

Геоинформатика. 2024. № 1. С. 68–77.  
*Geoinformatika*. 2024;(1):68–77.

Геоэкология

Научная статья  
УДК 631.4:635.95  
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-68-77>

## Динамика состояния бывших сельскохозяйственных угодий, выведенных из оборота после аварии на ЧАЭС, по данным дистанционного зондирования

© 2024 г. — Татьяна Витальевна Переволоцкая<sup>а)</sup>, Александр Николаевич Переволоцкий<sup>б)</sup>, Ольга Андреевна Шубина<sup>в)</sup>

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»; Россия, Обнинск

<sup>а)</sup>forest\_rad@mail.ru, <sup>б)</sup>Alex\_Perevolotsky@mail.ru, <sup>в)</sup>olgashu76@gmail.com

**Аннотация:** В статье представлены результаты оценки состояния бывших сельскохозяйственных угодий, выведенных из сельскохозяйственного оборота, в западной части Европейской части РФ (Брянская область) с использованием алгоритмов автоматизированного выявления изменений по разновременным многозональным космическим изображениям. Для выполнения работы были подобраны данные радиометров TM (Landsat 5) и сформированы два разновременных изображения (2011 и 2018 гг.). Автоматизированная обработка включала следующие этапы: предварительная обработка космических изображений; определение разностного вегетационного индекса (NDVI) на основе индексных изображений, оценка изменений по разновременным изображениям методом главных компонент (МГК) на основе формирования более информативных комбинаций исходных изображений, полученных в разных зонах спектра и сокращения набора анализируемых данных; выявление изменений разностным методом, базирующимся на разнице яркости каждого пикселя первого изображения и яркости соответствующего пикселя второго изображения, совмещенного с первым. Оценка применения алгоритмов автоматизированного выявления изменений по разновременным космическим изображениям показала, что совместная обработка изображений гораздо лучше позволяет оценить процессы произошедших изменений на бывших сельскохозяйственных угодьях, выведенных их сельскохозяйственного оборота.

**Ключевые слова:** радиоактивное загрязнение, бывшие сельскохозяйственные угодия, разновременные космические снимки, данные дистанционного зондирования

*Для цитирования:* Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н., Шубина О.А. Динамика состояния бывших сельскохозяйственных угодий, выведенных из оборота после аварии на ЧАЭС, по данным дистанционного зондирования // Геоинформатика. — 2024. — № 1. — С. 68–77. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-68-77>.

Geoecology

Original article

## Dynamics of state of former agricultural lands taken out of agriculture after the Chernobyl accident, according to remote sensing data

© 2024 — Tatiana V. Perevolotskaya<sup>а)</sup>, Alexander N. Perevolotsky<sup>б)</sup>, Olga A. Shubina<sup>в)</sup>

Russian Institute of Radiology and Agroecology; Obninsk, Russia

<sup>а)</sup>forest\_rad@mail.ru, <sup>б)</sup>Alex\_Perevolotsky@mail.ru, <sup>в)</sup>olgashu76@gmail.com

**Abstract:** Results of assessment of condition (overgrowth of woody and shrubby vegetation), for example, of former agricultural land, taken out of agriculture, in western area of the European part of the Russian Federation (Bryansk region) using algorithms for automated detection of changes in multi-time multi-zone space images are presented. To perform the work, data from TM radiometers (Landsat 5) were selected from available data for study area, and two images of different times (2011 and 2018) were formed. Automated processing included following stages: preliminary processing of satellite images; determination of difference vegetation index (NDVI) based on index images assessment of changes in multi-time images by principal component method (PCA) based on formation of more informative combinations of source images obtained in different spectral zones and reduction of set of analyzed data; identification of changes by difference method based on difference in brightness of each pixel of first image and brightness of corresponding pixel of second image combined with first. Evaluation of use of algorithms for automated detection of changes in multi-time satellite images has shown that joint image processing makes it much better to assess the processes of changes that have occurred on former agricultural land, derived from agricultural turnover.

**Key words:** radioactive contamination, former agricultural lands, multi-time satellite images, remote sensing data

*For citation:* Perevolotskaya T.V., Perevolotsky A.N., Shubina O.A. Dynamics of state of former agricultural lands taken out of agriculture after the Chernobyl accident, according to remote sensing data. *Geoinformatika*. 2024;(1):68–77. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-68-77>. In Russ.

## Введение

Одним из последствий аварии на Чернобыльской АЭС явилось радиоактивное загрязнение значительных площадей сельскохозяйственных угодий [2], из которых 17,1 тыс. га с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs} > 40$  поэтапно были выведены из землепользования и отнесены к землям запаса [4]. В настоящее время в связи с изменением радиологической обстановки и появлением возможности получения нормативно чистой продукции актуализируется вопрос возврата радиоактивно загрязненных земель в сельскохозяйственный оборот [5]. При этом вполне очевидно, что возврат земель должен базироваться на научно обоснованных подходах с точки зрения как радиационной обстановки, так и производственно-экономической целесообразности. Состояние данных земель требует значительных затрат на подготовительные мероприятия, а необходимым условием для их возврата является получение сельскохозяйственной продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам.

