



Archaeomagnetic method as a tool for solving of various archaeological problems

Deyan Lesigyarski, Maria Kostadinova-Avramova, Mary Kovacheva

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography-BAS, 3 "Acad. Georgi Bonchev" Str., 1113 Sofia, Bulgaria, e-mails: dekemvri_14@abv.bg (D. Lesigyarski); miki4740@abv.bg (M. Kostadinova – Avramova); marykov@abv.bg (M. Kovacheva)

Key words: archaeomagnetism, burnt clay, magnetic properties, archaeometry, archaeology

Archaeomagnetism is an interdisciplinary geophysical method with main task to discover Earth's magnetic field variations in the past. This information is extremely important for geophysics in the creation of different models related to the origin and behavior of the geomagnetic field. On the other hand, archaeomagnetic method can be used in archaeology to date various burnt clay remains and to solve some important problems. Results obtained for inclination and declination of the ancient geomagnetic field can strongly suggest the situation in which an archaeological structure is last cooled in the antiquity. Archaeomagnetic method is successfully applied for synchronization of different archaeological sites from the same period. This is particularly useful in the study of various prehistoric multilevel settlements which are associated with the same culture. Monitoring the changes of baked clay magnetic properties with increasing temperature can be used to determine the maximum firing temperatures of the studied material in the past. Based on these results some hypotheses related to the type, construction or purpose of the investigated structure may be confirmed or refuted, for example, if a furnace has been used for household or manufacturing purposes.

Археоманитният метод като способ за разрешаване на различни проблеми в археологията

Деян Лесигярски, Мария Костадинова-Аврамова, Мери Ковачева

Национален институт по геофизика, геодезия и география-БАН, София 1113, ул. "Акад. Георги Бончев", бл. 3, e-mails: dekemvri_14@abv.bg (Д. Лесигярски); miki4740@abv.bg (М. Костадинова – Аврамова); marykov@abv.bg (М. Ковачева)

Ключови думи: археоманетизъм, горяла глина, магнитни свойства, археометрия, археология

Археоманетизмът е интердисциплинарен геофизичен метод, чиято основна задача е възстановяването на вариациите на елементите на геомагнитното поле в миналото, т.е. намирането на стойностите на инклинацията, деклинацията и големината на земното магнитно поле за даден момент от време. Получената с помощта на метода информация е от съществено значение за геофизиката при създаването на различни модели, свързани с произхода и поведението на земното магнитно поле. Археоманитните изследвания се базират на свойството на изпечената глина да съхранява информация за елементите на геомагнитното поле, съществувало във времето и мястото на нейното последно изпичане, благодарение на т.нар. термоостающа намагнитеност (TRM). Материалите, използвани за археоманитни изследвания, са различни археологически останки от изпечена (горяла) глина – пещи, огнища, замазки, керамика, тухли и др. В най-общи линии, методът се използва в археологията за:

- датиране;
- синхронизация на различни археологически обекти, отнесени към една и съща епоха;
- установяване на това дали дадена археологическа структура е разкрита в положението, в което е изстинала в древността, или е била разместена след изстиването ѝ под влияние на различни процеси;
- определяне на максималните температури на изпичане (обгаряне), на които са били изложени разкритите глинени структури или артефакти в миналото.

Археоманитно датиране

Земното магнитно поле във всеки един момент се характеризира с два ъглови елемента – деклинация (D) и инклинация (I), както и с интензитета си (F). Трите елемента на геомагнитното поле не са постоянни, а се променят с времето и пространството, т.е. за всяка географска област и момент от време тези елементи притежават различни стойности. С изследването на голям брой датирани по

други методи археологически структури се стига до изработването на т.нар. реперни криви за дадена географска област. Тези криви показват вариациите на елементите на геомагнитното поле с течение на времето и могат да бъдат използвани за различни цели. Най-важната от тях за археологията е датирането. Археомagnetизмът е единственият метод за абсолютно датиране, който се извършва в България. Основава се на съпоставяне на експериментално получените стойности за елементите на древното геомагнитно поле от изследваната структура с реперните криви.

