

---

## Объединение полевых и дистанционных данных для оптимизации идентификации участков, представляющих интерес для добычи полезных ископаемых: комплексный подход, основанный на интерполяции и пространственном объединении

*М.В. Виллиамс*

*Тюменский индустриальный университет*

**Аннотация:** Интеграция разнородных полевых данных и данных дистанционного зондирования является ключевым и необходимым этапом в современных геологоразведочных работах. В данной статье предлагается метод, основанный на создании регулярной пространственной сетки, позволяющей эффективно интерполировать и объединять точечные, линейные и полигональные данные, представленные как в векторном, так и в растровом форматах. Основной целью является формирование структурированного и обогащённого набора данных, пригодного для обучения прогностических моделей, включая нейронных сетей. Предложенный подход предусматривает преобразование геопространственных данных для обеспечения их корректности и согласованности в ГИС-средах. Такой метод служит надёжной основой для выявления перспективных участков с высоким минеральным потенциалом и подчёркивает важность подготовки данных в процессах пространственного моделирования и анализа.

**Ключевые слова:** Разведка месторождений, интеграция данных, интерполяция, пространственная сетка, геохимия, процесс пространственного моделирования, дистанционное зондирование, ГИС.

### Введение

Современная разведка полезных ископаемых всё больше опирается на способность эффективно интегрировать геопространственные данные из различных источников [1], включая полевые исследования (геохимические, геофизические, геологические) и данные дистанционного зондирования (многоспектральные или гиперспектральные спутниковые снимки). Эти данные, хотя и взаимодополняющие, часто представлены в разнородной форме (рис.1): точки отбора проб, линейные объекты, полигональные карты и т. д. [2,3]. Их интеграция в единую ГИС-среду представляет собой методологическую задачу, а также стратегическую возможность для

оптимизации выявления территорий с высоким минеральным потенциалом [4].

В этом контексте необходимость в методе интеграции разнородных данных становится крайне актуальной. Наш методологический подход направлен на решение этих задач и заключается в разработке интеграционного каркаса, основанного на автоматической генерации пространственной сетки, адаптированной к геометрии целевой информации (в данном случае — точкам почвенного геохимического отбора проб), на которую будут интерполироваться все остальные данные.

Подход основан на нескольких ключевых этапах:

- Создание адаптивной пространственной сетки на основе среднего расстояния между точками отбора проб;
- Интерполяция непрерывных пространственных переменных, полученных из точечных и линейных измерений;
- Пространственное объединение с векторными слоями (полигонами) для обогащения данных геологическими и структурными атрибутами;
- Объединение всех данных в единый структурированный geodataframe, пригодный для алгоритмов машинного обучения и многомерного статистического анализа.

Методология, ориентированная на золотоносную разведку, позволяет эффективно сочетать минеральные индексы, полученные из данных дистанционного зондирования, с результатами полевых наблюдений, с учётом факторов, контролирующих минерализацию (литология, зоны изменения, тектонические структуры). Такая интеграция формирует надёжную основу для прогнозного моделирования, основанного на геопространственном анализе, и способствует выявлению участков с высоким минеральным потенциалом.

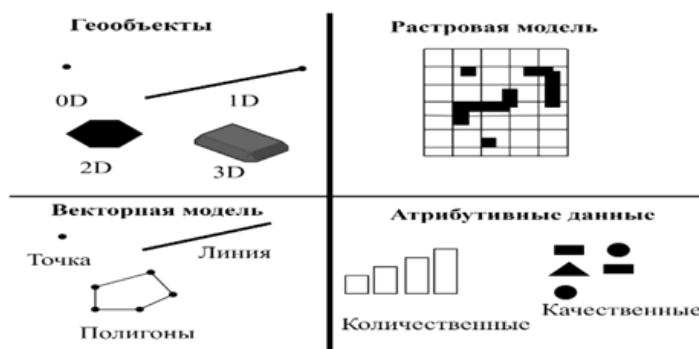


Рис.1. Пространственные модели данных

## Методология

Наш подход представлен на рис.2, является структурированный метод интеграции разнородных данных из различных источников (точки, линии, полигоны и растровые изображения) с использованием пространственной интеграционной сетки, адаптированной к геометрии целевых данных (точечная геометрия). Методика сочетает пространственную интерполяцию и пространственные соединения, с целью создания обогащённого набора данных, готового для прогнозного анализа в рамках разведки минеральных ресурсов.