В тоже время для научного обоснования применения методов и подходов, ориентированных на принятие решения о возврате земель, необходима оперативная информация о их состоянии, которую можно получить при наличии данных дистанционного зондирования (ДДЗ). Данные зондирования являются источником исходной информации для ГИС-технологий на основе которой могут приниматься управленческие решения по использованию земель. Геопространственная информация позволяет решать широкий круг задач в области сельского хозяйства, в том числе и для мониторинга землепользования на радиоактивно загрязненных территориях, выделения участков, пригодных для возврата в сельскохозяйственное производство, а также их перспективного и наиболее вероятного хозяйственного использования (лесоиспользование, сельскохозяйственное использование и другие виды землепользования) [11]. Для реализации поставленных задач достаточно часто используются полученные с помощью спутников Landsat, свободно распространяемые разновременные космические снимки, представленные на сайте пространственной информации EO Browser (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>). Все данные, начиная с 1982 года, совместимы между собой без дополнительной обработки, что существенно увеличивает область их применения, а различные комбинации спектральных каналов Landsat широко используются для анализа состояния природной среды. Наибольший интерес представляет отражение в красной области спектра Red (0,63–0,69 мкм), ближней инфракрасной — NIR (0,77–1,3 мкм), а также нормализованный разностный вегетационный индекс растительности NDVI (–1 до +1).

Целью настоящей работы явилась оценка применимости алгоритмов автоматизированного выявления изменений по разновременным снимкам среднего разрешения Landsat 5 TM на примере бывших сельскохозяйственных угодий, выведенных из сельскохозяйственного оборота в западной части Европейской части РФ (Брянская область).

## Объект исследований и исходные данные

Объектом исследования являлся участок территории бывших сельскохозяйственных угодий, выведенных из сельскохозяйственного оборота, расположенный в западной части Красногорского района Брянской области. До 1986 года эти угодья использовались для выращивания сельскохозяйственных культур, после аварии на Чернобыльской АЭС изменения в структуре землепользования способствовали процессам формирования на данных землях различных стадий зарастания древесно-кустарниковой растительностью.

Для выполнения поставленной задачи было подобрано из имеющихся в наличии на исследуемую территорию 2 снимка (2011 и 2018 гг.) среднего разрешения Landsat 5 TM (30 м) в спектральных каналах Blue (0,45–0,52 мкм), Green (0,52–0,60 мкм), Red (0,63–0,69 мкм), NIR (0,76–0,90 мкм), SWIR-1 (1,55–1,75 мкм) [15]. Система координат WGS 84, растровый формат разновременных изображений в формате TIFF преобразован и объединен в многозональные снимки формата Erdas Ins. «.img», сформированы псевдоцветные RGB-композиции с комбинацией каналов 4-3-2 (NIR-Red-Green, красный цвет). Далее, из созданных разновременных RGB-композиций выделена и вырезана область интереса, охватывающая участок исследуемой территории, выведенной из оборота.

## Методы анализа и технологические аспекты обработки изображений

Выявление произошедших изменений по разновременным снимкам на примере бывших сельскохозяйственных угодий возможно путем использования различных методов и алгоритмов автоматизированного обнаружения изменений [6].

На первом шаге исследования к каждому разновременному снимку применены методы улучшающих преобразований для упрощения анализа визуального дешифрирования, выделения и интерпретации соответствующих элементов изображений в развитии и контексте окружающей среды, путем извлечения информации об их различии в цветовой гамме и признаках [12, 14].

Следует отметить, что представление снимков в виде отдельных спектральных каналов дает возможность изучения корреляции между каналами и выбора наиболее информативного канала/каналов для выявления произошедших изменений на быв-

ших сельскохозяйственных угодьях. Выявить изменения по разновременным снимкам можно, используя методы на основе индексных изображений, представляющие собой комбинации измерений отражательной способности растительности в зависимости от ее сомкнутости и содержания хлорофилла в листе. Наиболее часто используется нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), который может быть рассчитан по формуле [9, 10, 13]:

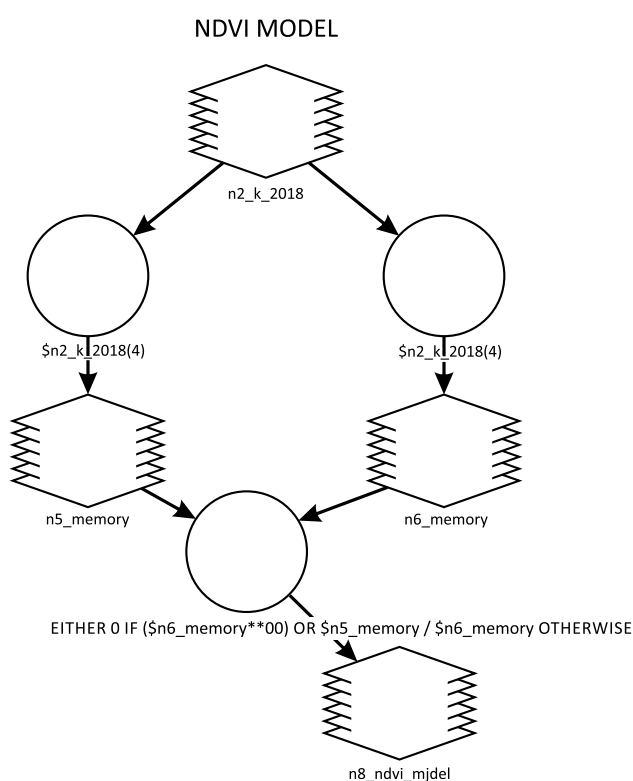
$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}, \quad (1)$$

где *NIR* — отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне, *Red* — отражательная способность в красном диапазоне.

