

## Построение объемных моделей теплового поля с использованием вейвлет – преобразования при дистанционном тепловизионном зондировании Земли из космоса

В.Л. Онегов<sup>1</sup>, Л.К. Каримова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ТРАНС-СЕРВИС»

187118 Куриши, Волховская набережная, 18

E-mail: archon1980@mail.ru

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный университет

420008 Казань, Кремлевская, 18

E-mail: lyailya\_karimova@mail.ru

В статье рассматривается использование вейвлет-анализа при дистанционном тепловизионном зондировании. Проведено выделение локальных источников тепла в температурном поле с использованием вейвлет-преобразования. Рассмотрено применение вейвлет-анализа при обработке космических тепловизионных снимков Скоропадовского поднятия.

**Ключевые слова:** дистанционное тепловизионное зондирование, космический снимок, вейвлет-анализ, тепловизионная томография, тепловое поле.

### Введение

Все большее признание в российских и зарубежных научных кругах получает новейший геофизический метод – дистанционное тепловизионное зондирование, которое основано на принципе томографии геологических сред (Каримов и др., 2009). В этой технологии используют разновременные авиационные и космические снимки в дальней инфракрасной области электромагнитного спектра. Рассчитывают объемные модели плотности потока теплового излучения среды для решения геологических (изучение глубинного строения Земли, поиск нефти, газа и подземных вод), техногенных и экологических задач. Существенная новизна метода состоит в получении непрерывной объемной картины распределения тепловых характеристик поля.

В связи с тем, что технология тепловизионной томографии появилась сравнительно недавно, а ее математический аппарат разработан крайне слабо, перспективы ее развития целесообразно связывать с классическими подходами, разработанными в геофизике. Одним из математических подходов в направлении теории и технике обработки сигналов и изображений являются непрерывные вейвлет-преобразования. В статье рассмотрен подход для построения объемных моделей теплового поля с использованием вейвлет-анализа космических тепловизионных снимков. В качестве подтверждения эффективности разработанного метода приведена объемная тепловая модель Скоропадовского поднятия и выполнено сравнение ее с результатами других геофизических исследований (сейсморазведки и электромагнитного зондирования).

### Основы непрерывного вейвлет-преобразования

Термин «вейвлет» (от французского «ondelette») дословно переводится как «короткая (маленькая) волна». Вейвлет-преобразование сигнала состоит в представлении его в виде обобщенного ряда по системе базисных функций (Яковлев, 2003):

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

сконструированных из исходного (материнского) вейвлета  $\psi(t)$  за счет операций сдвига  $b$  и изменения масштаба  $a$ . Множитель  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего коэффициента  $a$ . Таким образом, для заданных значений  $a$  и  $b$  функция  $\psi_{ab}(t)$  и есть вейвлет, порождаемый материнским вейвлетом  $\psi(t)$ .

Непрерывное прямое вейвлет-преобразование сигнала  $S(t)$  выглядит следующим образом (Добеши И., 2001):

$$W_S(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

или в случае если  $a$  и  $b$  принимают только дискретные значения:  $a = a_0^m$ ,  $b = nb_0 a_0^m$ ,  $m$  и  $n$  пробегает значения из  $Z$ , величины  $a_0 > 1$ ,  $b_0 > 0$  – фиксированные:

$$W_S(a, b) = a_0^{-m/2} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt.$$

Следует отметить, что если исследуемый сигнал  $S(t)$  представляет собой одиночный импульс длительностью  $\tau_u$ , сосредоточенный в окрестности  $t = t_0$ , то его вейвлет-спектр будет иметь максимальное значение в окрестности точки с координатами  $a = \tau_u$ ,  $b = t_0$ .

Известно (Добеши, 2001), что прямое вейвлет-преобразование содержит информацию, как об анализируемом сигнале, так и об анализирующем вейвлете. Несмотря на это оно позволяет получить объективную информацию о сигнале, благодаря ряду своих свойств, которые не зависят от выбора вейвлета.

Все предыдущие построения используются для вейвлет-анализа одномерных функций. Но при решении ряда практических задач, например, таких как при тепловизионной томографии требуется анализ функций от двух переменных  $S(x, y)$ . В этом случае в качестве вейвлетов используют функции следующего вида:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{a_1 a_2}} \psi\left(\frac{x-b_1}{a_1}, \frac{x-b_2}{a_2}\right),$$

где  $a_1$  и  $a_2$ ,  $b_1$  и  $b_2$  – значения  $a$  и  $b$  по каждому измерению.