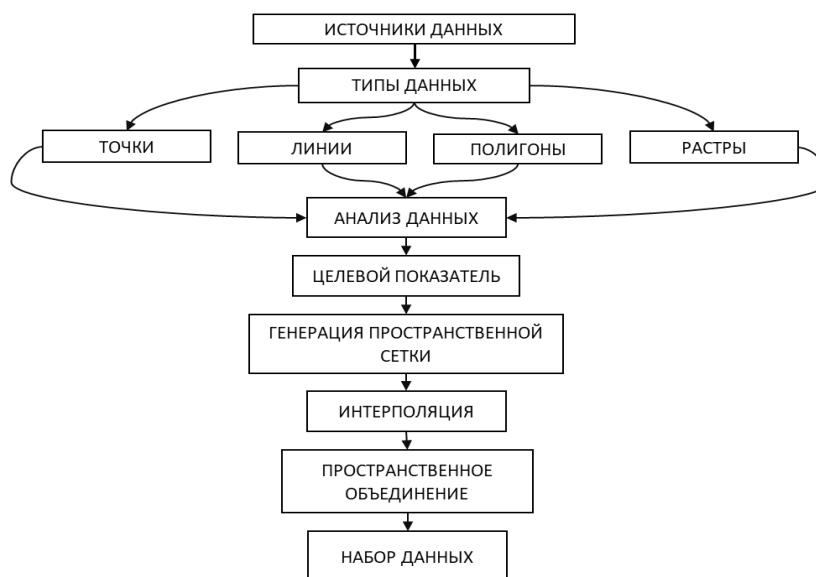


Рис.2. Упрощенное графическое представление рабочего процесса, использованного в данном исследовании

## Сбор и подготовка данных

Использованы:

Полевые данные: содержание золота (геохимия), литология (карты), аэромагнитные измерения (Potentiel).

Данные дистанционного зондирования: спектральные индексы Landsat 7 (CMI, IOR, AMI), автоматизированное выделение линеаментов.

### Предварительная обработка спутниковых изображений (Landsat 7)

Для обработки изображений использовался пакет ArcGIS 10.5. Цифровые данные Landsat 7 были подвергнуты геометрической коррекции с устранением искажений, связанных с геометрией датчика, движением платформы и кривизной Земли [5]. Спутниковые снимки представлен на рис.3.

