

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТЕРРИКОНОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИИ**

Разработана геоинформационная технология обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса для анализа температурного состояния и выявления участков горения терриконов угольно-промышленных регионов. Выполнена апробация технологии на разновременных данных мультиспектральных космических съемок Landsat-TM/ETM+ участка Донецкого угольного бассейна.

Розроблена геоінформаційна технологія обробки даних дистанційного зондування Землі з космосу для аналізу температурного стану і виявлення ділянок горіння терриконів вугільно-промислових регіонів. Виконана апробація технології на різночасових даних мультиспектральних космічних зйомок Landsat-TM/ETM+ фрагменту території Донецького вугільного басейну.

Geoinformation technology is created. It is aimed at processing Earth remote sensing data from space to analyze slagheaps temperature state and identify burning areas of coal-bearing rocks. The technology is tasted on the Landsat-TM/ETM+ hetero-temporal multispectral satellite imagery for the Donets Coal Basin.

**Введение.** Автоматизированное выявление горящих терриконов, оказывающих интенсивное воздействие на окружающую природную среду, является первоочередной задачей для своевременного принятия мер по ликвидации очагов продолжительного горения. Изучение проблем горящих терриконов ведется в Украине наземными методами [1]. Локальная привязка, высокая трудоемкость и стоимость работ не позволяет использовать наземные методы для исследования крупных территорий. Поэтому зарубежные исследователи для локализации участков длительного горения углесодержащих пород – угольных пожаров, используют данные дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) [2].

Существующие технологии дистанционного обнаружения угольных пожаров нацелены на выявление поверхностных выходов угольных пород, что не характерно для угольных терриконов, либо базируются на обнаружении тепловых аномалий по ночным данным космических съемок, доступ к которым зачастую ограничен либо отсутствует. Кроме того, систематическое влияние облачности на качество данных космических съемок в дневное время суток не позволяет использовать для изучения состояния терриконов традиционные методы прогнозирования временных рядов, предполагающие соблюдение условия полноты и равенства интервалов между датами съемок, а также присутствие во временном ряде детерминированной составляющей. Указанные обстоятельства требуют создания новых методов и информационных технологий, обеспечивающих преобразование и аналитическую обработку разновременных мультиспектральных космических изображений. Это обеспечит повышение эффективности использования изображений терриконов в системах поддержки принятия решений предприятий угольной промышленности.

**Постановка задачи.** В общем виде задача анализа космических изображений терриконов предполагает использование технологий цифровой обработ-

ки изображений и распознавания образов. Однако, применение существующих методов фильтрации, сегментации, классификации не позволяет прийти к должному результату при анализе космических изображений терриконов. Сложность их обработки связана с присутствием невыразительных участков горения, расположенных на неоднородном яркостном фоне и слабо отличимых по своим спектральным характеристикам от участков различных типов земного покрова. Поэтому актуальной научно-прикладной задачей является создание геоинформационной технологии для решения практических задач анализа состояния и выявления горящих терриконов на основе разработки новых методов, моделей и алгоритмов обработки разновременных данных ДЗЗ.

**Целью** работы является создание геоинформационной технологии для повышения эффективности результатов автоматизированного анализа изображений терриконов и обнаружения процессов горения.

### **Геоинформационная технология анализа состояния терриконов.**

Основные этапы разработанной технологии следующие: ввод данных, формирование и оптимизация признакового пространства, классификация, оценка степени пожароопасности терриконов, исследование температурного поля терриконов, анализ и визуализация результатов (рис. 1).

*1. Ввод данных.* На первом этапе производится формирование выборки данных разновременных мультиспектральных (в частности, тепловых) космических изображений, создание базы геоданных наземных наблюдений и формирование контрольной выборки терриконов с известным состоянием (например, озелененный, горящий, действующий).

