изображения геосреды и на их основе выявлять и картировать общую геологическую ситуацию и фиксировать опасные геологические процессы.

#### Примеры эффективного использования технологии тепловой геотомографии.

1. На рис. 1 представлены термодинамические изображения (3D-кубы), полученные на двух участках юга России, где в тепловом поле отображены тектоническое строение геосреды, а также прогнозные ловушки углеводородов.
2. Рис. 2 иллюстрирует возможности ТТГ по выявлению углеводородной ловушки на участке в пустыне (Мавритания), где уже пробу-

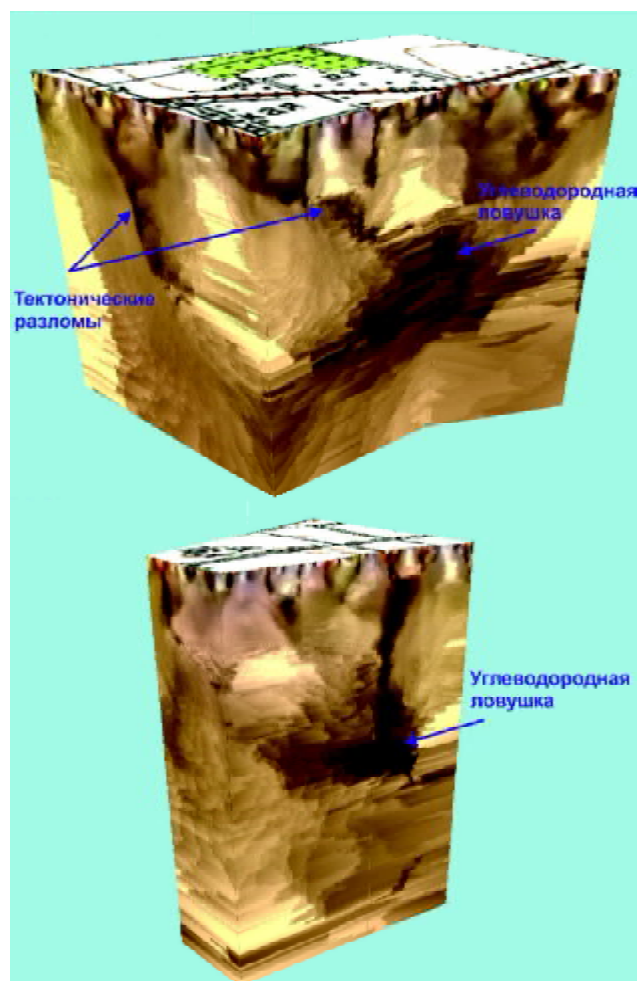


Рис. 1. Отображение углеводородных ловушек в тепловом поле термодинамических кубов 3D, построенных на лицензионных участках юга России