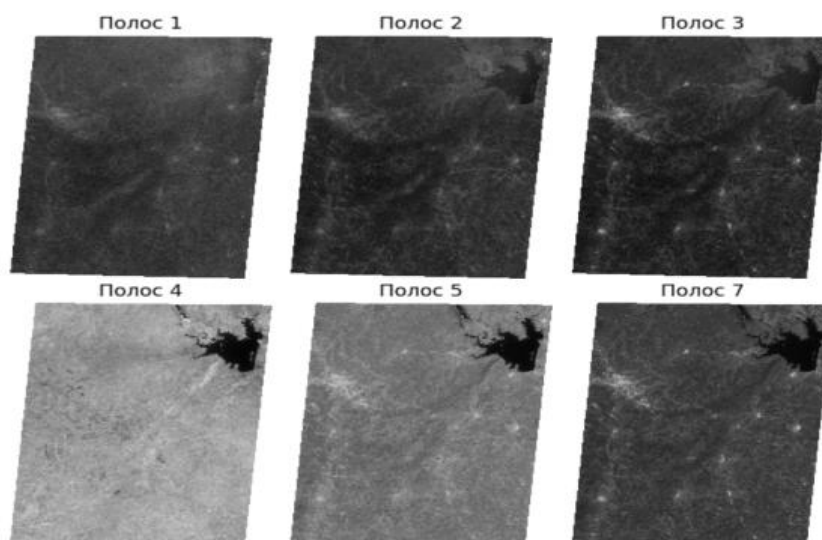


Рис.3. Полосы Landsat 7 исследуемой территории

Для анализа минералогических характеристик исследуемой территории был рассчитан ряд спектральных индексов по каналам Landsat 7. Индекс глинистых минералов ( $CMI = B5 / B7$ ) выделяет участки, обогащенные глинистыми минералами. Коэффициент оксида железа ( $IOR = B3 / B1$ ) отражает содержание оксида железа, а коэффициент оксида железа (AMI) ( $B5 / B4$ ) служит индикатором гидротермальных изменений. Совместное

использование этих индексов позволяет выявить участки гидротермальных изменений, которые являются фактором минерализации.

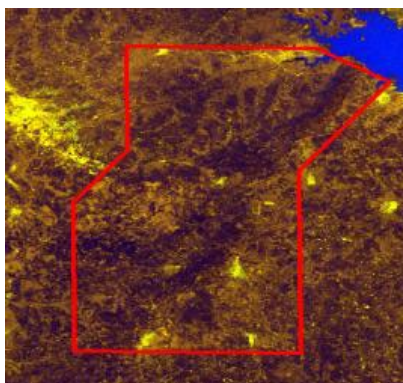


Рис.4. Гидротермально измененные районы исследования

На рис.4, каналы R, G и B соответствуют, соответственно, соотношениям B5/B4, B7/B4 и B3/B7. B5/B4: выделяет зоны гидротермальной изменений (глины, кремнезём), B7/B4: чувствителен к присутствию глин и гидроксильных минералов, B3/B7: подчёркивает оксиды железа и некоторые поверхностные отложения.

При интерпретации изображения синий цвет обозначает воду или растительность, а жёлтый — изменённые породы: ярко-жёлтый — глинистые отложения, оранжевый с коричневым — другие изменённые породы [6].

#### Автоматическое создание пространственной сетки

Размер ячейки определялся средним расстоянием между пробами (около 200×200 м). Сетка послужила основой для интерполяции всех данных. Размер сетки определяется по следующей формуле:

$$Cell\_size = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1})$$

где:  $d(p_i, p_{i+1})$  представляет собой евклидово расстояние между двумя последовательными точками в наборе геохимических данных,  $n$  — общее количество точек [7].

Интерполяция точечных данных

Метод пространственной интерполяции IDW (Inverse Distance Weighting) оценивает значение переменной в неизвестной точке на основе известных точечных измерений. Чем ближе соседняя точка, тем больше её влияние, а интерполированное значение представляет собой взвешенное среднее, где веса обратно пропорциональны расстоянию.

Математически, оценочное значение  $Z(x)$  в точке  $x$  вычисляется как взвешенное среднее значений  $Z_i$  известных окружающих точек по следующей формуле:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i Z_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

где  $w_i = \frac{1}{d_i^p}$  - вес известной точки  $i$ , рассчитываемый как обратная величина расстояния между неизвестной точкой  $x$  и известной точкой  $i$ , возведенная в степень (обычно 2),  $d_i$  — это расстояние между точками  $x$  и  $i$ , а  $p$  — параметр степени, контролирующий ослабление влияния с расстоянием.

На практике часто используется  $p = 2$ , что придаёт больший вес близлежащим точкам и очень малый — удалённым. Если  $p = 0$ , все точки имеют одинаковый вес, что равносильно простому среднему значению. Интерполяция IDW выполняется в три основных этапа: вычисление расстояний между целевой точкой и всеми известными точками, присвоение веса каждой точке на основе величины, обратной расстоянию, возведённому в степень  $p$ , и расчёт оценочного значения как средневзвешенного [8].