*2. Формирование признакового пространства.* По данным тепловых космических изображений оценивается приповерхностная температура. Вычисляются значения спектральных индексов (например, Normalized Difference Vegetation Index, Normalized Difference Water Index и др.), рассчитываются значения текстурных характеристик. Полученные наборы характеристик подаются на вход процедур контролируемой классификации для локализации терриконов. Для повышения точности результатов классификации разработаны алгоритмы расчета информативных корреляционных и инвариантных интегральных характеристик [3].

*3. Оценка информативности признаков.* Оптимизация признакового пространства производится на основе факторного анализа по методу главных компонент.

*4. Классификация и морфометрический анализ.* Классификация с обучением типов земного покрова производится с использованием метода ближайшего соседа и функции меры близости (ФМБ) по минимуму спектральных расстояний между векторами характеристик.

*5. Морфометрический анализ.* В результате выполнения процедур классификации определяется классовая принадлежность для каждого пикселя изображений терриконов. Группа смежных пикселей класса образует компоненту связности или объект, интерпретируемый в терминах объектов и явлений реального мира. Процедуры морфометрического анализа рассчитывают соотношения показателей площади и периметра объекта, в частности, индекс компактности и индекс подобия к окружности, что позволяет уточнить классификацию.



Рис. 1. Общая схема геоинформационной технологии

б. *Оценка степени пожароопасности терриконов.* По вероятности возгорания  $y \in [0;1]$  выделяют 3 класса пожароопасности терриконов (соответствующее множество термов:  $\Pi = \{\text{"незначительная"}, \text{"существенная"}, \text{"угрожающая"}\}$ ). Классы не имеют четких границ, поэтому целесообразно применять аппарат нечеткого логического вывода к решению задачи оценки степени пожароопасности. Разработана модель, представляющая функциональное отображение вида:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3) \rightarrow y \in [0;1], \quad (1)$$

где  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3)$  – вектор влияющих факторов, содержащий данные о состоянии растительности  $x_1$  (множество термов:  $R = \{\text{"отсутствует"}, \text{"редкая"}, \text{"густая"}\}$ ), влажности поверхности террикона  $x_2$  (множество термов:  $V = \{\text{"пониженная"}, \text{"умеренная"}, \text{"повышенная"}\}$ ) и приповерхностной температуре  $x_3$  (множество термов:  $T = \{\text{"низкая"}, \text{"средняя"}, \text{"высокая"}\}$ ). Нечеткий вывод Мамдани выполняется по базе знаний, моделирующей зависимость  $y = f(x_1, x_2, x_3)$ :

$$(x_1 = \tilde{a}_{1j}) \Theta_j (x_2 = \tilde{a}_{2j}) \Theta_j (x_3 = \tilde{a}_{3j}) \Rightarrow y = \tilde{d}_j, j = \overline{1, m},$$

где  $\tilde{a}_{ij}$  – нечеткий терм, которым оценивается фактор  $x_i$  в  $j$ -м правиле,  $j = \overline{1, m}$ ;  $\tilde{d}_j$  – заключение  $j$ -го правила;  $m = 27$  – количество правил в базе знаний;  $\Theta_j$  – логическая операция объединения либо пересечения, связывающая фрагменты посылки  $j$ -го правила;  $\Rightarrow$  – нечеткая импликация.

Для терриконов с существенной и угрожающей пожароопасностью исследуется пространственно-временная динамика изменения поля приповерхностных температур.

7. *Исследование особенностей температурного поля терриконов.* Изучение температурного поля основывается на разработанной математической модели, использующей дифференциальные операторы первого и второго порядков, а также предложенном методе выявления устойчивых базовых пространственно-временных структур (БПВС) терриконов с использованием объективной кластеризации.