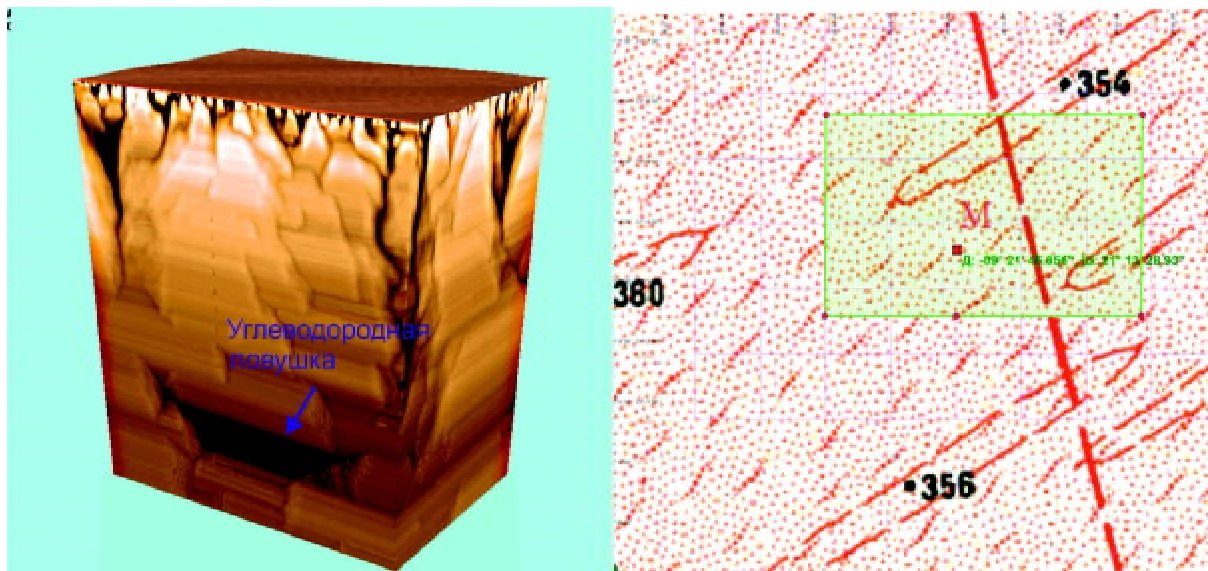


Рис. 2. Отображение углеводородной ловушки в тепловом поле термодинамического куба 3D, построенного по технологии ТТГ, на лицензионном участке в пустыне. Мавритания

- рены 3 “пустые” скважины, местоположение которых выбрано только по данным сейсморазведки.
3. На рис. 3 показаны возможности ТТГ в части отображения детального строения деструктивных зон, которые обычно сопровождают глубинные разломы.
  4. На рис. 4 демонстрируется результат обработки ИК-снимка, полученного на участке продуктивной нефтяной скважины. Точно определено положение насыщенного интервала; виден также подводящий канал, сформировавший залежь (рис. 4, а). Кроме того, определен контур нефтенасыщения (рис. 4, б).
  5. На рис. 5 показан результат обработки ИК-снимка в пределах перспективного участка, где отображается блоковая структура геосреды, а также основные элементы геологического строения (палеовыступ, террасы и т. п.), подтвержденные бурением.
  6. На рис. 6 демонстрируется результат обработки ИК-снимка, полученного на участке земной поверхности, где сейсморазведкой закартирована пологая антиклинальная структура. Однако бурение скважины в сводовой ее части не привело к положительным результатам. Дешифрование космических данных позволило выделить и оконтурить прогнозный нефте-

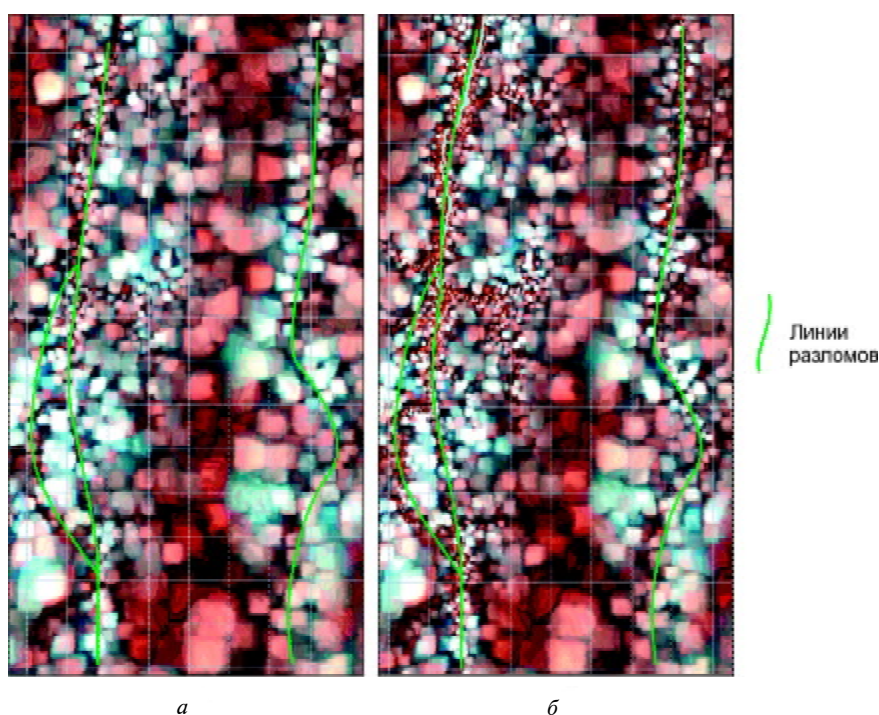


Рис. 3. Отображение тектонических разломов и соответствующих им деструктивных зон на горизонтальных срезах теплового куба на уровнях +100 (а) и +200 м (б). Индия

