

ОПЫТ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ АНОМАЛИЙ НА МАГНИТНЫХ КАРТАХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ

С.В. Муравко, В.К. Демидов, К.М. Бондарь, Н.Н. Жуков

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
ул. Васильковская, 90, Киев 03022, Украина, e-mail: fondad@ukr.net*

Описан программный модуль автоматического распознавания аномалий на магнитных картах высокой детальности. Модуль является частью разрабатываемой автоматизированной системы интерпретации археолого-магнитометрических данных. Распознавание аномалий реализовано по методу ближайшего соседа на основании критериев, продиктованных практическим опытом качественной интерпретации. Программный модуль написан на языке программирования Python.

Ключевые слова: автоматическое распознавание аномалий, карта магнитного поля, метод ближайшего соседа, археологический памятник, Python.

Введение. При проведении археологических изысканий во всем мире широко применяют геофизические методы. Наиболее широкое распространение при этом получила магнитометрия [9, 10]. Современные технологии археолого-магнитометрических исследований характеризуются высокой точностью и производительностью. Изучая археологические памятники в их ландшафтном контексте, геофизики покрывают магнитной съемкой площади в десятки гектаров за короткий срок. Однако интерпретация полевых данных нередко носит субъективный характер. В этой связи возникает необходимость в разработке автоматизированной системы интерпретации археолого-магнитометрических данных.

Важнейшая задача интерпретации геофизических данных – выделение областей с аномальными характеристиками поля [7]. Таким образом, автоматизированная система интерпретации должна включать в себя модуль распознавания продуктивных аномалий, выделяемых на основе заданных критериев.

Источники магнитных аномалий на территории археологического памятника. С точки зрения геофизики все объекты на территории археологического памятника можно рассматривать как физические тела, которые характеризуются определенными физическими свойствами, имеют конечные размеры и определенное положение в пространстве. Аномальный эффект возникает вследствие разной намагниченности объекта и вмещающей почвы. Чем больше эта разница и чем ближе к земной поверхности находится объект, тем интенсивнее магнитная аномалия. Объекты на археологическом памятнике могут быть следами жизнедеятельности человека в древности или иметь техногенное происхождение.

“Археологические” аномалии, как правило, имеют небольшие размеры, соизмеримые с разме-

рами объектов-источников. Если источником выступает земляное сооружение – яма, ров, глубокое погребение-ингумация, землянка, над ним формируется положительная аномалия интенсивностью до 10 нТл [2–4, 6, 9]. В случае если источником является сооружение, целиком или частично сделанное из глины и подвергшееся обжигу или пожару *in situ*, аномалия будет интенсивной и знакопеременной, причем отрицательная ее часть отмечается с северной стороны. При нагревании свыше 300 °С железистые минералы, содержащиеся в глине и почве, переходят в оксиды – маггемит и магнетит, которые обладают высокой магнитной восприимчивостью и способны фиксировать термоостаточную намагниченность, в десятки и сотни раз превышающую индуктивную намагниченность вещества [9]. Таким образом, археологический объект представляет собой как бы магнитный диполь, намагниченный в земном магнитном поле и потому обращенный своим “отрицательным” концом к магнитному северу. Примеры таких объектов – горны, печи жилищ, вымостки и площадки [2–4, 6, 9].

Источником “техногенных” аномалий может выступать мелкий металлический мусор, содержащийся на участке съемки. Чаще всего подобные аномалии знакопеременные, отрицательная часть может находиться с любой стороны света. Типичные примеры источников “техногенных” аномалий – обломки сельхозтехники, осколки снарядов, другие металлические предметы, которые проявляются на магнитной карте в виде россыпи хаотично расположенных магнитных диполей.

“Техногенные” аномалии далеко не всегда можно отличить от “археологических”. Как правило, такие сомнительные аномалии либо мелкие знакопеременные с отрицательной частью с северной стороны, либо положительные низкой интенсивности, размером около 1 м.