Поле приповерхностных температур в  $q$ -й момент времени ( $q = 1, \dots, M$ ) представляет собой трехмерную функцию  $T_q(x, y, z)$ , заданную во всех точках пространства. Каждой точке поля ставится во взаимно-однозначное соответствие множество [5]:

$$\Phi = \{T, \bar{a}, |\bar{a}|, d, \varphi\}, \quad (2)$$

где  $T = \{T(t_q, t_s)\}$  – нормированные абсолютные разности температур, оцененные для  $q$ -го и  $s$ -го моментов наблюдений,  $q, s \in \{1, \dots, M\}$ ;  $q \neq s$ ;  $\bar{a} = \{\bar{a}_{q,s}\}$  – градиент абсолютных значений нормированных разностей температур, характеризующий скорость и направление изменения температуры;  $d = \{d_{q,s}\}$  – дивергенция градиента, определяющая источник температурного поля;  $\varphi = \{\varphi_{q,s}\}$

– угол между векторами градиентов поля температур для  $q$ -го и  $s$ -го моментов наблюдений.

Множество разновременных тепловых космических изображений  $F = \{F(t_1), F(t_2), \dots, F(t_m)\}$  ( $m = 1, \dots, M$  – номер момента времени) группируется в непересекающиеся разносезонные выборки  $S = \{S(\tau_1), S(\tau_2), \dots, S(\tau_p)\}$  ( $p = 1, \dots, P$  – номер периода времени) и содержит множество  $Q = \{Q^{(1)}, Q^{(2)}, \dots, Q^{(n)}\}$  объектов – фрагментов изображений терриконов ( $n$  – количество объектов). Результатом пространственно-временной кластеризации является множество пространственно-временных структур (ПВС) объектов:  $Y = \{Y^{(1)}, Y^{(2)}, \dots, Y^{(n)}\}$ ,  $Y^{(i)} = \{y_1^{(i)} \cup y_2^{(i)} \cup \dots \cup y_{l_i}^{(i)}\}$  ( $l_i$  – количество ПВС  $i$ -го объекта). В качестве базовой

пространственно-временной структуры (БПВС)  $i$ -го объекта  $y^{(i)}$  принимается ПВС, содержащая источник температурного поля. БПВС соответствуют участкам горения терриконов.

Для формирования ПВС применяются процедуры кластеризации к каждому элементу множества  $Q$ . Исходными данными для кластеризации пикселей объекта  $Q^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) является блочная матрица:

$$(G: X(\tau_1): X(\tau_2): \dots : X(\tau_p)),$$

где  $G$  – матрица размером  $w_i \times 2$  координат пикселей в пространстве изображения ( $w_i$  – количество пикселей  $i$ -го объекта,  $i = 1, \dots, n$ );  $X(\tau_p) = (X_1(\tau_p), X_2(\tau_p), \dots, X_{w_i}(\tau_p))$  – матрица типа "объект-свойство".

Кластеризация  $K(\tau_p)$  пикселей объекта  $Q^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) в период  $\tau = \tau_p$  представляется как:

$$K(\tau_p) = \{K_1(\tau_p), K_2(\tau_p), \dots, K_k(\tau_p)\},$$

где  $k$  – количество кластеров;

$$K_i(\tau_p) \quad - \quad i\text{-й кластер}, \quad \bigcup_{i=1}^k K_i(\tau_p) = X(\tau_p) \quad (i = 1, \dots, k),$$

$$K_i(\tau_p) \cap K_j(\tau_p) = \emptyset, \quad \forall i \neq j.$$

В результате каждому пикселю объекта  $Q^{(i)}$  сопоставляется номер кластера, к которому он принадлежит в период  $\tau_p$ .

Формирование ПВС объектов множества выборок  $S$  производится с учетом преемственности кластеризаций, основанной на предположении о сходстве результатов кластеризаций для последовательных периодов времени.

Преемственность кластеризаций учитывается посредством построения матрицы  $A(\tau_p, \tau_{p+1})$ , каждый элемент  $a_{ij}(\tau_p, \tau_{p+1})$  которой определяет коли-

чество пикселей, одновременно входящих в кластер  $K_i(\tau_p)$  и  $K_j(\tau_{p+1})$ ,  $i, j = 1, \dots, k$ .