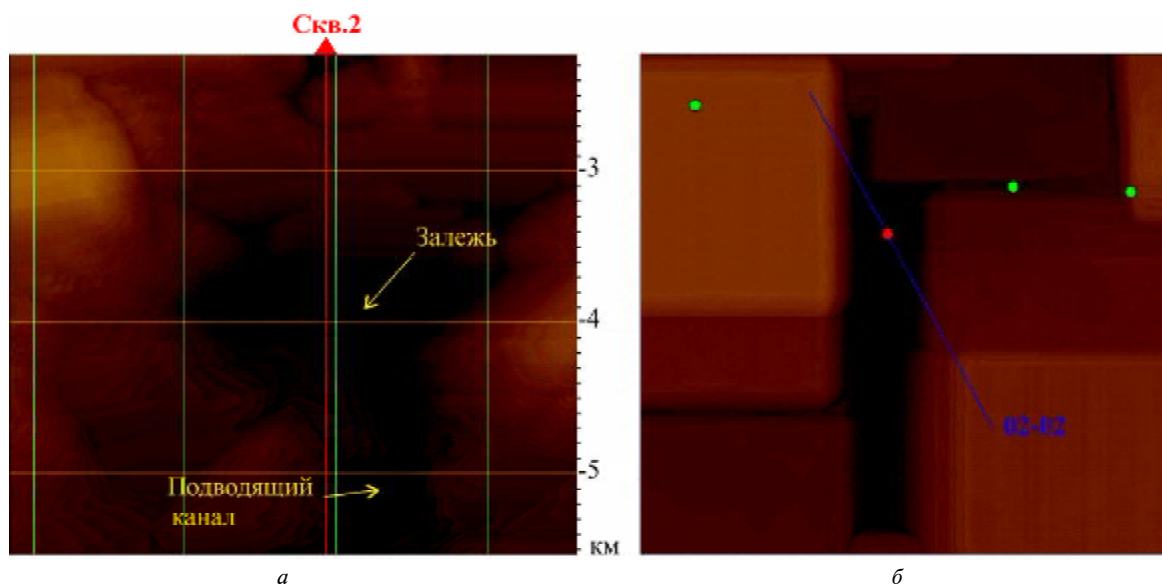


Рис. 4. Отображение нефтяной залежи в тепловом поле вертикального геотермического разреза (а) и горизонтального среза на глубине 3850 м (б). Украина: 02-02 – линия вертикального разреза геотермического куба 3D