Рассчитанные значения вегетационного индекса могут изменяться в диапазоне от -1 до +1.

Для оценки произошедших изменений на бывших сельскохозяйственных угодьях расчет вегетационных индексов NDVI выполнен с использованием спектральных каналов 3 (0,63–0,69 мкм) и 4 (0,76–0,90 мкм). Алгоритм расчета представлен на рис. 1.

Рис. 1. Модель оценки вегетационного индекса NDVI  
Fig. 1. Model for estimating the vegetation index NDVI



К методам выявления изменений по разновременным снимкам относится метод главных компонент (МГК), в основе которого лежит процесс формирования более информативных комбинаций исходных изображений, полученных в разных зонах спектра и сокращения набора анализируемых данных. Первые три изображения (компоненты) нового преобразованного изображения называются главными компонентами исходного, включающие в себя основную информацию об объектах местности. Каждая компонента соответствует разложению спектральных яркостей по базису, состоящему из собственных векторов корреляционной матрицы спектральных измерений. Изображение, соответствующее первой главной компоненте, при любой комбинации исходных данных характеризуется всегда наибольшей дисперсией относительно изображений, соответствующих последующим выделенным компонентам [1, 3, 8]

Преобразование МГК можно представить в виде:

$$y_i = \sum_1^k a_{ij} z_i, \quad (2)$$

где  $y_i$  — главная компонента ( $j = \overline{1, m}$ );  $a_{ij}$  — коэффициент, определяющий вклад переменной  $z_i$  в главную компоненту;  $z_i$  — стандартизованная исходная переменная,  $z_i = (x - \bar{x}_i) / s_x^2$ , ( $i = \overline{1, k}$ );  $s_x^2$  — дисперсия переменных.

В общем виде этапы выделения главных компонент отражены на рис. 2.

Для выявления изменений применен также подход, заключающийся в создании композитных изображений, сформированных из каналов разновременных изображений, преобразованных с применением МГК. Процесс создания композитных изображений выполнялся следующим образом: Red (изображение 2018 г.) — Red (изображение 2011 г.) — Green (изображение 2018 г.).

К одному из существующих подходов выявления произошедших изменений относится разностный метод, основанный на том, что из яркости каждого пикселя одного изображения вычитается значения яркости соответствующего пикселя другого изображения, совмещенного с первым. Разность определяется как:

$$\Delta P_{ij} = P_{ij}(t_1) - P_{ij}(t_2), \quad (3)$$

где  $P_{ij}(t_1)$  — исходное изображение на первую дату,  $P_{ij}(t_2)$  — исходное изображение на вторую дату.

Результирующее изображение формируется на основе сопоставления  $\Delta P_{ij}$  с пороговым значением ( $\Delta$ ), наличие изменений отражательной способности устанавливается при  $\Delta P_{ij} > \Delta$  [7].

Рис. 2. Этапы выделения главных компонент  
Fig. 2. Stages of allocation of main components



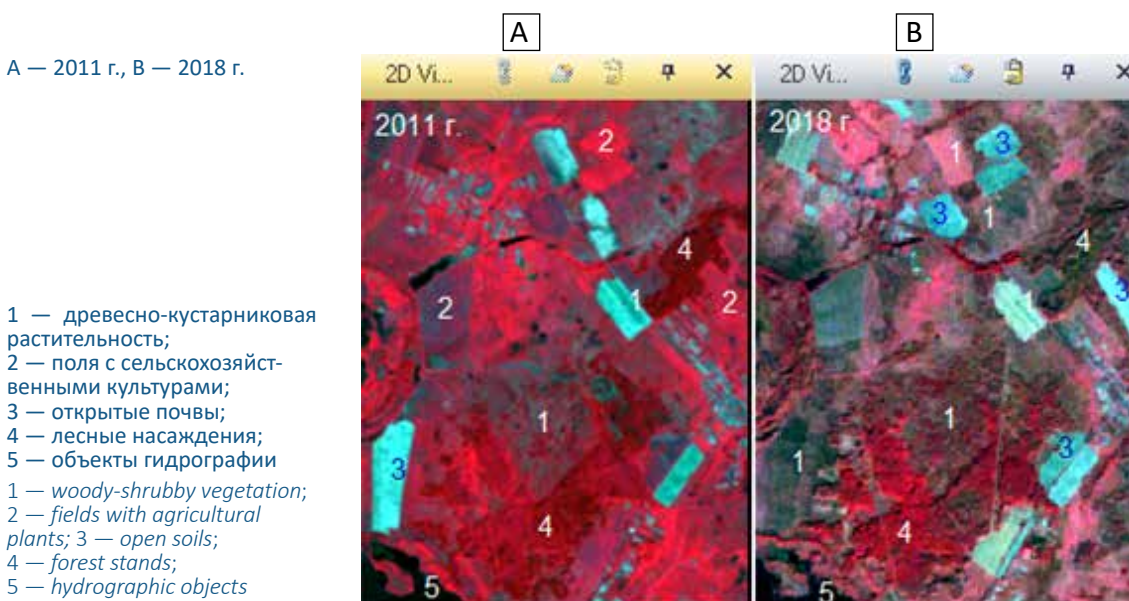
**Результаты и их обсуждение**

Методом визуального дешифрирования выделены соответствующие настоящему исследованию объекты путем извлечения информации об их различии в цветовой гамме и признаках (рис. 3 А, В). Зарастание древесно-кустарниковой растительностью бывших сельскохозяйственных угодий дешифрировано по хаотично расположенным на данных участках куртинам растительности, имеющим различные оттенки красного цвета, что определяется проективным покрытием растительности и содержанием хлорофилла (рис. 3А, В область 1). Участки земель, занятые под посевами сельскохозяйственных культур, имеют достаточно выраженные границы и определенную геометрию, близкую к прямо-