### Интерполяция линеаментов

Интерполяция линеаментов в сетку позволяет количественно оценить структурное влияние разломов и трещин в каждой ячейке. Для этого суммируется длина пересекающих линеаментов и делится на площадь ячейки, получая плотность как показатель структурной интенсивности [9].

Далее значения классифицируются (например, методом Дженкса) на низкие, средние и высокие для визуализации и анализа пространственного распределения тектонических напряжений.

Математическая модель:

Пусть:

- $G = \{g_i\}_{i=1}^n$ : все ячейки в сетке (каждая ячейка  $g_i$  имеет геометрию)
- $L = \{l_j\}_{j=1}^m$ : все линейменты
- $A_i = Area(g_i)$ : площадь ячейки  $g_i$
- $L_i = \sum_{j=1}^m Length(l_j \cap g_i)$ : общая длина сегментов линейментов, содержащихся в  $g_i$ ,

тогда плотность линейментов в ячейке  $g_i$  определяется по формуле:

$$D_i = \frac{L_i}{A_i}.$$

Эта плотность затем классифицируется на  $k$  классов (здесь  $k = 3$ ) в соответствии с пороговыми значениями  $\{b_0, b_1, \dots, b_k\}$ , оптимизированными методом естественных разрывов Дженкса, путем назначения категории каждому  $D_i$ :

$$\text{Кат}(D_i) = \begin{cases} \text{"Низкий"} & \text{если } D_i \leq b_1 \\ \text{"Средний"} & \text{если } b_1 < D_i \leq b_2 \\ \text{"Высокий"} & \text{если } D_i > b_2 \end{cases}$$

### Пространственное объединение векторных данных

В отличие от традиционного объединения, основанного на идентификаторах, оно основано на пространственных отношениях, таких как пересечение (ST\_Intersects), включение (ST\_Contains) или близость (ST\_Distance). Формально, если обозначить  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  целевой слой (часто многоугольники, такие как сетка), и  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$

объединенный слой (например, точки измерения), то пространственное соединение состоит из построения набора:

$$T = \{b_j \cup Attr(a_i) | ST\_Within(b_j.geom, a_i.geom) = TRUE\},$$

где каждый точечный объект  $b_j$  наследует атрибуты полигона  $a_i$ , в который он входит. Таким образом, этот механизм позволяет обогащать пространственные объекты одного слоя контекстной информацией из другого, открывая путь к комплексному пространственному анализу [10].

### Пространственный разведочный анализ

Для оценки структуры данных применены визуализация, анализ выбросов, пространственная автокорреляция и индекс Getis-Ord  $G_i^*$ , выявляющий горячие и холодные кластеры содержания золота. Карта кластеров представлена на рис.5.

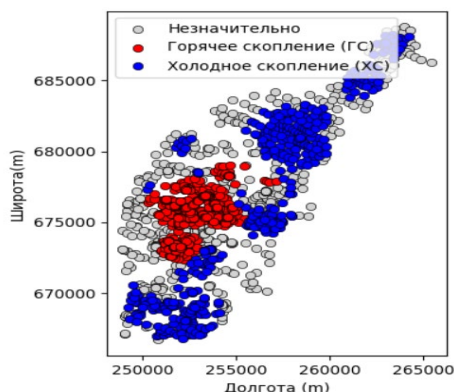


Рис. 5. Значительные скопления (Getis-Ord  $G_i^*$ ) [11]

### 3. Результаты

Исследование проводилось на золотом месторождении Агбау [12], в регионе Ла-Ме, Кот-д'Ивуар, рядом с деревней Агбау, примерно в 628 км к северу от Абиджана (рис.6). Рудник эксплуатируется компанией Endeavour Mining и ранее был частью комплекса с месторождением Боникро. Для исследования была создана сетка пространственной интеграции на основе плотности точек отбора геохимических проб с оптимальным пространственным разрешением примерно 200 метров \* 200 метров.