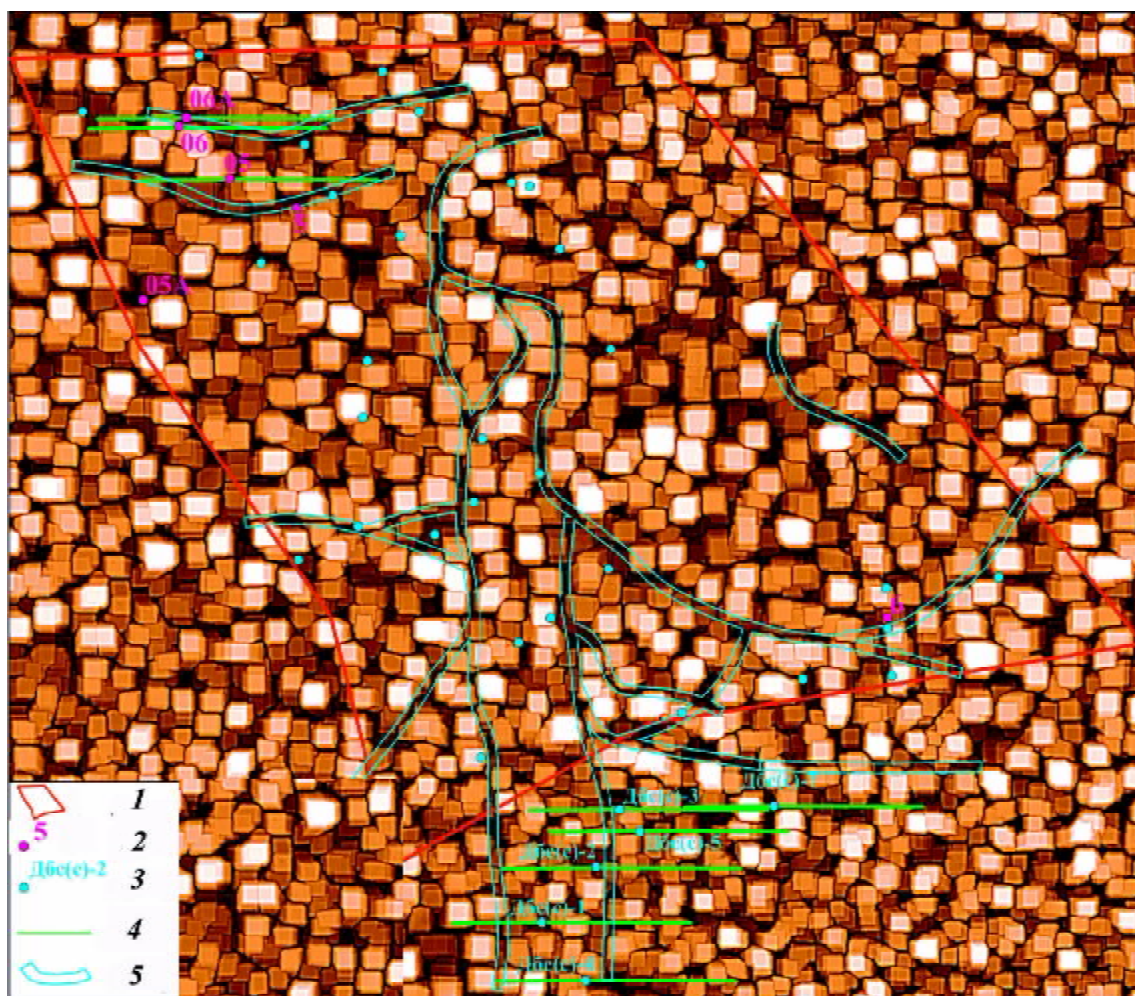


Рис. 5. Отображение основных элементов структуры геосреды на горизонтальном срезе на абсолютной глубине 300 м. Украина: 1 – лицензионный участок; 2 – проектная скважина и ее номер; 3 – пробуренная скважина и ее номер; 4 – линия вертикального калибровочного разреза; 5 – деструктивная зона

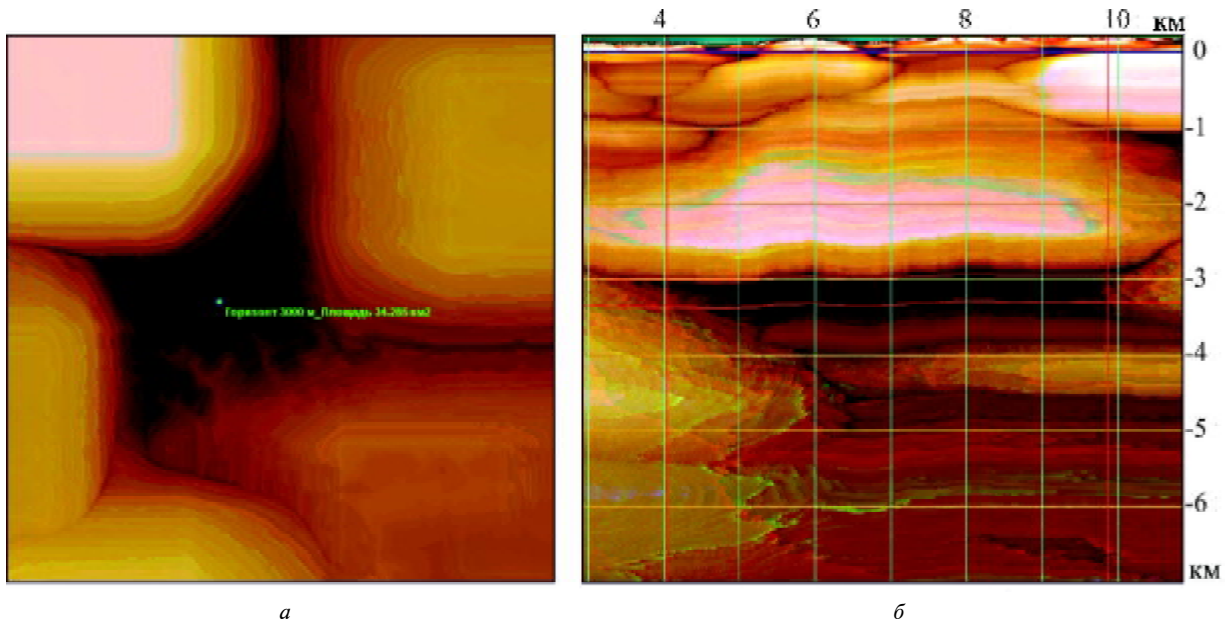


Рис. 6. Отображение прогнозной нефтяной залежи, расположенной в верхней части фундамента, в тепловом поле горизонтального среза (а) и вертикального геотермического разреза (б). Украина