угольной; на изображениях они обозначились в красном и светло-красном цветах (рис. 3А, В, область 2). В исследуемом синтезе каналов NIR-Red-Green открытые почвы имеют светло-голубой цвет. На наличие растительности указывает красный оттенок разной степени выраженности (рис. 3А, В, область 3). В красном и темно-красном цветах на разновременных изображениях обозначены лесные участки с насаждениями естественного происхождения (рис. 3А, В, область 4). Объект гидрографии (вода) обозначен черным цветом (рис. 3А, В, область 5).

Кривые спектральной отражательной способности обозначенных объектов представлены на графике (рис. 4), из которого видно, что в инфракрасном диапазоне отражательная способность

Рис. 3. Фрагмент территории в синтезе каналов NIR-Red-Green на разновременных изображениях Landsat 5 TM  
Fig. 3. Fragment of territory in synthesis of NIR-Red-Green channels on multi-time images of Landsat 5 TM



клеточных структур листа максимальна, а в красном — минимальна. Наиболее высокую отражательную способность по всем диапазонам имеют почвы, самую низкую — вода.

На бывших сельскохозяйственных угодьях наблюдался неоднородный растительный покров, связанный как с процессами зарастания древесно-кустарниковой растительностью, так и с угнетением роста и развития травостоя (рис. 3А, В). Показатели индекса NDVI растительного покрова на данных участках варьировали от 0,40 до 0,47 (изреженная растительность), снижаясь до 0,28–0,35 (рис. 3А). Полученные данные отличаются от показателей вегетационного индекса последующего года исследования (рис. 3 В), которые свидетельствуют об увели-

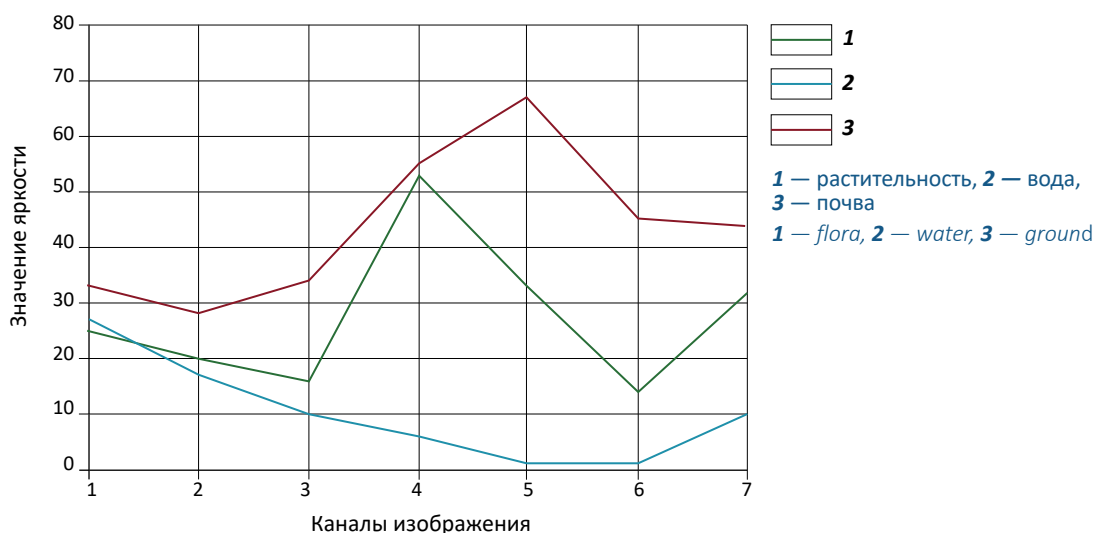
чении фотосинтетической активности надземной фитомассы древесно-кустарниковой растительности и, как следствие, увеличении NDVI до 0,58–0,67.

На разновременных изображениях (рис. 3А, В) по открытой почве вегетационный индекс варьировал от 0,19 до 0,25; показатели NDVI объекта гидрографии (вода) составляли от –0,14 до –0,25.

Применение метода главных компонент (МГК) для выявления произошедших изменений позволило обнаружить основные закономерности и построить более информативные комбинации исходных изображений, которые могли быть не выявлены из-за их высокого контраста, что видно на примере изображения 2018 г (рис. 5).