Результатом пространственно-временной кластеризации является множество

$$Y = (Y^{(1)}, Y^{(2)}, \dots, Y^{(n)}),$$

где  $Y^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) – множество ПВС  $i$ -го объекта,  $Y^{(i)} = \{y_1^{(i)} \cup y_2^{(i)} \cup \dots \cup y_{l_i}^{(i)}\}$  ( $l_i$  – количество ПВС  $i$ -го объекта).

Каждый объект  $Q^{(i)}$  содержит подмножества пикселей  $y_j^{(i)}$  различных кластеров. В качестве базовой пространственно-временной структуры (БПВС)  $i$ -го объекта  $y^{(i)}$  принимается ПВС, содержащая источник температурного поля (для нее  $\text{div grad } T > 0$ )

Множество БПВС  $\overset{0}{Y} = \left\{ y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(n)} \right\}$ , подается на вход модифициро-

ванного алгоритма объективной кластеризации (рис. 2), базирующейся на итеративном принципе формирования кластеров в соответствии с различными мерами сходства между объектами, а также внутренними и внешними критериями качества кластеризации.

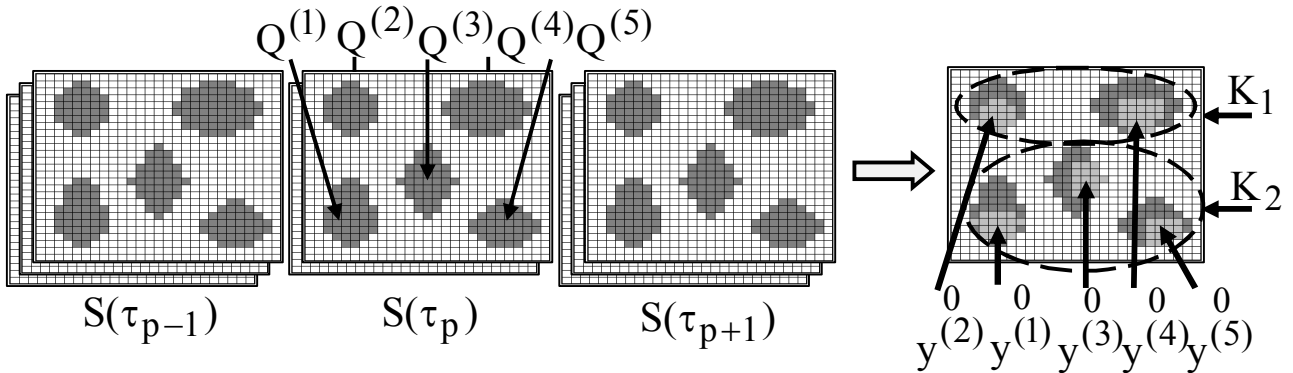


Рис. 2. Формирование базовых пространственно-временных структур

Для обоснования достоверности разбиения множества  $\overset{0}{Y}$  на однородные кластеры по совокупности характеристик БПВС вводится внешний критерий, основанный на разбиении множества  $\overset{0}{Y}$  по  $R$  временным срезам на  $R$  ( $R < M$ ) непересекающихся равномоощных подмножеств:

$$\overset{0}{Y} = \left[ Y^{(1)}, Y^{(2)}, \dots, Y^{(R)} \right]^T, \quad Y^{(j)} = \left( y_j^{(1)}, y_j^{(2)}, \dots, y_j^{(n)} \right), \quad j = 1, \dots, R$$