насыщенный объект, который локализуется в коре выветривания и разуплотненной части кристаллического фундамента. На горизонтальном срезе (рис. 6, а) и вертикальном разрезе (рис. 6, б) отображаются также структура осадочной толщи и неоднородности фундамента.

7. На рис. 7 демонстрируется результат обработки ИК-снимка, полученного в пределах лицензионного участка, где пробурены две “пустые” поисковые скважины (1 и 2), положение которых обосновано данными сейсморазведки. Дешифрование космических данных позволило выявить прогнозной газонасыщенный объект в регионально перспективном стратиграфическом интервале (нижняя

пермь – верхний карбон), что дает основания для бурения поисковой скважины Т1.

**Выводы.** В настоящее время находят все большее применение и интенсивно развиваются методы, основанные на дистанционных наблюдениях в оптическом, инфракрасном диапазонах и радиодиапазоне. Стимулом к развитию и внедрению этих методов является возрастающая актуальность научных и практических задач, что обусловлено комплексным изучением и освоением крупных регионов земного шара, а также отдельных провинций, с которыми связаны запасы углеводородов.

Методы измерения радиационной температуры (излучающей способности) элементов земной поверхности, основанные на данных дистанционного зондирования, в значительной степени пре-

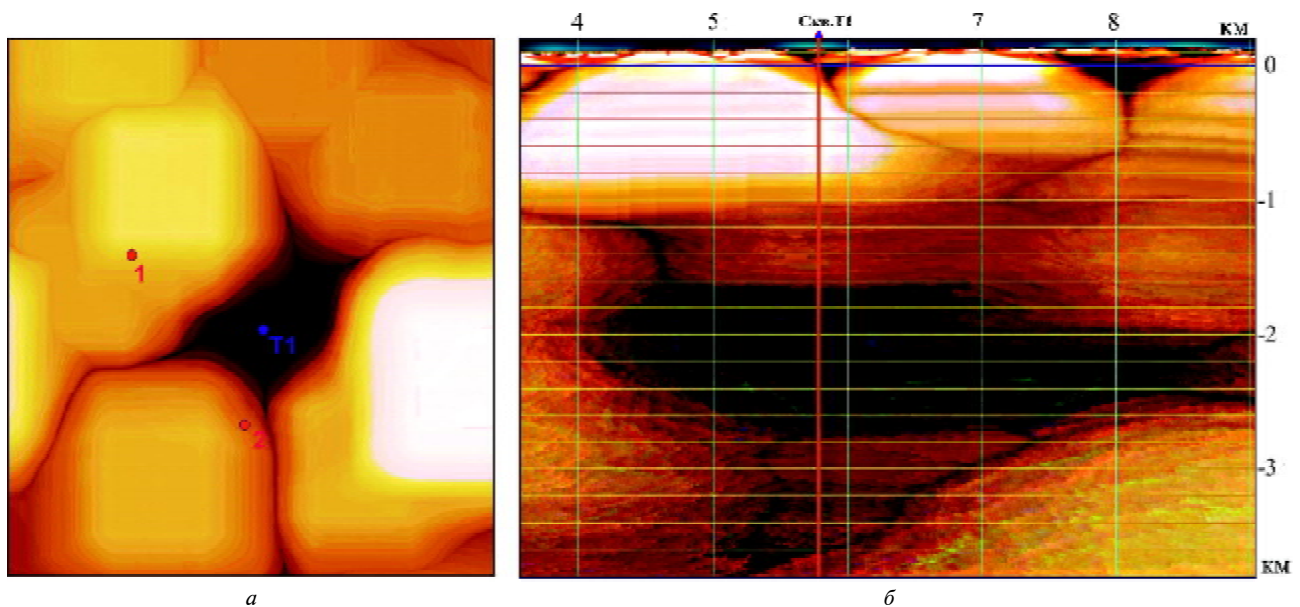


Рис. 7. Отображение прогнозной газовой ловушки в отложениях нижней перми в тепловом поле горизонтального среза (а) и вертикального геотермического разреза (б). Украина

восходят возможности традиционных методов терморазведки, базирующихся на контактных измерениях температуры, в связи с ограниченной пространственной и временной детальностью последних.