Выбор критериев выделения аномалий. При выделении типов магнитных аномалий, источниками которых могут выступать археологические объекты, необходимо учитывать такие критерии (признаки) [5]: размеры; интенсивность; знак/знакопеременность; расположение отрицательной части знакопеременной аномалии относительно магнитного севера.

Однако на этапе первичного анализа магнитной карты для выделения всех областей аномального поля целесообразно анализировать следующие признаки:

- градиенты магнитной индукции по четырём направлениям $\left(\frac{\Delta B}{\Delta x}, \frac{\Delta B}{\Delta y} \right)$;
- расстояние между точками, которые принадлежат объектам (имеются в виду точки измерений в области аномального поля).

Метод. С целью выделения аномалий из наблюденного на археологическом памятнике магнитного поля применен метод статистической классификации – метод ближайшего соседа. Данный метод – непараметрический классификатор, основанный на оценивании сходства объектов. Классифицируемый объект относится к тому классу, которому принадлежат ближайшие к нему объекты обучающей выборки. Выбор функции расстояния является естественным инструментом для введения меры сходства векторных описаний объектов, интерпретируемых нами как точки в евклидовом пространстве. Этот метод оказывается весьма эффективным при решении таких задач, в которых классы характеризуются значительной степенью зашумленности, когда разделяющая поверхность сложна, или классы пересекаются [1, 8, 11].

Возможность использования метода основана на предположении, что если мера сходства объектов введена достаточно удачно, то сходные объекты гораздо чаще лежат в одном классе, чем в разных. Тогда граница между классами имеет достаточно простую форму, а классы образуют компактно локализованные области в пространстве объектов [11].

Суть метода заключается в следующем. Анализируемые данные представляют собой не множество точек или объектов, расположенных внутри некоторой заданной области, а расстояние между наиболее близкими парами точек или объектов. Метод ближайшего соседа основан на сравнении наблюдаемого множества расстояний между парами ближайших точек. В качестве “меры близости” выбрано евклидово расстояние, которое рассчитывается по формуле [1]

$$D(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2}.$$

При выполнении анализа были сформулированы вектор признаков, который представлял собой значение поля, и градиенты по всем направлениям, по которым в дальнейшем и проводилась классификация. Для расчетов использовалась формула расчета расстояния с нормировочным коэффициентом [7]:

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^m Alf(x_i)^2 (x_i - y_i)^2.$$

Здесь m – количество признаков; $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ – вектор обучения классификатора; $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)'$ – вектор классифицируемых объектов.

Для расчета нормировочного коэффициента были подобраны коэффициенты и использовалась формула [7]

$$Alf(x_i) = (A \cdot x_i + B)^{-1},$$

где A, B – коэффициенты для расчета нормированного коэффициента; x_i – компонента вектора обучения классификатора.

Критерием оптимальности служит условие минимума расстояния до ближайшего объекта. Распознаваемый объект относим в тот класс, ближайший сосед из которого ближе к нему, чем ближайшие соседи из остальных классов [7].

Алгоритм работы программы. Состоит из двух этапов – подготовительного и основного.

В подготовительный этап входят такие стадии:

- загрузка входных данных;
- создание массива данных (X, Y, Z, PR, PK), где X, Y – координаты; Z – показатель поля; PR – профиль; PK – пикет;
- отбор данных для дальнейших расчетов;
- расчет производных по четырём направлениям;
- формирование эталонов каждого класса. Основной этап работы составляют:
- загрузка библиотек;
- блок расчёта весовых коэффициентов;
- расчет расстояний до каждого из классов по ряду признаков;
- вывод результатов.

Программой предусмотрен автоматический расчет весовых коэффициентов. Предусмотрена возможность введения поправок в определение весовых коэффициентов.