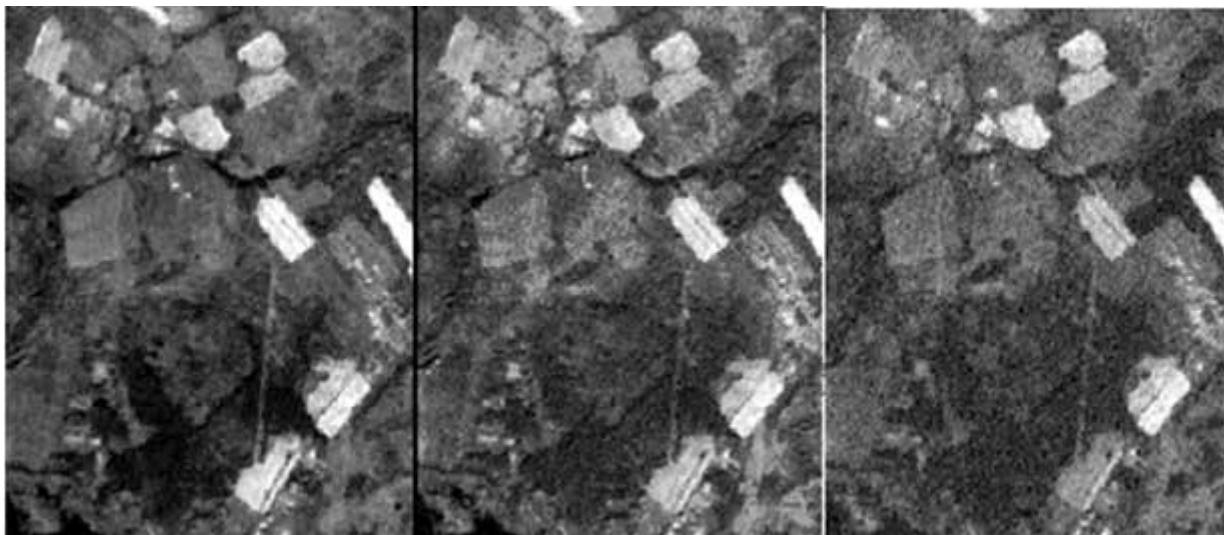
**Рис. 4.** Кривые спектральной отражательной способности объектов

*Fig. 4. Curves of spectral reflectivity of objects*



**Рис. 5.** Изображение Landsat 5 TM (2018 г.) в трех спектральных каналах

*Fig. 5. Image of Landsat 5 TM (2018) in three spectral channels*



Рассчитанные МГК значения дисперсии компонентов вектора яркости изображения расположены на главной диагонали ковариационной матрицы (табл. 1), согласно которым изображение в первом канале самое контрастное ( $S_x^2 = 163,768$ ).

**Табл. 1.** Ковариационная матрица яркости пикселей компонентов  
*Tab. 1. Covariance matrix of pixel brightness of components*

Канал	1	2	3
1	163,762	147,142	35,634
2	147,142	132,210	32,018
3	35,634	32,018	7,757

Следует указать, что ковариация указывает только направление, но не может характеризовать связь между диапазонами, для чего была создана нормированная корреляционная матрица, анализ которой свидетельствует о высокой корреляции каналов между 1 и 2; 2 и 3 диапазонами (табл. 2)

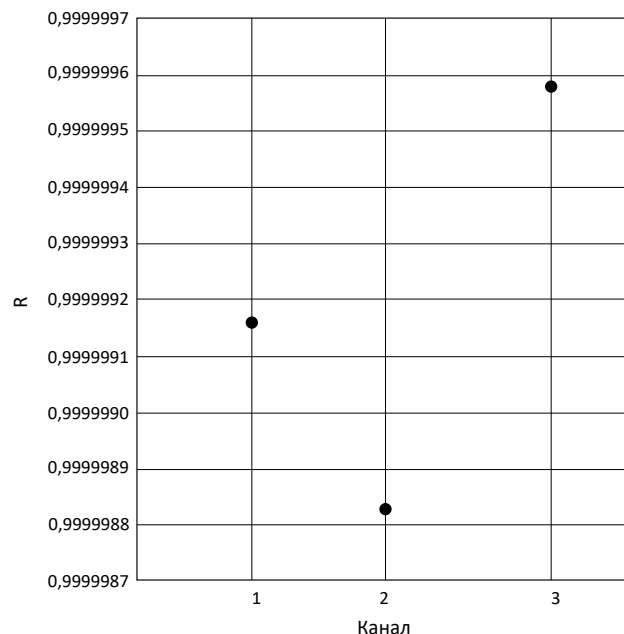
**Табл. 2.** Нормированная корреляционная матрица  
*Tab. 2. Normalized correlation matrix*

Канал	1	2	3
1	1,0	0,999	0,519
2	0,999	1,0	0,999
3	0,519	0,999	1,0

В результате расчета МГК получены собственные числа корреляционной матрицы  $\lambda_1 = 2,695935$ ,  $\lambda_2 = 0,252033$ ,  $\lambda_3 = 0,052039$  и процент, объясняемой ими дисперсии: 89,86%, 8,40% и 1,74% соответственно. Это означает, что первая главная компонента объясняет 90% дисперсии, а первая и вторая компоненты объясняют практически всю дисперсию (98,26%) и содержат то же количество информации, что и исходные изображения. Анализ коэффициентов корреляции между исходными спектральными

каналами и главными компонентами свидетельствует, что первую компоненту определяет в основном информация третьего канала, вторую компоненту — второго канала ( $R = 0,814317$ ). Корреляция с третьей компонентой не выявлена (рис. 6).