Успехи в создании технических средств для дистанционных наблюдений, обработки и тематической интерпретации данных, в изучении закономерностей взаимосвязи радиационных характеристик с физическими параметрами геосреды привели к созданию технологий интроскопии (геотомографии) геосреды, которая позволяет осуществлять послойное проникновение (просвечивание) на практически произвольную глубину и, как следствие, строить тепловые 3D-модели геосреды, отображающие ее внутреннюю структуру и термодинамику.

Данная публикация в значительной степени восполняет пробел в научной периодике по данной тематике, поскольку использованные в ней первоисточники разрозненны и малочисленны.

Примеры применения технологии тепловой геотомографии, которая разработана в “Специальном центре аэрокосмических технологий” (г. Днепропетровск, Украина), приведенные в статье, свидетельствуют о высокой ее эффективности для решения задач нефтегазового направления. Особенно внимания заслуживают возможности технологии для прямой индикации углеводородов.

С экономической точки зрения преимущества использования данной технологии заключается прежде всего в следующем: независимость от условий местности; экологическая чистота; оперативность; относительно низкая стоимость исследований; высокий (до 90 %) показатель успешности.

1. *Винниченко О.Н.* Использование технологии тепловой геотомографии для изучения внутренней структуры геосреды и поиска ловушек углеводородов / О.Н. Винниченко, Н.К. Винниченко, И.В. Глущенко,

- В.Н. Степченко, В.А. Багрянцев // Геоинформатика. – 2014. – № 2 (50). – С. 22–37.
2. *Гонсалес Р.С.* Цифровая обработка изображений / Р.С. Гонсалес, Р.Е. Вудс. – Москва: Техносфера, 2012.
3. *Мухамедьяров Р.Д.* “Око Земли – Всевидящий глаз” – Глобальная аэрокосмическая система дистанционной геотермической интроскопии // Аэрокосм. курьер. – 2006. – № 3 (45).
4. *Мухамедьяров Р.Д.* Метод видеотепловизионной генерализации аэрокосмических съемок для решения геотехногенных задач. Сб. докл. V Междунар. науч.-практ. конф. “Актуальные проблемы урановой промышленности”. г. Алматы, 18–20 сент. 2008 г. – Алматы, 2008. – С. 319–334.
5. *Мухамедьяров Р.Д.* Метод видеотепловизионной генерализации и полупрозрачность глубинных структур Земли. Материалы конференции “Инновационные технологии в геологии и разработке углеводородов”. – Казань, 2009.
6. *Мухамедьяров Р.Д.* О поляризационных характеристиках собственного излучения морской поверхности / Р.Д. Мухамедьяров, В.Н. Тимофеев // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. – 1981. – Т. 17, № 11. – С. 1178–1183.
7. *Мухамедьяров Р.Д.* Теория и разработка оптико-электронных систем с симметричным входом: Докт. дис. – 1991.
8. *Пат. РФ 2086935.* Способ измерения температуры / Р.Д. Мухамедьяров, Р.И. Харисов. – Опубл. 10.01.1994 г.
9. *Туманов В.Р.* Метод видеотепловизионной генерализации – одно из перспективных направлений исследований геологии углеводородов / В.Р. Туманов, Р.Д. Мухамедьяров // Повышение нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки месторождений и комплексное освоение высоковязких нефтей и природных битумов. – Казань: ФЭН, 2007. – С. 580–585.
10. *Туманов В.Р.* Метод видеотепловизионной генерализации в геологоразведке / В.Р. Туманов, Р.Д. Мухамедьяров // Тепловое поле Земли и методы его изучения. – Москва: РИО РГГРУ, 2008. – С. 250–256.
11. *Христофорова Н.Н.* Зависимость между тепловыми и упругими свойствами горных пород // Георесурсы. – 2002. – № 4 (12). – С. 9–10.

## ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМОРОЗВІДКИ НА БАЗІ ДАНИХ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМАНЬ

*М.К. Вінніченко<sup>1</sup>, О.М. Вінніченко<sup>2</sup>, І.В. Глущенко<sup>1</sup>, В.М. Степченко<sup>1</sup>, В.А. Багрянцев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> НВП “Спеціальний центр аерокосмічних технологій”, просп. К. Маркса, 81, оф.12, Дніпропетровськ 49000, Україна, e-mail: aero\_space@ukr.net

<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Васильківська 90, Київ 03022, Україна, e-mail: kse95641898@yandex.ua

На засадах сучасних знань про фізику теплових процесів, які відбуваються у геосередовищі, системно викладено термодинамічні основи методів терморозвідки на матеріалах дистанційних спостережень в оптичному, інфрачервоному діапазоні і радіодіапазоні електромагнітних хвиль. На підставі нечисленних розрізаних публікацій зроблено спробу популяризації основних принципів, які слугували відправною точкою для створення методів і технологій інтроскопії (геотомографії), застосування яких дає змогу здійснювати зондування Землі практично на довільно задану глибину, що дає можливість визначити структуру і термодинаміку геосередовища. Зокрема, подано уявлення про метод видеотепловізіонної генерализації Р.Д. Мухамедьярова, який складає основу згаданих технологій, що деякою мірою заповнить прогалину у науковій періодиці за зазначеною темою.

Розглянуто конкретні приклади застосування технології теплової геотомографії, розробленої “Спеціальним центром аерокосмічних технологій” (м. Дніпропетровськ), для вирішення різноманітних геоструктурних та пошукових завдань нафтогазового напрямку в різних умовах і різних регіонах земної кулі. Встановлено, що термодинамічні особливості геосередовища можуть слугувати прямим індикатором наявності покладів вуглеводнів. Це відрізняє дистанційну терморозвідку від інших геофізичних методів.

**Ключові слова:** терморозвідка, дистанційні методи, інтроскопія, геотомографія, метод відеотепловізійної генералізації, геосередовище, вуглеводні.

## THEORY AND PRACTICE OF TECHNOLOGIES OF GEOTHERMAL EXPLORATION ON A DATABASE OF MULTISPECTRAL SATELLITE SURVEY

N.K. Vinnichenko<sup>1</sup>, O.N. Vinnichenko<sup>2</sup>, I.V. Glushchenko<sup>1</sup>, V.N. Stepchenko<sup>1</sup>, V.A. Bagryantsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>“Special Centre of Aerospace Technologies”, 81 Karl Marx Ave., off. 12, Dnepropetrovsk 49000, Ukraine,  
e-mail: aero\_space@ukr.net

<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, 90 Vasylykivska Str., Kiev 03022, Ukraine,  
e-mail: kse95641898@yandex.ua

**Purpose.** The purpose of the paper is to present a systemic exposition, based on modern concepts of the physics of thermal processes in geologic environment, of the thermodynamic foundation of geothermal exploration methods based on remote monitoring in the optical, infrared and radio wavelengths of electromagnetic waves. To popularize basic principles that have served as the starting point for the creation of methods and introscopy technologies (geotomography), which significantly increase the amount of information on the structure and thermodynamics of geologic environment that complements data from other geophysical methods.

**Design/methodology/approach.** The technology of thermal introscopy (geotomography) the results of which are presented, rests on the R.D. Muhamedjarov’s “Method of video thermovision generalization”. Technology allows us to conduct sensing of the Earth at a near arbitrary depth, which in terms of Petroleum Geology permits to determine not only the localization of hydrocarbon deposits but also their nature.

**Findings.** The publication significantly contributes to the scientific literature on the subject because the primary sources used in it are scattered and few. Examples of application of the thermal geotomography technology by developed “Special Center of Aerospace Technologies” (Dnepropetrovsk, Ukraine), which are widely presented in the article, show high efficiency of its solutions for diverse geostructural and search problems of oil and gas areas. Of special attention is the possibility to indicate HC directly.

**Practical value/implications.** The practical advantages primarily related to the fact that it is possible to apply the technology independent from terrain conditions; the technology is also environmentally clean, efficient, of relatively low cost, and of high success rate.