На практике, при обработке реальных массивов данных, которыми являются космические снимки, двумерное вейвлет-преобразование получают как тензорное произведение одномерных преобразований по каждому измерению (Петухов, 1999). Таким образом, на двумерной плоскости происходит анализ по горизонтали, вертикали и диагонали с одинаковым разрешением.

Достоинством тензорного произведения является то, что его использование вместо двумерного вейвлета требует меньших вычислительных затрат. При последовательной реализации одномерных вейвлет-преобразований затраты на один элемент массива равны  $2(2N-1)$  операций сложения и умножения, где  $N$  – длина окна. В случае же прямой реализации двумерного вейвлет-преобразования с окном размерностью  $N \times N$  требуется  $2N^2 - 1$  арифметическая операция.

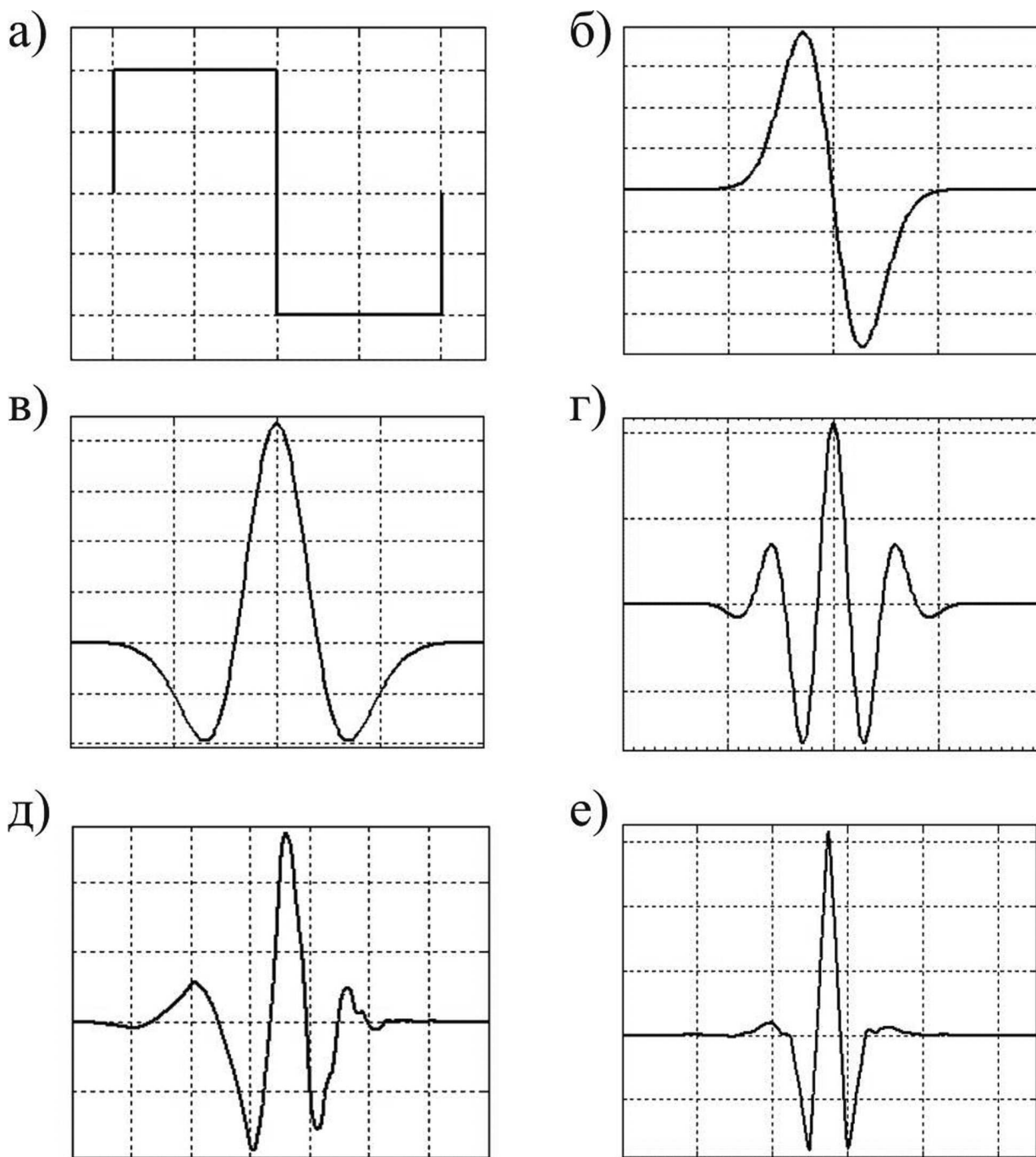


Рис. 1 Примеры вейвлетов: а – Хаара; б – Гаусса первого порядка (WAVE); в – Гаусса второго порядка (MHAT); г – Гаусса восьмого порядка; д – Добеши четвертого порядка; е – Коифмана второго порядка

### Выделение источника тепла в геологической среде с использованием вейвлет-преобразования

Для проверки возможности использования вейвлет-преобразования при тепловизионной томографии рассмотрим тепловое поле на поверхности Земли, создаваемое цилиндрическим источником бесконечной длины, погруженным в однородную геологическую среду. В соответствии с (Луканин и др., 2000) температура на поверхности задается соотношением:

$$T_w = T_a + (T_0 - T_a) \frac{1}{Bi\sqrt{1+X^2} \ln\left(\frac{2h}{R}\left(1 + \frac{1}{Bi}\right)\right)},$$