**Рис. 6.** Корреляция исходных спектральных каналов с первой главной компонентой  
*Fig. 6. Correlation of initial spectral channels with first main component*



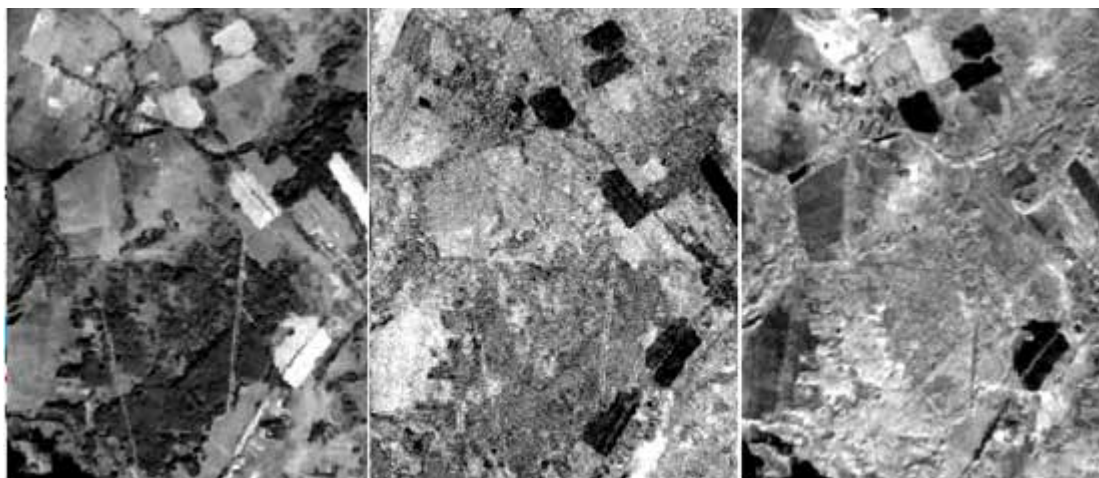
Результат преобразования изображения (2018 г.) с применением МГК показывает, что первая компонента близка к более яркому каналу исходного изображения, достаточно контрастна, что позволяет более четко разделить объекты, характеризующиеся разной текстурой и разной формой (рис. 7).

Сформированное из каналов разновременных изображений, преобразованных с применением МГК, композитное изображение (рис. 8С) позволяет лучше выделить процессы динамических изменений на исследуемой территории (различные оттенки розового цвета).

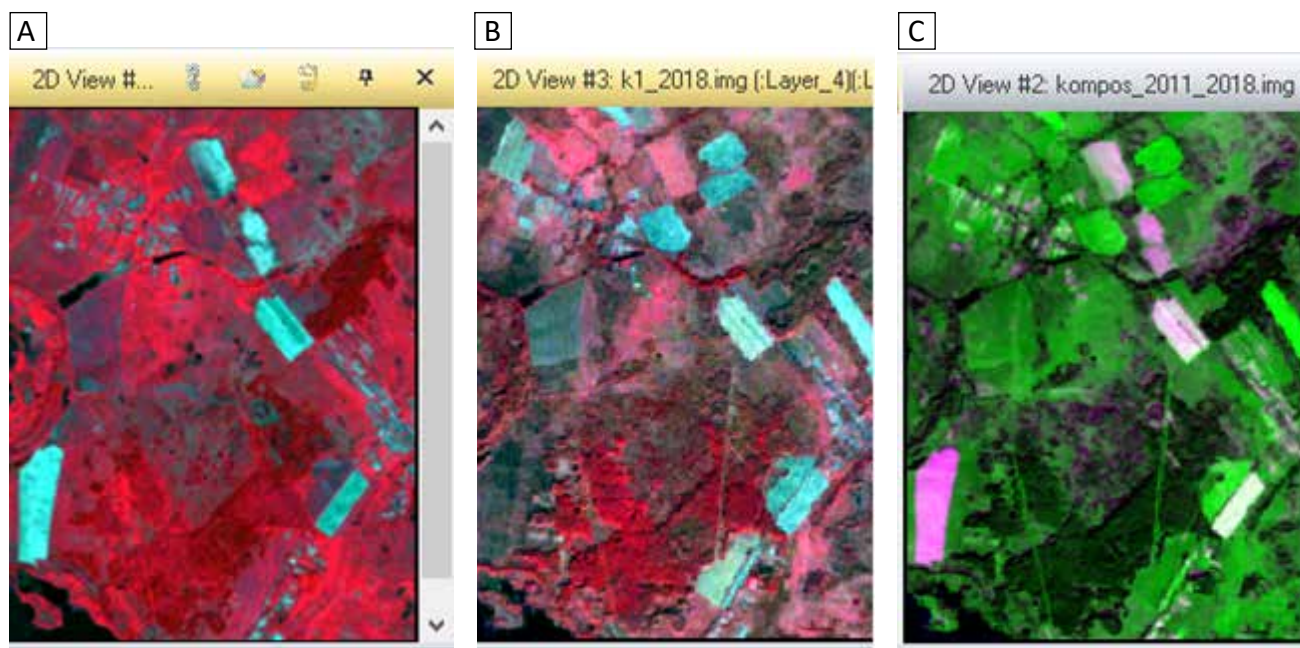
Результат выявления произошедших изменений на основе выполнения алгоритма поэлементного вычитания разновременных изображений (2011 г. и 2018 г.) представлен на рис. 9.