Пусть для множества  $Y$  получено множество кластеризаций  $K = \{K^{(1)}, K^{(2)}, \dots, K^{(R)}\}$ . Кластеризация  $K = K^{(0)}$  является объективной в случае наибольшего числа совпадений кластеризаций, выполненных для равномоощных подмножеств, что соответствует минимуму критерия  $J(K)$ :

$$K^{(0)} = \arg \min(J(K)),$$

где  $J(K)$  – мера сходства между кластеризациями, составляющими множество  $K$ :

$$J(K) = \frac{\frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \left( \sum_{j=1}^{k_i} |K_j^{(i)}|^2 \right) - \frac{1}{C_R^2} \sum_{i_1=1}^{R-1} \sum_{i_2=i_1+1}^R \left( \sum_{j_1=1}^{k_{i_1}} \sum_{j_2=1}^{k_{i_2}} |K_{j_1}^{(i_1)} \cap K_{j_2}^{(i_2)}|^2 \right)}{\frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \left( \sum_{j=1}^{k_i} |K_j^{(i)}|^2 \right)}, \quad (3)$$

где  $k_i$  – количество кластеров в  $i$ -й кластеризации,  $i = 1, \dots, R$ ;  $|K_j^{(i)}|$  – количество элементов  $j$ -го кластера в  $i$ -й кластеризации,  $j = 1, \dots, k_i$ ;  $C_R^2$  – число сочетаний из  $R$  элементов множества  $K$  по 2.

При  $J(K) = 0$  кластеризации множества  $K$  полностью совпадают, при  $J(K) = 1$  кластеризации полностью различны.

Объективная кластеризация БПВС позволяет отнести терриконы к категориям техногенной опасности и оценить степень их воздействия на окружающую природную среду прилегающих территорий.

*8. Визуализация и анализ результатов.* Конечным результатом геоинформационной технологии являются данные о расположении терриконов, сведения о категориях пожароопасности терриконов, информация об источнике и пространственно-временной динамике распространения поля приповерхностных температур терриконов, а также сведения о расположении устойчивых пространственно-временных структур, соответствующих участкам горения терриконов. Анализ результатов предусматривает расчет ошибок классификации изображений при локализации терриконов (по данным картографических Интернет-сервисов) и оценку точности выявления участков горения терриконов (по данным контрольной выборки).

Визуализация представленных в растровом и векторном виде результатов геоинформационной технологии осуществляется на основе картографического сервиса Google Maps API совместно с языком программирования JavaScript, позволяющего размещать разнородные пространственные данные на картах и космических изображениях высокого пространственного разрешения.

**Обсуждение результатов.** Разработанная геоинформационная технология позволила решить ряд прикладных задач анализа терриконовых ландшафтов Донецкого угольного бассейна: локализации терриконов по множеству корреляционных и инвариантных интегральных характеристик с использованием процедур морфометрического анализа; выявления очагов горения терриконов и

оценки направления распространения поля приповерхностных температур в пространстве во времени; отнесения терриконов к категории горящих на основе выделения устойчивых базовых пространственно-временных структур по разносезонным выборкам данных тепловых космических съемок с применением объективной кластеризации.

Для тестового участка (табл. 1) выполнена контролируемая классификация типов земного покрова для локализации терриконов. Процедуры морфометрического анализа позволили выявить расположение терриконов с точностью 84% и устранить участки, ложно отнесенные к классу "Терриконы".

Таблица 1

Общие сведения о тестовом участке

Расположение терриконов контрольной выборки на изображении Landsat-TM тестового участка (канал 6, дата регистрации: 27.06.2012)	Сведения о тестовом участке
	<p><b>Площадь:</b> 1053 км<sup>2</sup>  <b>Размеры:</b> 40,5×26 км  <b>Города:</b> Донецк, Макеевка  <b>Исходные данные:</b>  <b>Landsat-TM</b>  Даты регистрации: 02.05.1985, 03.04.1986, 15.05.2007, 21.06.2009, 07.07.2009, 09.09.2009, 08.06.2010, 12.09.2010, 27.06.2012;  <b>Landsat-TM+</b>  Даты регистрации: 03.05.2000, 26.10.2000, 04.04.2001, 09.05.2002, 29.08.2002, 28.05.2003</p>