**Keywords:** geothermal exploration, remote methods, introscopy, geotomography, method of video thermovision generalization, geological environment, hydrocarbons.

### References:

1. Vinnichenko O.N., Vinnichenko N.K., Glushchenko I.V., Stepchenko V.N., Bagryantsev V.A. *Ispol'zovanie tehnologii teplovoj geotomografii dlja izuchenija vnutrennej struktury geosredy i poiska lovshek uglevodorodov* [Using of thermal geotomography technology to investigate inner structure of the geologic environment and hydrocarbon traps searching]. *Geoinformatika* (Ukraine), 2014, no. 2 (50), pp. 22-37.
2. Gonsales R.S., Vuds R.E. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Digital processing of images]. Moscow, *Tehnosfera*, 2012.
3. Muhamedjarov R.D. “Oko Zemli - Vsevidjashhij glaz” - *Global'naja ajerokosmicheskaja sistema distancionnoj geotermicheskoj introskopii* [“Eye of the Earth - All-Seeing Eye” - Global aerospace system of remote geothermal introscopy]. *Ajerokosmicheskij kur'er*, 2006, no. 3 (45).
4. Mukhamedyarov R.D. *Metod videoteplovizionnoy generalizatsii aerokosmicheskikh s'emok dlya resheniya geotekhnogennykh zadach* [Method of video-thermovision generalization of aerospace survey for the solution of geotechnogenic tasks]. *Sbornik dokladov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Aktual'nye problemy uranovoy promyshlennosti”* [Collection of reports of V International scientific and practical conference “Actual problems of the uranium industry”]. 18-20 September 2008, Almaty, pp. 319-334.
5. Mukhamedyarov R.D. *Metod videoteplovizionnoy generalizatsii i poluproзраchnost' glubinykh struktur Zemli* [Method of video thermovision generalization and translucency of Earth deep structures]. *Materialy konferentsii “Innovatsionnye tekhnologii v geologii i razrabotke uglevodorodov”* [Conference materials “Innovative technologies in geology and development of hydrocarbons”]. Kazan, 2009.
6. Mukhamedyarov R.D., Timofeev V.N. *O polyarizatsionnykh kharakteristikakh sobstvennogo izlucheniya morskoy poverkhnosti* [About polarization characteristics of self-radiation of the sea surface]. *Izv. AN SSSR, seriya Fizika atmosfery i okeana* [The Proceedings of the USSR Academy of Sciences, area of Atmospheric and Oceanic Physics], 1981, vol. 17, no. 11, pp. 1178-1183.

7. Mukhamedyarov R.D. *Teoriya i razrabotka optiko-elektronnykh sistem s simmetrichnym vkhodom*. *Doktorskaya dissertatsiya* [Theory and development of optoelectronic systems with balanced input. Doctor dissertation]. 1991
8. Patent 2086935 RF. *Sposob izmereniya temperatury* [Method for measuring the temperature]. R.D. Mukhamedyarov, R.I. Kharisov / 10.01.1994.
9. Tumanov V.R., Mukhamedyarov R.D. *Metod videoteplovizionnoy generalizatsii - odno iz perspektivnykh napravleniy issledovaniy geologii uglevodorodov* [Method of video-thermvision generalization - one of the most perspective areas of hydrocarbon geology research]. *V knige "Povyshenie nefteodachi plastov na pozdney stadii razrabotki mestorozhdeniy i kompleksnoe osvoenie vysokovязkikh neftey i prirodnykh bitumov"* [In the book "Increase of oil recovery of layers at a late stage of deposit development and integrated development of high-viscosity oil and native bitumens"]. Kazan, Fen, 2007, pp. 580-585.
10. Tumanov V.R., Mukhamedyarov R.D. *Metod videoteplovizionnoy generalizatsii v geologorazvedke* [Method of video-thermvision generalization in geological exploration]. *V knige "Teplovoe pole Zemli I metody ego izucheniya"* [In the book "Thermal field of Earth and methods of its studying"]. Moscow, RIO RGGU, 2008, pp.250-256.
11. Khristoforova N.N. *Zavisimost' mezhdu teplovymi I uprugimi svoystvami gornyykh porod* [The relationship between the thermal and elastic properties of the rocks]. *Georesursy*, 2002, no. 4 (12), pp. 9-10.

*Поступила в редакцию 08.12.2014 г.  
Received 08/12/2014*