На начальном этапе интерпретации археолого-магнитометрических данных решалась задача разделения данных магнитометрической съемки на два класса – “аномалия”/“фон”. В дальнейшем предполагается дополнить систему классом “техногенная аномалия”. Классификационная процедура реализовывалась в пространстве шести признаков: размеры, интенсивность, знак/знакопеременность, положение относительно магнит-

ного севера, градиент по направлению, расстояние между точками.

Программный модуль реализован на языке Python в связи с тем, что последний является мультиплатформным и его с легкостью можно подключить к большинству ГИС-систем, в частности ArcGis, QGis.

Апробация. Программный модуль апробирован на материалах высокоточных магнитных измерений поселения поздне римского времени Войтенки [3]. Материалы представляют собой планшеты карты аномальной магнитной индукции поселения с сечением изолиний, соответствующим

точности съемки 0,3 нТл. Пространственная детальность цифровой информации не хуже чем 0,5×0,15 м.

Пример входных данных, используемых для набора эталонных выборок, показан на рис. 1. Для тестирования предлагаемого скрипта использованы данные нескольких площадей. В результате получены минимальные расстояния до ближайшего из классов, на основе чего входные объекты (точки, в которых известны значения магнитной индукции) были разделены на два класса (рис. 2): “аномалия” и “фон”. Объекты, отнесенные к аномалиям, вынесены на карту (рис. 3).