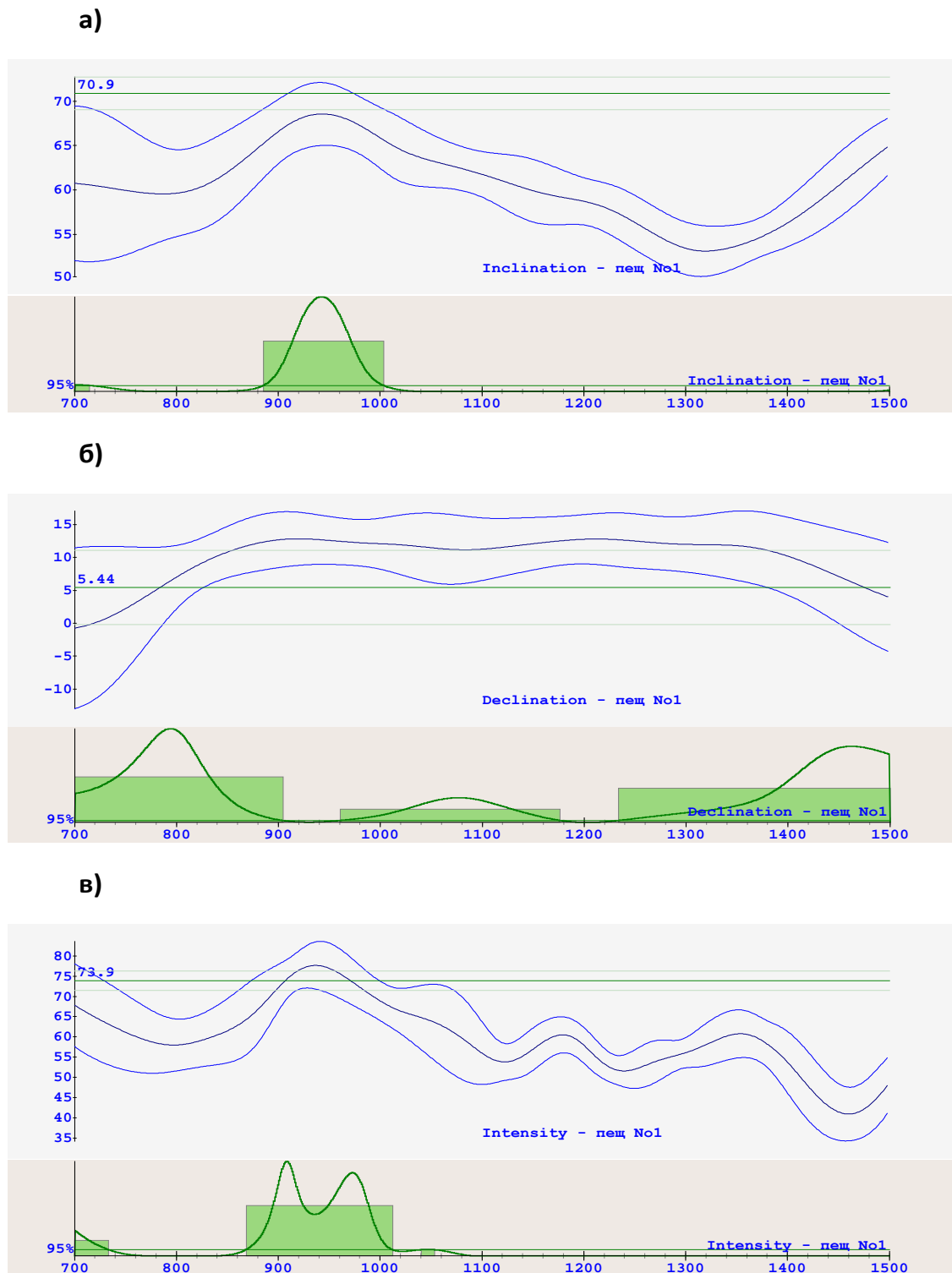
Точността на датирането зависи не само от неопределеността, с която са получени експерименталните резултати за датируемия обект, но и от прецизността на използваните вариационни криви. Последната от своя страна зависи от броя на включените в базата данни реперни обекти и от точността на свързаните с тези обекти датируеми интервали, получени по други независими методи. За подобряване на точността на реперните криви, а оттам и тази на самото археомagnetно датиране, базите данни са обект на непрекъснато попълване и ревизиране чрез използване на резултатите от всяко ново археомagnetно определение. В това отношение Палеомagnetната лаборатория към НИГГГ-БАН има голям опит, като разполага с най-дългия локален ред археомagnetни данни в света, обхващащ последните 8000 години (*Kovacheva et al., 2014*).

В световната практика много често датирането се извършва на базата на резултати само за посоката (I, D) или само за интензитета (F_a) на геомагнитното поле (*Ковачева, 1998*). Това обаче често води до нееднозначен резултат – получаване на няколко широки времеви интервала за един и същи археологически обект. Ето защо, надеждността на археомagnetното датиране за всеки конкретен случай може да се подобри, ако се използват едновременно данните както за посоката, така и за палеоинтензитета. Това може да се илюстрира с два примера – за Средновековен дворецов комплекс Плиска и къснонеолитно селище Хотница-Орловка.