Данные тепловых съемок Landsat-TM/ETM+ тестового участка сгруппированы в 3 сезонные выборки. *Выборка I* содержала все изображения, *выборка II* – данные съемок за май-июнь, *выборка III* – данные съемок за август-сентябрь и *выборка IV* – данные, зарегистрированные в апреле и октябре. Для изображений *выборок I-IV* выявлены температурные аномалии, позволившие классифицировать терриконы как горящие и не горящие. Сопоставление результатов классификации с априорными данными позволило рассчитать ошибку классификации (26,2% для *выборки I*). *Выборки II* и *IV* характеризуются наибольшим процентом правильно классифицированных терриконов – 79,8% и 81,0% соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Результаты классификации терриконов

Результаты классификации	Выборка I	Выборка II	Выборка III	Выборка IV
Ошибка классификации (%)	26,2	20,2	22,6	19,1
Ошибка 1 рода (%)	1,2	4,8	10,7	7,1
Ошибка 2 рода (%)	25,0	15,5	11,9	11,9
Процент правильно классифицированных терриконов (%)	73,8	79,8	77,4	81,0



В результате применения к выборкам объективной пространственно-временной кластеризации установлено расположение БПВС терриконов, также позволившее выполнять их отнесение к категориям горящих и не горящих. Например, присутствие ярко выраженных БПВС установлено для терриконов шахт "Южная", №29, "им. 60-летия СССР", ЦОФ "Чумаковская", №12 "Наклонная", "им. Челюскинцев", "Калинина", "Заперевальная" (рис. 3).

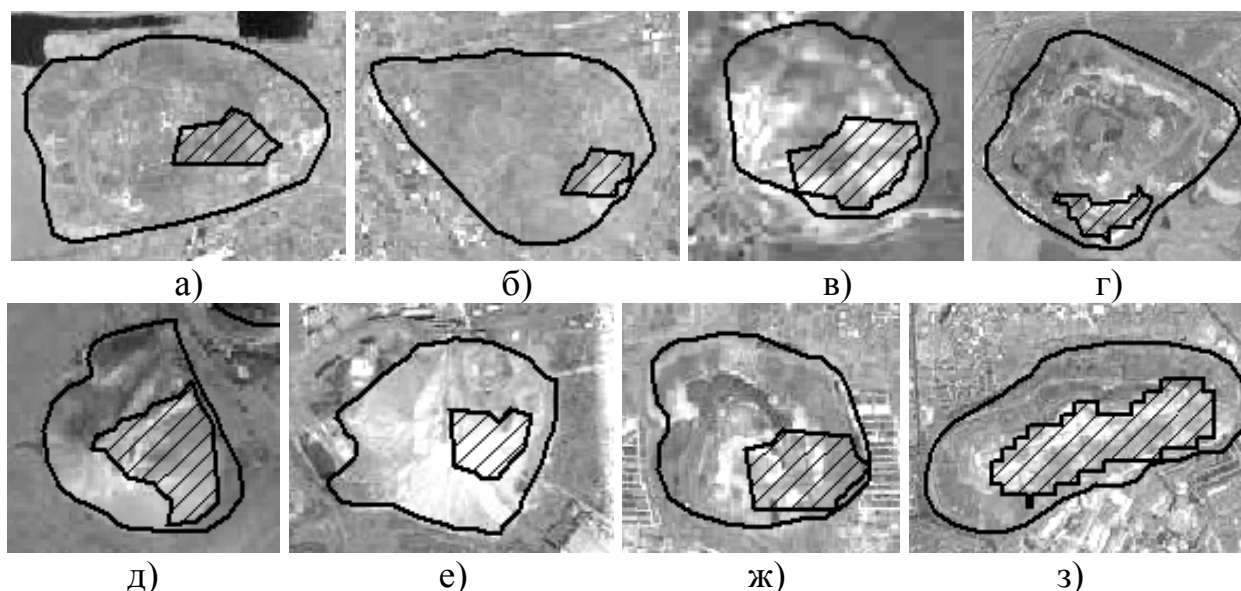


Рис. 3. Выделенные БПВС на изображениях сверхвысокого пространственного разрешения Интернет-сервиса Google терриконов шахт:

а) "Южная", б) №29, в) "им. 60-летия СССР", г) ЦОФ "Чумаковская", д) №12 "Наклонная", е) "им. Челюскинцев", ж) "Калинина", з) "Заперевальная"

**Выводы.** В работе предложена геоинформационная технология для решения практических задач анализа состояния и выявления горящих терриконов угольно-промышленных регионов на основе создания новых методов, моделей и алгоритмов обработки разновременных данных космических съемок.