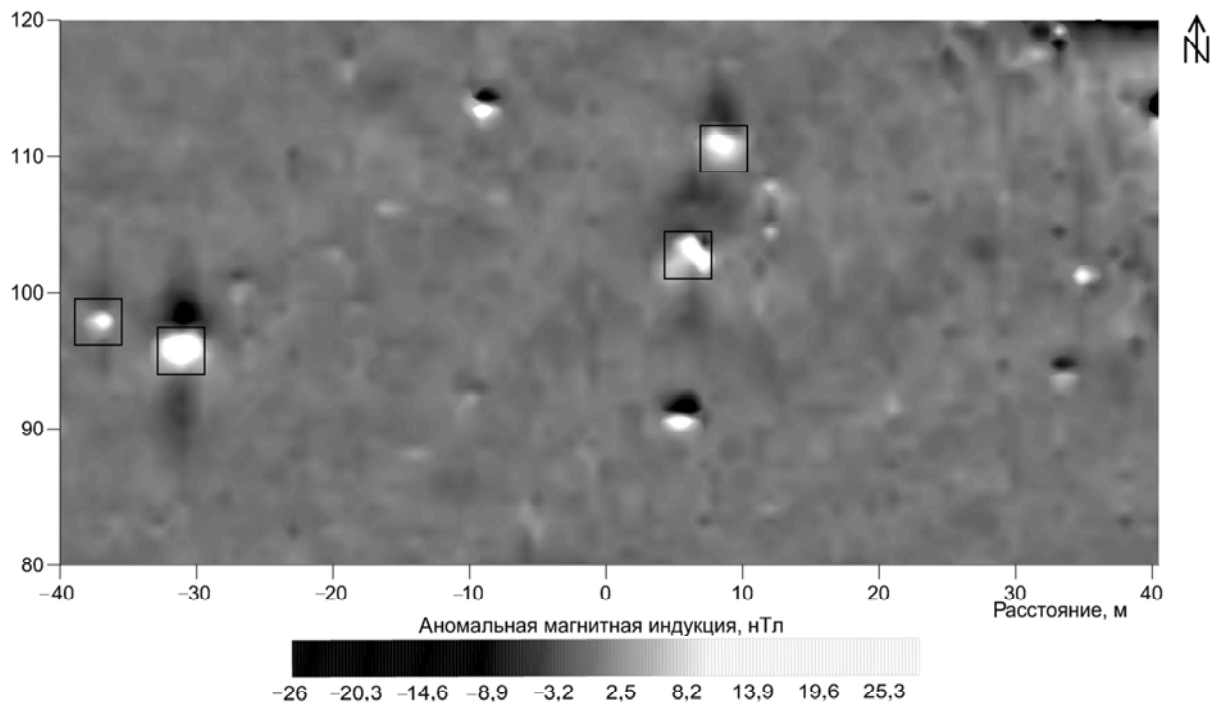


Рис. 1. Результат визуального выделения “археологических” аномалий

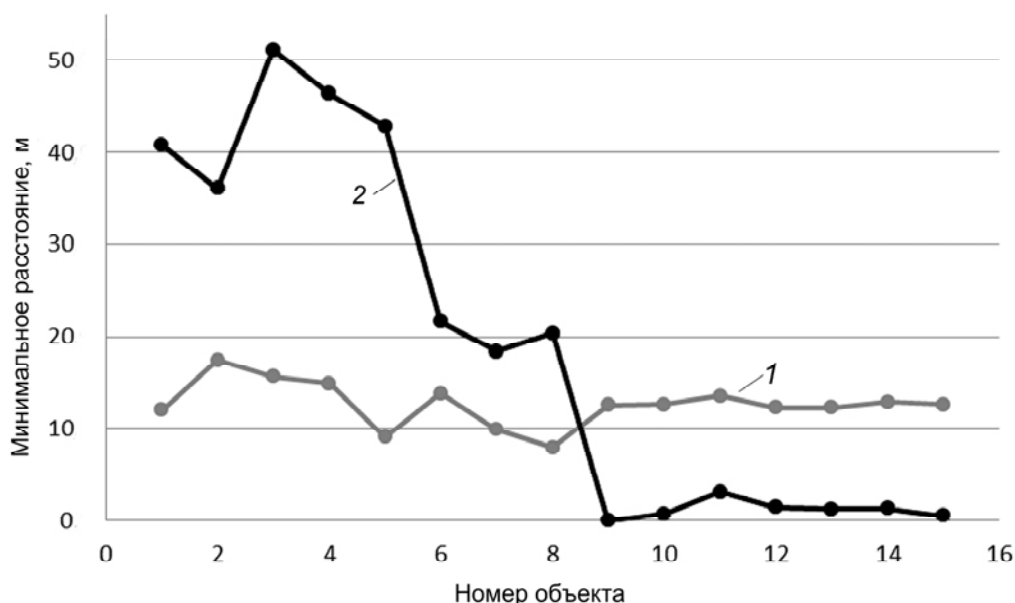


Рис. 2. Графическое отображение расчетов расстояний по эталонной выборке методом ближайшего соседа: 1 – первый класс (от 1 до 8) – фоновые объекты; 2 – второй класс (от 9 до 15) – аномальные объекты