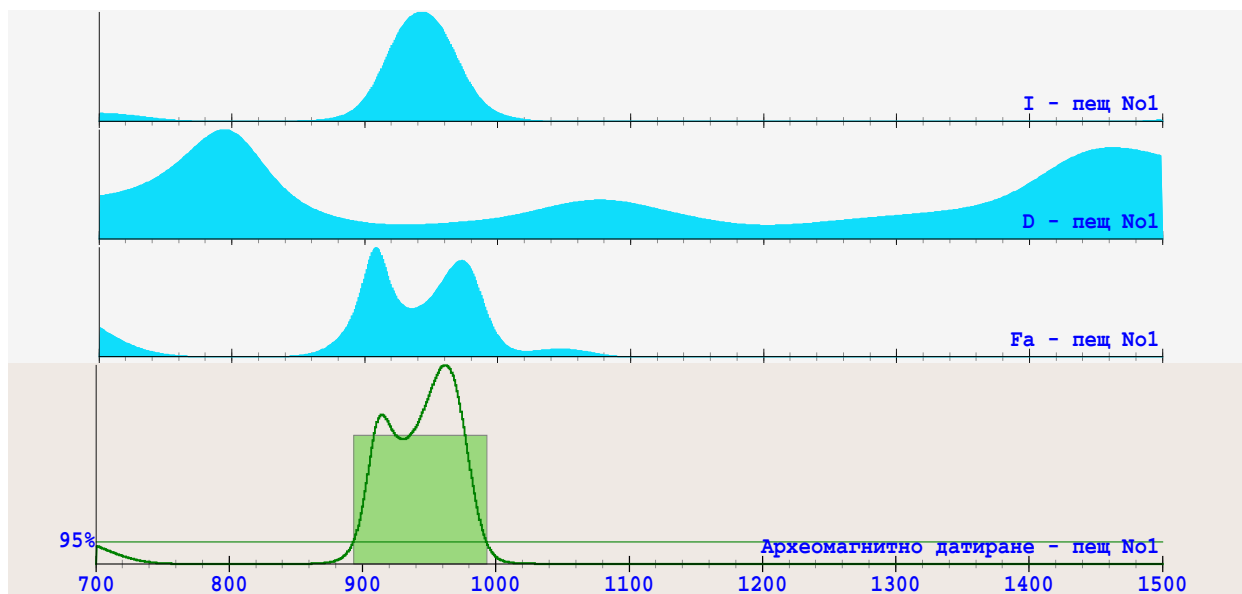
Първият пример е за куполна пещ № 1 от сектор изток, хоризонт I на Средновековния дворецов център – Плиска (*Kostadinova-Avramova, et al., 2014*). Получените резултати за посоката и големината на земното магнитно поле са: $D = 4.8^\circ$ и $I = 70.8^\circ$ с оценка на грешката от 2.3° при 95 % плътност на вероятността, $F_a = 73.8 \pm 3.04 \mu\text{T}$. Първият етап от процеса на датиране е да се определят датируемите интервали според резултатите за трите характеристики на полето чрез сравнението им със съответните реперни криви за дадената епоха (в случая между 700 и 1500 г. н.е.). Датируемият интервал се получава чрез пресичане на хоризонталната линия, обозначаваща определената от колекцията за датиране стойност на съответния елемент на древното магнитно поле с вариационната крива за този елемент (Фиг. 1). Тук трябва да се вземе под внимание неопределеността както на експериментално получената стойност за анализираната колекция, така и на самата реперна крива. Следователно, датируемият интервал ще бъде толкова по-тесен, колкото експерименталната грешка и неточността на кривите са по-малки и колкото по-рязка е моментната вариация на съответния геомагнитен елемент.

От Фиг. 1 ясно се вижда нееднозначността на решението при използване само на един елемент на геомагнитното поле. От елемента деклинация се получават три възможни интервала: 700-910 г. н.е., 960-1180 г. н.е. и 1225-1500 г. н.е. Интервалът, получен по инклинацията е между 895 и 1005 г. н.е., което практически изключва третата възможност според деклинацията и същевременно се наблюдава само частично съвпадение с другите ѝ два интервала. Тази нееднозначност на решението може да се разреши при съпоставката на получените периоди от посоката с тези от палеоинтензитета (Фиг. 1). Окончателното решение е резултат от съвпадението на интервалите от всички геомагнитни елементи. Крайният резултат за датиране на пещ № 1 във времето е между 894 и 993 г. н.е. (Фиг. 2).