где  $X = x/h$ ,  $x$  – координаты, перпендикулярные оси источника,  $h$  – глубина залегания источника,  $R$  – радиус источника,  $T_w$  – температура на поверхности Земли,  $T_0$  – температура источника,  $T_a$  – температура атмосферы,  $Bi = ah/\lambda$  – критерий Био-Савара,  $a$  – коэффициент теплоотдачи на границе «Земля-атмосфера»,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта.

На рис. 2а представлен вид функции распределения температур на поверхности для источника радиусом  $R = 5$  м, расположенном на глубине  $h = 40$  м, коэффициент теплопроводности грунта  $l$  был выбран равным  $0,3$  Вт/м·К, что соответствует теплопроводности сухого песка, коэффициент теплоотдачи  $a = 7$  Вт/м<sup>2</sup>·К. На рис. 2б и 2в представлены результаты разложения полученной функции по вейвлетам Добеши четвертого порядка и Койфмана второго порядка (Добеши, 2001) соответственно. Рисунки представляют собой карты коэффициентов вейвлет-преобразования в проекции на плоскость  $ab$  (масштаб, сдвиг); по оси абсцисс отложен параметр сдвига; по оси ординат – масштаб разложения. Темные области соответствуют отрицательным, а светлые – положительным аномалиям значений  $W(a, b)$ .

На обеих картах коэффициентов проявляется мощная положительная аномалия расположенная вблизи источника, создающего распределение температур на поверхности. В случае вейвлета Добеши (рис. 2б) центр аномалии сдвинут на 10 м относительно реального положения, для вейвлета Койфмана эпицентр аномалии точно соответствует действительному положению источника. Порядок вейвлетов был подобран так, чтобы центр аномалии приходился на масштаб разложения соответствующий глубине источника. Положительные аномалии по краям рисунков обусловлены тем, что функция вне данного интервала не определена.