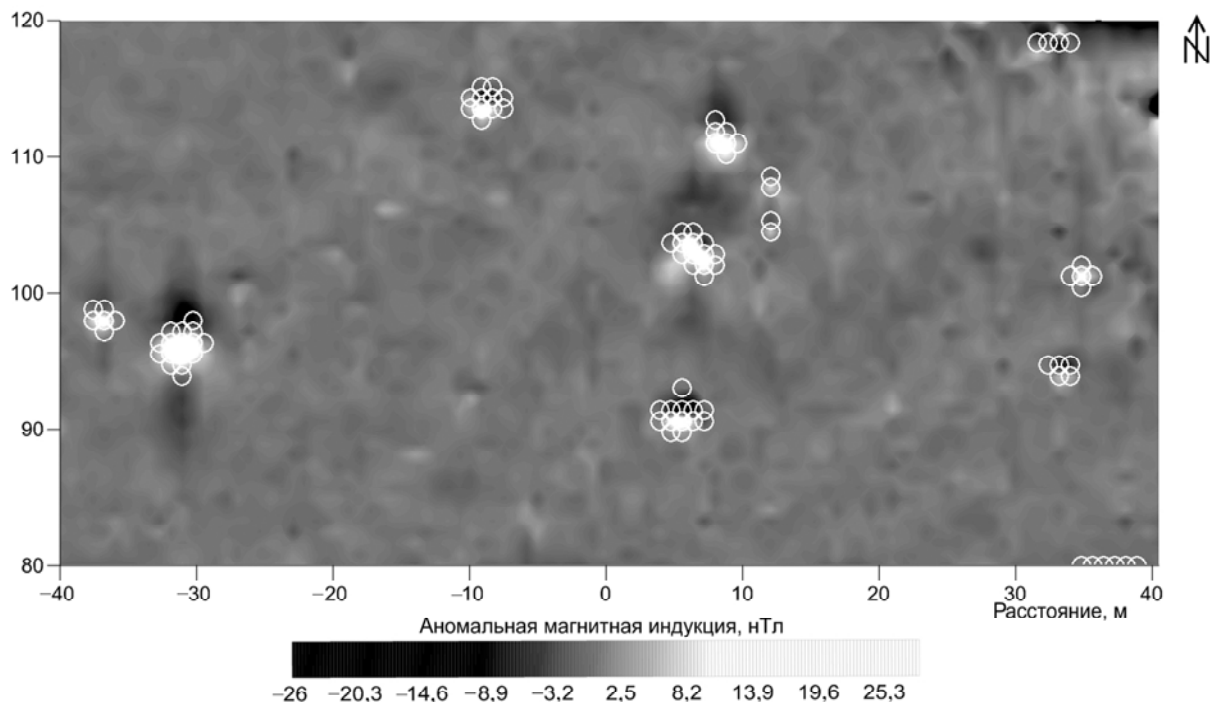


Рис. 3. Результат классификации по двум классам “аномалия” и “фон”: ● — принадлежат к классу “аномалия”, остальные точки — фон

Оценка информативности признаков заключалась в построении гистограмм распределений каждого из признаков всех классов [9]. Далее был рассчитан показатель $Alfa01$ сходства распределений каждого признака в виде

$$Alfa01 = \int_{x_0}^{x_k} \min(GR(x,0), GR(x,1)) dx,$$

Индекс информативности признака вычисляется по формуле

$$inf = 1 - Alfa01.$$

Рассчитанная информативность каждого из признаков оказалась невысокой, но вполне приемлемой (около 0,7).

Дополнительно была проанализирована информативность вторых производных по горизонтальным направлениям B_{xx} , B_{yy} , B_{xy} . Выяснилось, что эти параметры несут незначительную информационную нагрузку.

В результате эффективность отыскания аномалий с автоматическим расчётом весовых коэффициентов превысила 82%. На данном этапе программный модуль можно настроить таким образом, чтобы выделялись только аномалии, источниками которых с большей вероятностью являются археологические объекты, но в этом случае повышается вероятность пропуска слабых возмущений.

Выводы. Разработан программный модуль автоматического распознавания аномалий на магнитных картах археологических памятников. В программе реализован метод ближайшего сосе-

да, что дает возможность распознавать локальные возмущения магнитного поля, источниками которых могут быть археологические объекты.

Результаты апробации программы свидетельствуют о том, что предлагаемый набор признаков разделения на классы достаточен для выделения искомых объектов не на интуитивном уровне, а с помощью вектора признаков из эталонной выборки. При этом скриптовый сценарий Python позволяет вводить дополнительные классы.

В дальнейшем планируется усовершенствовать алгоритм в направлении иерархической классификации с применением модели квадродерева. Ведутся работы по совершенствованию пользовательского интерфейса.