Полученная информация не содержит в явном виде количественных характеристик о площадях бывших угодий, на которых происходят процессы изменения; сведения о них приводятся в относительных единицах. Выявленные произошедшие изменения обозначены следующим образом. Зеле-

**Рис. 7.** Результат преобразования изображения (2018 г.) с применением МГК  
*Fig. 7. The result of image transformation (2018) with use of PCA*



**Рис. 8.** Результат создания композитного изображения  
*Fig. 8. Result of creating composite image*



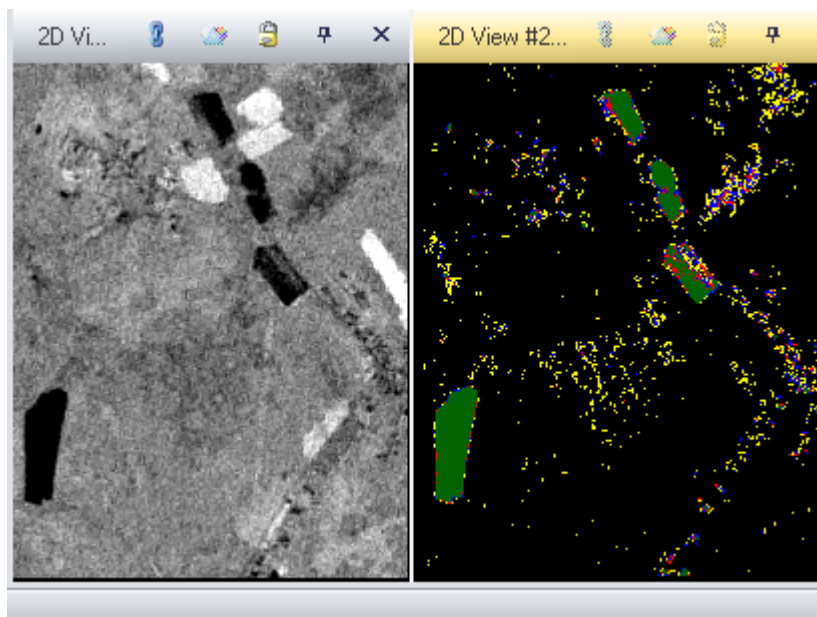
A — изображение 2011 г., B — изображения 2018 г., C — изменения  
*A — image of 2011, B — images of 2018, C — changes*

ные зоны представляют собой бывшие угодья, заросшие древесно-кустарниковой растительностью (~5,2%) (рис. 9). Активные процессы зарастания мелколесьем бывших сельскохозяйственных угодий представляют красные зоны (~12,3%). Желтая зона определяется постепенным зарастанием бывших сельскохозяйственных угодий небольшими кур-

тинами древесно-кустарниковой растительности (~29,8%), синяя зона определяет участки земель, на которых не наблюдаются явно выраженные процессы изменений (~2,7%).

Черная зона (~50%) определяется неизменным землепользованием (рис. 9).

**Рис. 9.** Результат создания композитного изображения  
*Fig. 9.* Result of creating composite image



## Выводы

Применение алгоритмов автоматизированного выявления изменений по разновременным космическим изображениям показало, что совместная обработка изображений гораздо лучше позволяет оценить процессы изменений (зарастание древесно-кустарниковой растительностью) на бывших

сельскохозяйственных угодьях, выведенных из сельскохозяйственного оборота. Данные алгоритмов выявления изменений могут быть использованы для оперативной оценки состояния бывших сельскохозяйственных угодий и стать основой для принятия решений на уровне территорий муниципальных образований.

## Список источников

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 608 с.
2. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь) / под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича. – Москва; Минск: Фонд Инносфера; НИА Природа, 2009. – 140 с.
3. Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 1. – С. 4–17. DOI: 10.7868/S0205961414010035.
4. Воробьев Г.Т., Гучанов Д.Е., Маркина З.Н., Новиков А.А., Калацкий В.С., Карпеченко С.В. Радиоактивное загрязнение почв Брянской области. – Брянск: Грани, 1994. – 177 с.
5. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Брянской области в 2020 году / сост.: Е.Г. Цублова, С.В. Лукашов. – Брянск: Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области, 2021. – 250 с.
6. Гук А.П., Евстратова Л.Г., Хлебникова Е.П., Алтынцев М.А., Арбузов С.А., Гордиенко А.С., Гук А.А. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических снимков. Выявление изменения состояния территорий и объектов по многозональным космическим снимкам, полученным на разные даты // Геодезия и картография. – 2013. – № 8. – С. 39–47.
7. Гук А.П., Конечный Г. Фотограмметрия и дистанционное зондирование. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – 248 с.
8. Гук А.П., Шляхова М.М. Анализ эффективности применения метода главных компонент при использовании непараметрического статистического подхода к дешифрированию снимков // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы IV Международной научной конференции (Красноярск, 12-15 сентября 2017 г.) / науч. ред. Е.А. Ваганов. – Красноярск: СФУ, 2017. – С. 89–94.
9. Мозговой Д.К., Кравец О.В. Использование многоспектральных снимков для классификации посевов сельхозкультур // Экологія та ноосферологія. – 2009. – Т. 20. – № 1-2. – С. 54–58.

10. Ничипорович З.А., Радевич Е.А. Опыт использования NDVI-индекса для мониторинга сельскохозяйственных земель Полесья по данным спектральной космической съемки Ikonos // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79. – № 4. – С. 681–684.
11. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / под ред. Н.И. Санжаровой, С.В. Фесенко. – М. : РАН. – 2018. – 278 с.
12. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. – М. : Физматлит, 2015. – 460 с.
13. Терехин Э.А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 1. – С. 23. DOI: 10.7868/S0205961415010108.
14. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / пер. с англ. А.В. Кирышина, А.И. Демьяникова. – М. : Техносфера, 2010. – 516 с.
15. EO Browser [Электронный ресурс] / Sentinel Hub. – Режим доступа: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> (дата обращения: 05.02.2024).