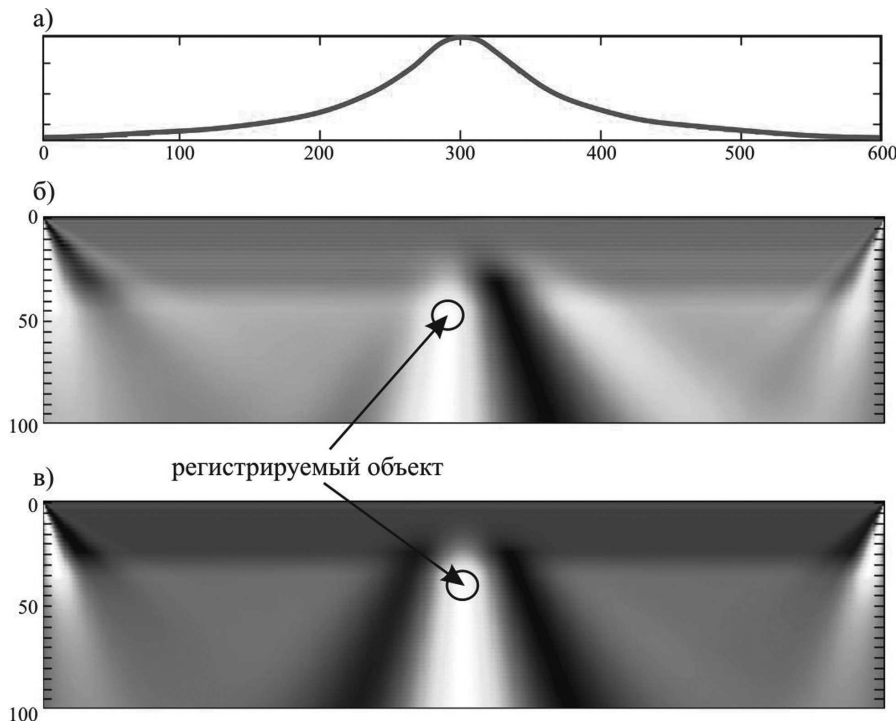


Рис. 2. Разложение теплового поля созданного одиночным источником (а) с использованием вейвлетов Добеши четвертого порядка (б) и Койфмана второго порядка (в)

Проведенные исследования позволили установить с помощью вейвлет-преобразования место расположения источника теплоты (Табл. 1).

Путем выбора вида вейвлета и его порядка можно выявить точное соответствие масштаба разложения с глубиной, которое не будет зависеть от теплопроводности геологической среды  $\lambda$ , температуры  $T_0$  и радиуса  $R$  источника. При этом в процессе исследований ни разу не удалось путем вейвлет-преобразования установить радиус источника.

Наилучшая локализация объекта достигнута при использовании вейвлета Койфмана второго порядка и вейвлетов Гаусса.

### Геофизическая модель Скоропадовского поднятия

Для проверки применимости вейвлет-преобразования на практике нами было выбрано нефтесперспективное Скоропадовское поднятие, расположенное на Южно-Татарском своде и приурочено к Бавлинско-Туймазинской нефтегазоносной зоне.

Современное тектоническое строение фундамента и осадочного чехла территории сформировалось в результате разнонаправленных движений блоков фундамента по разломам. Структурные планы палеозойского осадочного чехла, в основном, отвечают разломно-блоковому строению фундамента и опосредованно – его внутренней структурно-вещественной неоднородности. Локальные нефтесперспективные поднятия чехла располагаются над центральной или краевой частями блока фундамента и ограничиваются прогибами (Хисамов и др., 2006).

Методом ОГТ выявлена малоамплитудная сейсмическая структура (рис. 1д) как по кровле девона (отражающий горизонт «Д»), так и нижнего карбона («У»). Комплексом электромагнитных методов в модификациях магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и дипольного зондирования вызванной поляризации (ДЗ-ВП) проведена оценка поднятия на наличие углеводородов по геоэлектрическим моделям (рис. 3а) электропроводности и поляризуемости (Каримов и др., 2005).

На основе космического снимка методом тепловизионной томографии была построена тепловая объемная модель Скоропадовского поднятия. Основным признаком прогнозирования нефтеносности в данном случае является получаемый эффект над залежами углеводородов в виде зоны слабого градиента локального аномального поля, которая определяет степень отличия продуктивной части пласта от вмещающих пород (рис. 3г). В свою очередь, модель блоково-разломных (рис. 3в) структур отображает геометрию структурных зон: поднятия на уровне кристаллического фундамента в виде аномально плотных блоков пород; области разуплотнения слоев, как правило, совпадающие с пониженными значениями КС электрического каротажа скважин; участки латерального изменения интенсивности ТП, проявляющиеся в виде затемненных зон и сопоставимые с областями минимального продольного электрического сопротивления, которые подчеркивают в разрезе границы раздела сред и геометрию объектов. Учитывая, что разрез представлен преимущественно карбонатным составом пород, на модели блоково-разломных структур разуплотнения выглядят маломощными субгоризонтальными зонами. Они хорошо совпадают с минимумом диаграммы электрокаротажа скважин, которая совмещена с рисунком поля. Места повышенных КС отвечают плотным блокам пород, выделяемых по тепловизионным данным.