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности: Справ. изд. / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 607 с.
2. Бондар К.М. Геофізичні дослідження ранньослов'янського поселення поблизу м. Обухів / К.М. Бондар, І.В. Віршило, Р.В. Хоменко, О.В. Петраускас, Р.Г. Шишкін, А.В. Скиба // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. — К., 2010. — С. 52–61.
3. Бондарь К.М. Пространственная структура поселения позднеримского времени Войтенки по геофизическим данным / К.М. Бондарь, М.В. Любичев, Н.А. Соловьев, С.В. Диденко // Материалы Первой междунар. конф. “Археология и геоинформатика”. — М.: ИА РАН, 2012. — (Археология и геоинформатика. Вып.7. — М.: ИА РАН, 2012. — Вып. 7. Электрон. издание).
4. Бондарь К.М. Современные магнитные исследования археологических памятников в Украине // Доисто-

- рия Восточной Европы поздне римского времени – начала эпохи Великого переселения народов (материалы полевых семинаров у с. Войтенки 2009–2010 гг.): Ostrogothica-Serie (Hefte). – Харьков: Изд-во Харьк. нац. ун-та им. В.Н. Каразина, 2011. – Вып. 1. – С. 59–60.
5. *Вивчення ефективності неруйнівних методів археологічних досліджень в умовах північного правобережного лісостепу на прикладі пам'яток Малополовецького археологічного комплексу: (Заключ. звіт) / Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка. – № 10ДФ049-01. – К., 2010. – 116 с., 50 рис., 5 табл., 43 джерела.*
 6. *Дараган М.Н. Исследования на Жаботинском поселении раннего железного века в Среднем Поднепровье / М.Н. Дараган, С.Н. Разумов, К.М. Бондарь // Археологічні дослідження в Україні 2008–2009 рр. – К., 2010. – С. 109–112.*
 7. *Жуков М.Н. Математична статистика та обробка геологічної інформації. – 2010 р. – http://www.geol.univ.kiev.ua/ua/lib/index.php?author=zhuikov_m_n#book.*
 8. *Журавлев Ю.И. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю.И. Журавлев, В.В. Рязанов, О.В. Сенько. – М.: Фазис, 2006. – 176 с.*
 9. *Кошелев Г.М. Магнітна розвідка археологічних пам'яток. – К., 2004. – 337 с.*
 10. *Campana S. Seeing the unseen. Geophysics and Landscape Archaeology / S. Campana, S. Piro. – London: Taylor & Francis Group, 2009. – 330 p.*
 11. [http://\[www.machinelearning.ru\]](http://[www.machinelearning.ru]).

ДОСВІД АВТОМАТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ АНОМАЛІЙ НА МАГНІТНИХ КАРТАХ АРХЕОЛОГІЧНИХ ПАМ'ЯТОК

С.В. Муравко, В.К. Демидов, К.М. Бондар, М.Н. Жуков
 Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
 вул. Васильківська, 90, Київ 03022, Україна, e-mail: fondad@ukr.net

Описано програмний модуль автоматичного розпізнавання аномалій на магнітних картах високої детальності. Модуль є частиною автоматизованої системи інтерпретації археологічно-магнітометричних даних. Розпізнавання аномалій реалізовано за методом найближчого сусіда на основі критеріїв, які спираються на практичний досвід якісної інтерпретації. Програмний модуль написаний на мові програмування Python.

Ключові слова: автоматичне розпізнавання аномалій, карта магнітного поля, метод найближчого сусіда, археологічна пам'ятка, Python.

THE SYSTEM FOR AUTOMATIC DETECTION OF ANOMALIES ON ARCHAEO-MAGNETIC MAPS

S.V. Muravko, V.K. Demidov, K.M. Bondar, N.N. Zhukov
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Vasilkovskaya St, 90, Kiev 03022, Ukraine, e-mail: fondad@ukr.net

A software module for automatic detection of anomalies on high-resolution magnetic maps is described. The module is part of an automated system for interpreting archaeomagnetic data, which is being currently developed. Anomaly detection is implemented by the method of the nearest neighbor, based on a number of criteria obtained through practical experience of qualitative interpretation. The software module is written in Python.

Keywords: automatic detection of anomalies, magnetic map, nearest neighbor method, archaeological site, Python.