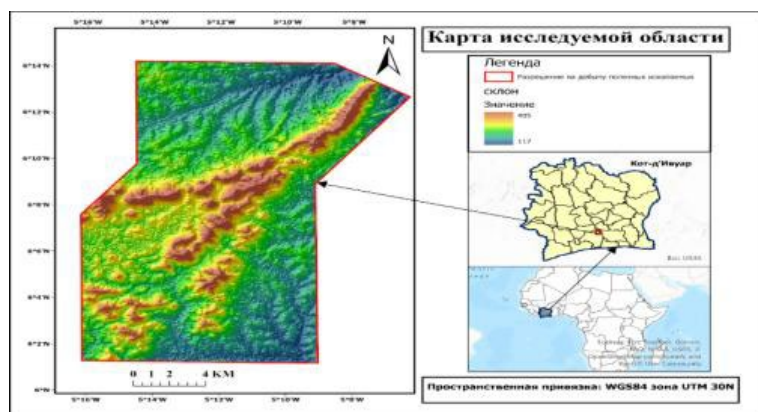


Рис. 6. Презентация исследуемой территории

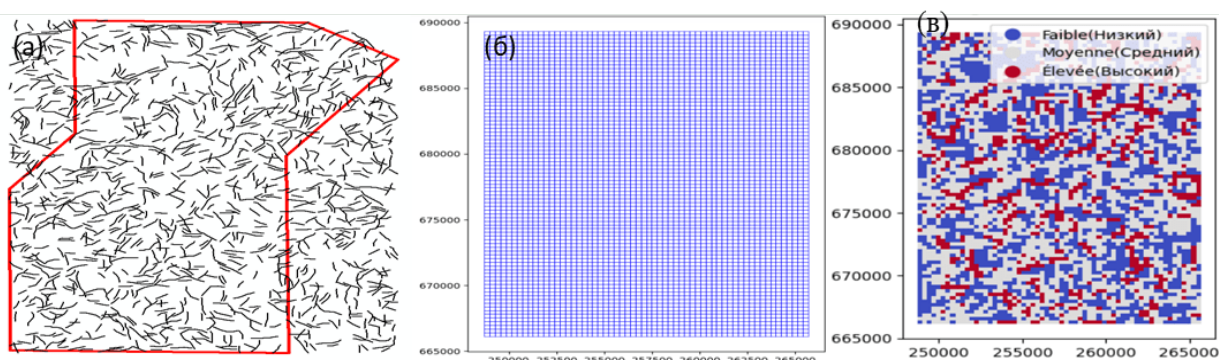


Рис.7. (а)- Карта линеаментов, (б)-Сетка пространственной интерполяции, (в)-Карта плотности трещиноватости, полученная после интерполяции