Таблица 1. Параметры заданных и восстановленных тепловых источников

Вейвлет	Параметры объекта			Регистрируемый объект		
	Положение объекта	Глубина, м	коэффициент теплопроводности грунта, Вт/м·К	Положение объекта	Масштаб разложения	Радиус, м
Вейвлет Хаара	300	40	0,3	330	30	10
			1,5	330	30	15
		60	0,3	345	70	25
			1,5	345	70	30
Вейвлет Гаусса первого порядка (WAVE)	300	40	0,3	330	10	15
			1,5	330	10	17
		60	0,3	345	25	25
			1,5	345	25	27
Вейвлет Гаусса второго порядка (MHAT)	300	40	0,3	300	12	10
			1,5	300	12	15
		60	0,3	300	22	20
			1,5	300	22	20
Вейвлет Гаусса восьмого порядка	300	40	0,3	300	40	10
			1,5	300	40	10
		60	0,3	300	65	20
			1,5	300	65	20
Вейвлет Добеши четвертого порядка	300	40	0,3	290	40	10
			1,5	290	40	10
		60	0,3	285	70	20
			1,5	285	70	20
Вейвлет Койфмана второго порядка	300	40	0,3	300	40	10
			1,5	300	40	10
		60	0,3	300	60	20
			1,5	300	60	20

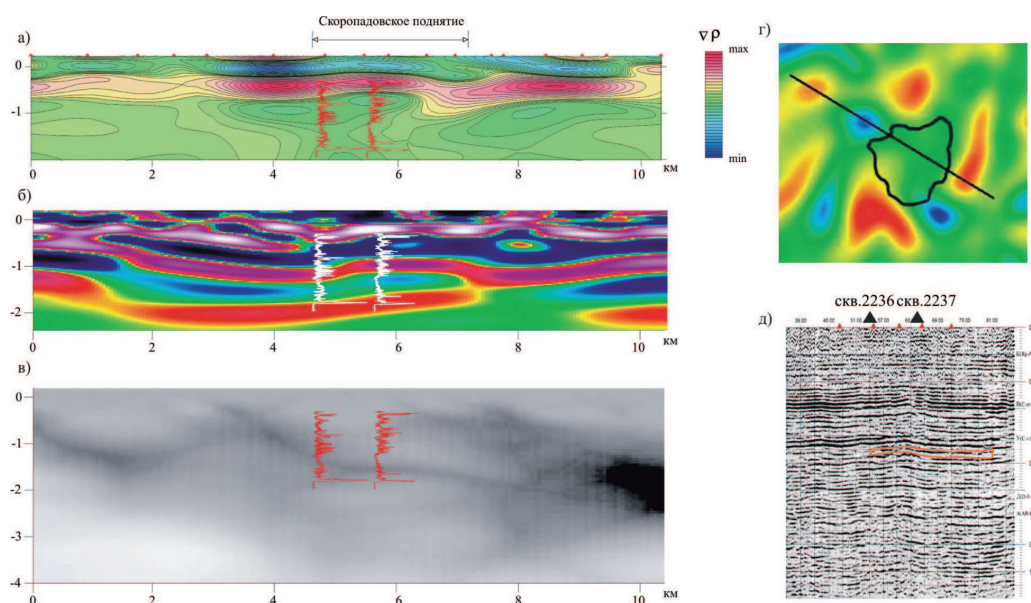


Рис. 3. Результаты комплексных геофизических исследований на Скоропадковском поднятии: а – геоэлектрическая модель МТЗ; б – объемная модель теплового поля, построенная с использованием вейвлет-преобразования; в – модель блоково-разломных структур; г – Локальное тепловое поле в районе Скоропадковского поднятия на глубине 1200 м; д – сейсмический разрез

## **Использование вейвлет-преобразования при построении объемной тепловой модели Скоропадского поднятия**

Нашими предыдущими исследованиями показано, что на основе тепловизионных данных можно выделить отдельные источники тепла в геологической среде путем использования вейвлет-анализа. При этом вейвлет выбирается таким образом, чтобы масштаб разложения соответствовал глубине залегания источника.