## References

1. Aivazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti. [Applied statistics. Classification and dimensionality reduction]. Moscow: Finansy i statistika; 1989. 608 p.
2. Izrael' Yu.A., Bogdevich I.M. (eds.) Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AEHS na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya-Belarus') [Atlas of recent and predictable aspects of consequences of Chernobyl accident on polluted territories of Russia and Belarus (ASPA Russia-Belarus)]. Moskva; Minsk: Fond Innosfera; NIA Priroda; 2009. 140 p.
3. Bondur V.G. Up-to-date approach for bulky flows of hyperspectral aerospace data processing. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2014;(1):4–16. DOI: 10.7868/S0205961414010035.
4. Vorob'ev G.T., Guchanov D.E., Markina Z.N., Novikov A.A., Kalatskii V.S., Karpechenko S.V. Radioaktivnoe zagryaznenie pochv Bryanskoi oblasti [Radioactive contamination of soils of the Bryansk region]. Bryansk: Grani; 1994. 177 p.
5. Tsublova E.G., Lukashov S.V. (comp.) Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy Bryanskoi oblasti v 2020 godu [State report on the state of environment of the Bryansk region in 2020]. Bryansk: Department of Natural Resources and Ecology of Bryansk region; 2021. 250 p.
6. Guk A.P., Evstratova L.G., Khlebnikova E.P., Altyntsev M.A., Arbuzov S.A., Gordienko A.S., Simonov D.P. Automated interpretation of space images. Detection of changes in the status of territories and objects on multispectral satellite images obtained at different dates. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*. 2013;(8):39–47 (in Rus.).
7. Guk A.P., Konechnyi G. Fotogrammetriya i distantsionnoe zondirovanie [Photogrammetry and remote sensing]. Novosibirsk: SGUGIT; 2018. 250 p.
8. Guk A.P., Shlyakhova M.M. Analiz effektivnosti primeneniya metoda glavnykh komponent pri ispol'zovanii neparametricheskogo statisticheskogo podkhoda k deshifirovaniyu snimkov [Analysis of the effectiveness of the principal component method when using a nonparametric statistical approach to image decoding]. In: Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli : materialy IV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Krasnoyarsk, 12-15 September 2017). Vaganov E.A. (ed.). Krasnoyarsk: SFU; 2017. pp. 89–94.
9. Mozgovoii D.K., Kravets O.V. Ispol'zovanie mnogospektral'nykh snimkov dlya klassifikatsii posevov sel'khozkul'tur [The use of multispectral images for classification of crops]. *Ecology and noospherology*. 2009;20(1–2):54–58.
10. Nichiporovich Z.A., Radevich E.A. Experience using the NDVI normalized difference vegetation index for monitoring Polesye agricultural land based on multispectral Ikonos satellite imaging data. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2012;79(4):670–673. DOI: 10.1007/s10812-012-9656-5.
11. Sanzharova N.I., Fesenko S.V. (eds.) Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas. Moscow: RAN; 2018. 278 p.
12. Eremeev V.V. (ed.) Sovremennye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Modern technologies for processing Earth remote sensing data]. Moscow: Fizmatlit; 2015. 460 p.
13. Terekhin E.A. Estimation of seasonal NDVI values for the detection and analysis of crop conditions. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015;(1):23. DOI: 10.7868/S0205961415010108.
14. Schowengerdt R.A. Remote sensing. Models and methods for image processing. 3rd edn. Amsterdam: Elsevier; 2007. 560 p.
15. Sentinel Hub EO browser. Available at: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> (accessed 05.02.2024).

Статья поступила в редакцию 20.09.2023, одобрена после рецензирования 08.02.2024, принята к публикации 19.03.2024.  
The article was submitted 20.09.2023; approved after reviewing 08.02.2024; accepted for publication 19.03.2024.

**Информация об авторах****Переволоцкая Татьяна Витальевна**

Кандидат биологических наук  
Доцент, старший научный сотрудник  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»  
249032 Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1  
e-mail: forest\_rad@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-8250-5536  
SPIN-код: 4562-3671

**Переволоцкий Александр Николаевич**

Доктор биологических наук  
Ведущий научный сотрудник  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»  
249032 Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1  
e-mail: Alex\_Perevolotsky@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-6913-7609  
SPIN-код: 1469-3199

**Шубина Ольга Андреевна**

Кандидат биологических наук  
Заместитель директора по научной работе  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»  
249032 Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1  
e-mail: olgashu76@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-3055-9473  
SPIN-код: 7036-8172

**Information about authors****Tatiana V. Perevolotskaya**

Candidate of Biological Sciences  
Associate Professor, Senior Researcher  
Russian Institute of Radiology and Agroecology (RIRAE)  
1, build. 1, Kievskoe shosse, Obninsk, 249032, Russia  
e-mail: forest\_rad@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-8250-5536  
SPIN-код: 4562-3671

**Alexander N. Perevolotsky**

Advanced Doctor of Biological Sciences  
Leading Researcher  
Russian Institute of Radiology and Agroecology (RIRAE)  
1, build. 1, Kievskoe shosse, Obninsk, 249032, Russia  
e-mail: Alex\_Perevolotsky@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-6913-7609  
SPIN-код: 1469-3199

**Olga A. Shubina**

Candidate of Biological Sciences  
Deputy Director RIRAE for Scientific Work  
Russian Institute of Radiology and Agroecology (RIRAE)  
1, build. 1, Kievskoe shosse, Obninsk, 249032, Russia  
e-mail: olgashu76@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-3055-9473  
SPIN-код: 7036-8172