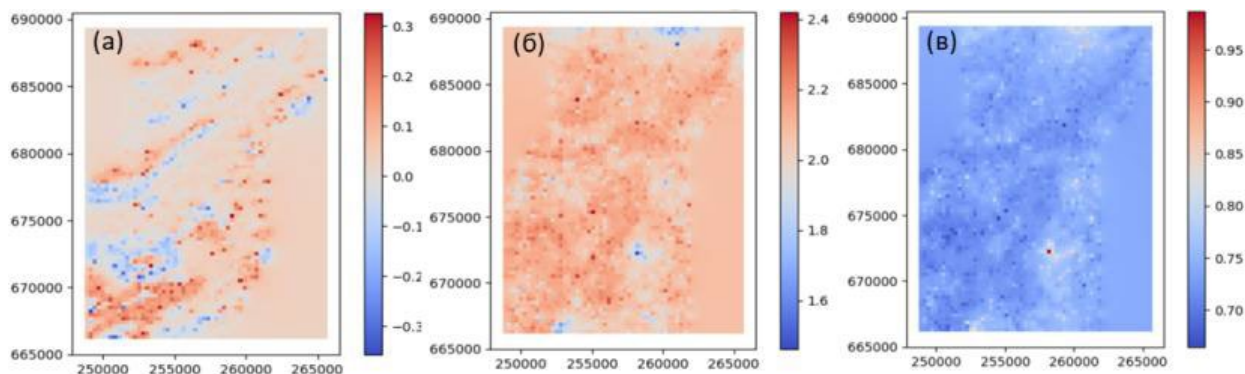


Рис.8. (а)-Карта геофизического потенциала, (б)-Карта индекса глины, (в)-Карта индекса оксида железа, полученная после интерполяции

Все информационные слои (литология, структуры, минералогические индексы) были интерполированы и интегрированы в единую сетку (рис.7 и 8, сформировав структурированный набор данных. Сводка переменных представлена в таблице № 1.

Таблица № 1

Сводка интегрированных переменных из многоисточникового слияния

| Название переменной  | Описание                                                                    | Источник данных                             | Тип данных         |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|
| Долгота / Широта     | Географические координаты образцов                                          | GPS полевые измерения                       | Пространственные   |
| Clay_Index           | Минералогический индекс глин                                                | Снимки Landsat 7                            | Количественные     |
| Iron_Oxide_Index     | Индекс оксида железа                                                        | Снимки Landsat 7                            | Количественные     |
| Density_Fracturation | Плотность трещиноватости                                                    | Геологическая карта / структурные данные    | Количественные     |
| Литология            | Литологический тип                                                          | Геологическая карта                         | Категориальные     |
| Alteration_Type      | Тип наблюдаемого изменения пород                                            | Полевые интерпретации                       | Категориальные     |
| Potential            | Аэромагнитный потенциал                                                     | Геофизические данные (аэромагнитная съёмка) | Количественные     |
| Significance         | Класс потенциала золотоносности (1: высокий, 0: низкий, -1: незначительный) | Пространственный анализ (Getis-Ord Gi*)     | Целевая переменная |

### Заключение

Предложенный метод показал эффективность объединения геохимических, структурных, литологических, геофизических и спутниковых данных в единую систему анализа. Пространственная сетка обеспечила унификацию и сопоставимость форматов, а интерполяция и пространственные объединения обогатили исходные данные.

Полученный набор открывает возможности применения методов машинного обучения, включая нейронные сети, для прогнозирования зон минерализации и выбора перспективных участков. Методика может служить универсальной основой интеграции пространственных данных для задач геологоразведки.

### Литература

1. Зеленцов В. А., Пиманов И. Ю., Потрясаев С. А. Интеграция разнородных информационных ресурсов и данных дистанционного зондирования Земли при мониторинге и управлении развитием территорий // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН). - 2023. Том 22. - №4. - С. 906–940.
2. Костюк А.И. структуры данных системы цифрового описания данных средств охраны и мониторинга объектов // Современные наукоемкие технологии. - 2018. - №12. - С. 43–48.
3. Кабаненко Н.А., Литвинова Д.И. Манипулирование пространственными данными в ГИС// Электронные Средства И Системы Управления. Материалы Докладов Международной Научно-Практической Конференции. – 2009. – № 1. – С. 32-39.
4. Oh H., Lee S. Regional Probabilistic and Statistical Mineral Potential Mapping of Gold–Silver Deposits Using GIS in the Gangreung Area, Korea // Resource Geology. – 2008. – Vol. 58. – № 2. – pp. 171-187. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2008.00050. x.
5. Anuta P. E. Geometric Correction of ERTS-1 Digital Multispectral Scanner Data. 1973. Purdue University, Laboratory for Applications of Remote Sensing. URL: docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1119&context=larstech
6. Imbroane M.A., Melenti C., Gorgan D. Mineral Explorations by Landsat Image Ratios // Ninth International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2007), Timisoara, Romania, 2007, pp. 335-340,

doi: 10.1109/SYNASC.2007.52. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/4438119/](http://ieeexplore.ieee.org/document/4438119/)  
(дата обращения: 18.08.2025).