Для построения объемной тепловой модели, путем вейвлет-преобразования, использовался тот же космический снимок, что и при тепловизионной томографии, в качестве анализирующего вейвлета был выбран вейвлет Гаусса 8-го порядка. Модель представляет собой набор слоев, каждый из которых является матрицей коэффициентов вейвлет-разложения при определенных масштабах. При этом соответствие масштаба глубине устанавливается путем сравнения полученной модели с ранее проведенными в данном регионе геофизическими исследованиями.

Вертикальный разрез объемной модели представлен на рис. 3б. Разрез с высокой степенью точности отражает горизонтальную слоистость среды. Границы выявляемых слоев совпадают с изменениями характера диаграмм электрокаротажа скважин. Разрез тепловой модели хорошо коррелируется с геоэлектрической моделью МТЗ (рис. 1а). На глубинах 1–1,1 км в районе ПК 6 км наблюдается отклонение слоев от горизонтального направления, совпадающего по положению в плане и по глубине со Скоропадским поднятием. Погрешности совпадения моделей МТЗ и ДТЗЗ на уровне одного из карбонатных комплексов пород составила 51 м или 9%. Если исключить интервал профиля ПК 3–4,5 км как зону, отражающую разные физические свойства среды, то погрешность расхождения уменьшится до 25 м (4,5 %).

Таким образом, построенная путем применения вейвлет-анализа объемная модель имеет хорошую корреляцию с другими геофизическими моделями и отражает глубинное строение осадочного чехла данного региона.

### **Заключение**

Вейвлет-анализ является перспективным направлением дальнейшего развития технологии дистанционного тепловизионного зондирования. Эта технология использует космические снимки, поэтому для их вейвлет-преобразования необходимо применять вейвлеты, зависящие от двух переменных. Такой подход влечет за собой увеличение времени расчетов и их усложнение. Поэтому при построении объемной тепловой модели, для уменьшения времени с сохранением необходимой точности, достаточно использовать тензорное произведение одномерных вейвлет-преобразований.

Объемная модель теплового поля Скоропадского поднятия, построенная с использованием вейвлет-преобразования подтверждается ранее построенными геофизическими моделями и данными электрокаротажа скважин, а также отражает все особенности глубинного строения данного региона. Само Скоропадское поднятие выделяется в разрезах в виде резких отклонений слоев от горизонтального простирания.

## Литература

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная хаотическая динамика», 2001. 464 с.
2. Каримов К.М., Валеев С.Г., Еронина Е.В. Оценка нефтеперспективности структур в Мелекесской впадине по электромагнитным зондированиям // Георесурсы. 2005. №2(7). С. 41-47.
3. Каримов К.М., Онегов В.Л., Кокутин С.Н. и др. Дистанционное тепловизионное зондирование Земли при решении геологических задач // Георесурсы. 2009. №1(29). С. 38–42.
4. Каримов К.М., Онегов В.Л., Кокутин С.Н. и др. Авиационное тепловизионное зондирование геологической среды // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009. №5. С. 24–31.
5. Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. и др. Теплотехника. М.: Высш. шк., 2000. 671 с.
6. Петухов А.П. Введение в теорию базисов всплесков. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 132 с.
7. Хисамов Р.С., Войтович Е.Д., Либерман В.Б. и др. Тектоническое и нефтегеологическое районирование территории Татарстана. Казань: ФЭН, 2006. 328 с.
8. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 104 с.

## Creating 3D thermal field's models with wavelet analysis in remote thermal image sensing of Earth from space

V.L. Onegov<sup>1</sup>, L.K. Karimova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TRANS-SERVIS Ltd.

187118 Kirishi, Volhovskaya quay, 18

E-mail: archon1980@mail.ru

<sup>2</sup>Kazan Federal University

420008 Kazan, Kremlevskaya, 18

E-mail: lyailya\_karimova@mail.ru

The article observes using wavelet analysis in remote thermal image sensing. Carry out separation of local sources of heat in the thermal field with using wavelet analysis. Observed using wavelet analysis in processing thermal space images of Skoropadovskoe.

**Keywords:** remote thermal sensing, space image, wavelet analysis, thermal imaging tomography, thermal field.