References:

1. Ayvazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Klassifikatsii i snizhenie razmernosti: Sprav. izd.* [Applied statistics: Classifications and reduction of dimension. B.R.] Moscow, *Finansy i statistika*, 1989, 607 p.
2. Bondar K.M., Virshylo I.V., Khomenko R.V., Petrauskas O.V., Shyshkin R.H., Skyba A.V. *Heofizychni doslidzhennya rann'oslov'yans'koho poselennya poblyzu m. Obukhiv* [Geophysical prospecting of Early Slavic settlement near Obukhiv] *Trudy "Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky"* [Proc. "Theoretical and applied aspects of Geoinformatics"]. Kyiv, 2010, pp. 52-61.
3. Bondar' K.M., Lyubichev M.V., Solov'ev N.A., Didenko S.V. *Prostranstvennaya struktura poseleniya pozdnerimskogo vremeni Voytenki po geofizicheskim dannym* [Space structure of Late Roman settlement Vojtenki from geophysical measurements] *Trudy Pervoy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Arkheologiya i geoinformatika"* [Proc. Inter. Conf. "Archaeology and Geoinformatics"]. Moscow, *Inst. of Archeology RAN*, 2012, issue 7. CD.
4. Bondar' K.M. *Sovremennye magnitnye issledovaniya arkheologicheskikh pamyatnikov v Ukraine* [Recent magnetic studies of archaeological sites in Ukraine] *Trudy Mezhdunarodnyh seminarov "Doistoriya Vostochnoy Evropy pozdnerimskogo vremeni – nachala epokhi Velikogo pereseleniya narodov" 2009–2010 gg.* [Proc. Inter. Seminar. "Prehistory of Eastern Europe in the Late Roman time – beginning of the era of the Great Migrations"]: Ostrogothica-Serie (Hefte). Harkiv, *V.N. Karazin National University of Harkiv*, 2011, issue. 1, pp. 59-60.
5. *Vyvchennya efektyvnosti neruyynivnykh metodiv arkheolohichnykh doslidzhen'v umovakh Pivnichnoho Pravoberezhnoho Lisostepu na prykladi pam'yatok Malopolovets'koho arkheolohichnoho kompleksu* [Studying of effectiveness of non-destructive geophysical

- methods for archaeological prospecting in Northern Forest-Steppe on example of site from Malopolovetsky archaeological complex]. Report on Scientific Research. Kyiv, *Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 2010, 116 p.
6. Daragan M.N., Razumov S.N., Bondar' K.M. *Issledovaniya na Zhabotinskom poselenii rannego zheleznogo veka v Srednem Podneprov'e* [Prospecting of Early Iron age site Zhabotin on the Middle Dnieper] *Arkheologichni doslidzhennya v Ukraïni 2008–2009 rr.* [Archaeological Researches in Ukraine in 2008-2009 yrs]. Kyiv, *Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 2010, pp. 109-112.
 7. Zhukov M.N. *Matematychna statystyka ta obrobka heolohichnoyi informatsiyi* [Mathematical statistics and processing of geological data] 2010. Available at: http://www.geol.univ.kiev.ua/ua/lib/index.php?author=zhukov_m_n#book.
 8. Zhuravlev Yu.I., Ryazanov V.V., Sen'ko O.V. *Raspoznavanie. Matematicheskie metody. Programmnaya sistema. Prakticheskie primeneniya* [Recognition. Mathematical methods. Software system. Practical applications]. Moscow, *Fazis*, 2006, 176 p.
 9. Koshelyev I.M. *Mahnitna rozvidka arkheolohichnykh pam'yatok* [Magnetic prospecting of archaeological monuments]. Kyiv, 2004, 337 p.
 10. Campana S. Seeing the unseen. Geophysics and Landscape Archaeology / S. Campana, S. Piro. London, *Taylor and Francis Group*, 2009, 330 p.
 11. Machine Learning and Applications. Available at: <http://www.machinelearning.ru>.

Поступила в редакцию 09.12.2013 г.

Received 09/12/2013