7. Hengl, T. Finding the right pixel size// Computers & Geosciences. – 2006. – Т. 32. – № 9. – pp. 1283-1298. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.11.008.

8. Davis, J.C. Statistics and data analysis in geology – 3rd ed. – New York: J. Wiley, 2002. – 638 p.

9. Casas A.M., Cortés A.L., Maestro A. и др LINDENS: A program for lineament length and density analysis// Computers & Geosciences. – 2000. – Т. 26. – LINDENS. – № 9. – pp. 1011-1022. DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00017-0.

10. Pardo-Igúzquiza E., Chica-Olmo M. Interpolation and mapping of probabilities for geochemical variables exhibiting spatial intermittency // Applied Geochemistry. – 2005. – Т. 20. – № 1. – pp. 157-168. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2004.05.007.

11. Виллиамс М.В., Кузяков О.Н. Сравнительный анализ методов идентификации кластеров Getis-Ord Gi\* и DBSCAN при разведке полезных ископаемых // Автоматизация И Информатизация ТЭК. – 2025. – № 1 (618). – С. 35-41.

12. Technical Report. Mineral Resource and Reserve Update for the Agbaou Gold Mine, Côte d'Ivoire, West Africa. Vancouver: Endeavour Mining Corporation, 2015. URL: [minedocs.com/21/Endeavour-TR-12312014.pdf](http://minedocs.com/21/Endeavour-TR-12312014.pdf)

### References

1. Zelenczov V. A., Pimanov I. Yu., Potryasaev S. A. Informatika i avtomatizaciya (Trudy` SPIIRAN). 2023. Tom 22. №4. pp. 906–940.

2. Kostyuk A.I. Sovremenny`e naukoemkie texnologii. 2018. №12. pp. 43–48.

3. Kabanenko N.A., Litvinova D.I. E`lektronny`e Sredstva I Sistemy` Upravleniya. Materialy` Dokladov Mezhdunarodnoj Nauchno-Prakticheskoy Konferencii. 2009. № 1. pp. 32-39.

4. Oh H., Lee S. Resource Geology. 2008. Vol. 58. № 2. pp. 171-187. DOI:10.1111/j.1751-3928.2008.00050. x.
5. Anuta P. E. Geometric Correction of ERTS-1 Digital Multispectral Scanner Data. 1973. Purdue University, Laboratory for Applications of Remote Sensing. URL: docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1119&context=larstech
6. Imbroane M.A., Melenti C., Gorgan D. Mineral Explorations by Landsat Image Ratios / Ninth International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2007), Timisoara, Romania, 2007, pp. 335-340, doi: 10.1109/SYNASC.2007.52. URL: ieeexplore.ieee.org/document/4438119/ (data obrashheniya: 18.08.2025).
7. Hengl, T. Computers & Geosciences. 2006. T. 32. № 9. pp. 1283-1298. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.11.008.
8. Davis, J.C. Statistics and data analysis in geology 3rd ed. New York: J. Wiley, 2002. 638 p.
9. Casas A.M., Cortés A.L., Maestro A., et al. Computers & Geosciences. 2000. № 9. pp. 1011-1022. DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00017-0.
10. Pardo-Igúzquiza E., Chica-Olmo M. Applied Geochemistry. 2005. T. 20. № 1. pp. 157-168. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2004.05.007.
11. Williams M.V., Kuzyakov O.N. Avtomatizaciya I Informatizaciya Te`k. 2025. № 1(618). pp. 35-41.
12. Technical Report. Mineral Resource and Reserve Update for the Agbaou Gold Mine, Côte d'Ivoire, West Africa. Vancouver: Endeavour Mining Corporation, 2015. URL: minedocs.com/21/Endeavour-TR-12312014.pdf.

**Дата поступления: 4.08.2025**

**Дата публикации: 25.09.2025**