Применение геоинформационной технологии для анализа терриконов фрагмента территории Донецкого угольного бассейна по данным ДЗЗ позволило выявить терриконы с существенной и угрожающей пожароопасностью, а также определить расположение участков продолжительного горения терриконов с точностью до 81,0% посредством нахождения температурных аномалий и базовых пространственно-временных структур.

#### Список литературы

1. Смирный М.Ф., Зубова Л.Г., Зубов А.Р. Экологическая безопасность терриконовых ландшафтов Донбасса: Монография. – М.: Изд-во ВГУ им. В. Даля, 2006. – 232 с.
2. Gangopadhyay P.K., Lahiri-Dutt K., Saha K.. Application of remote sensing to identify coal-fires in the Raniganj Coalbelt, India // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2006. – No. 8. – P. 188–195.

3. Сергеева Е.Л. Информационная технология классификации типов земного покрова терриконовых ландшафтов по данным мультиспектральной космической съемки / Е.Л. Сергеева // Проблемы информатизации и управления. – 2010. – №4(32). – С. 93 – 99.
4. Busygin B. Using the space survey data for fire objects monitoring of the Donetsk coal basin / B. Busygin, I. Garkusha, K. Sergieieva // Proceedings of International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010. – May 24-26, 2010. – Prague: Lesnicka prace. – P. 25 – 30;
5. Сарычева Л.В. Компьютерный эколого-социально-экономический мониторинг регионов. Математическое обеспечение / Л.В. Сарычева // – Днепропетровск: НГУ. – 2003. – 222 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бусигінім В.С.  
Надійшла до редакції 18.05.2013*

УДК 539.3

© О.В. Белова

## **МЕТОД ВОЗМУЩЕНИЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ МЕХАНИКИ**

Проанализированы этапы развития метода возмущений при решении задач механики. Решена задача о вдавливании штампа в упругую ортотропную пластину с цилиндрической анизотропией. Получено распределение напряжений под штампом, а также напряжений в пластине. Исследовано влияние на распределение напряжений под штампом отношения размера штампа к размеру свободной границы пластины.

Проаналізовані етапи розвитку методу збурень при розв'язанні задач механіки. Розв'язана задача про вдавлювання штампі в пружну ортотропну пластину з циліндричною анізотропією. Отримано розподіл напружень під штампі, а також напруження у пластині. Досліджений вплив на розподіл напруження під штампі відношення розміру штампі до розміру вільної границі пластини.

Stages of development of a method of perturbations are analyzed at a solution of problems of mechanics. The problem about impression of a stamp in an elastic orthotropic plate with cylindrical anisotropy is solved. Laws of the change tensions under a stamp and also the tension in the plate are obtained. Influence on distribution of voltages under a stamp of the ration of a size of a stamp to a size of free boundary of a plate is investigated.

**Введение.** В настоящее время особый интерес вызывают конструкции из современных композиционных материалов. Проблемы контакта тел из таких материалов определяют процессы прочности и долговечности сооружений. Анизотропия материала конструкций приводит к серьезным трудностям математического характера. В этой ситуации наиболее целесообразно пользоваться приближенными аналитическими подходами. Одним из таких подходов является метод малого параметра или метод возмущений, позволяющий находить решение, близкое к точному. При этом выбор малого параметра может быть основан на геометрических или физических свойствах материала.

Основные этапы развития метода возмущений отражены в монографиях [1–3]. Широкое применение этот асимптотический метод получил в различных