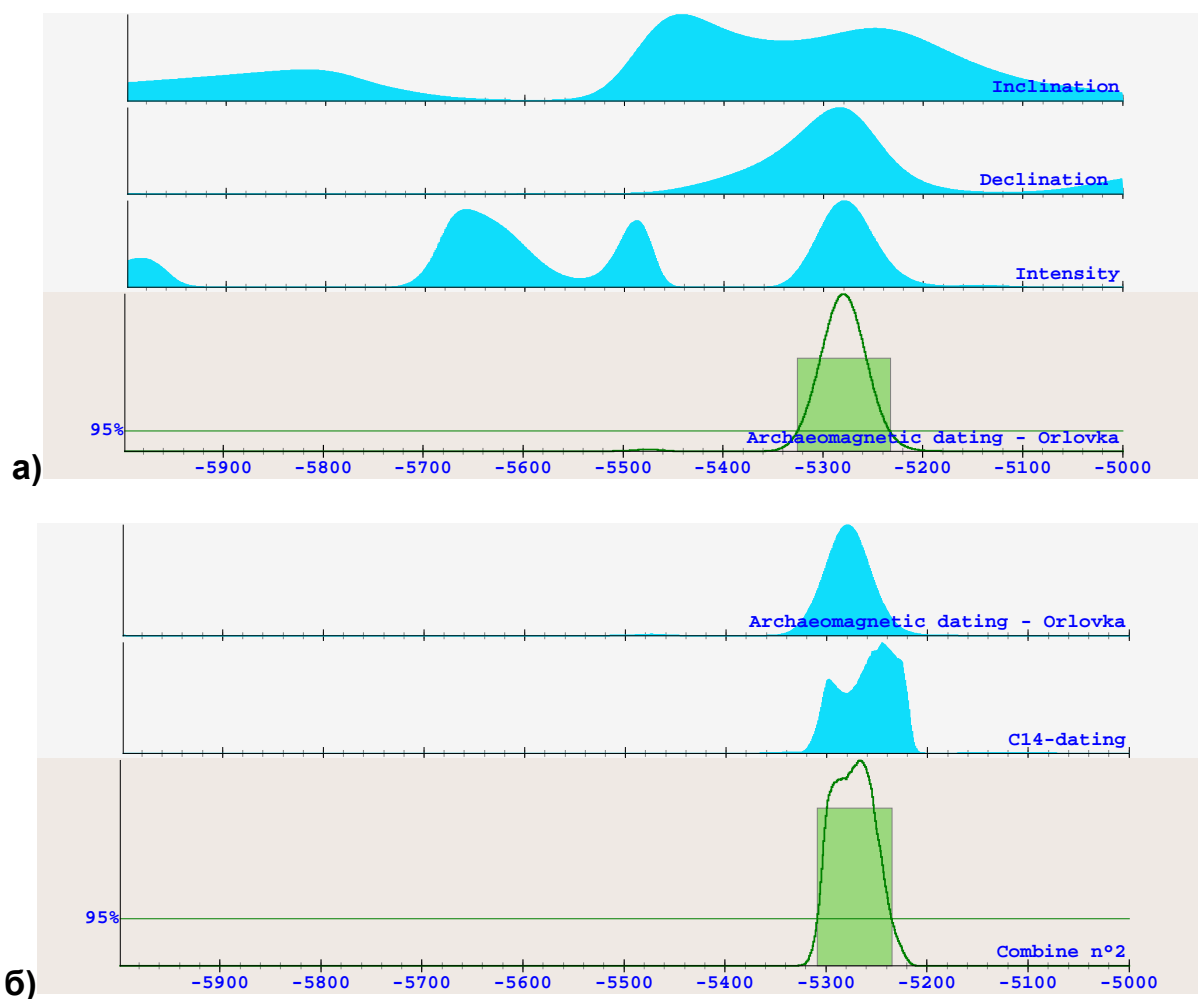
Един пример за отлично съвпадение между археомagnetната и радиовъглеродната датировка са интервалите, получени за обект "Орловка" от късния неолит, намиращ се в близост до с. Хотница, Търновско. На Фиг. 3 а) е илюстриран резултатът от археомagnetното датиране на обект "Орловка" с помощта на вариационните криви за трите елемента на геомагнитното поле във времето от 6000 до 5000 г. пр.н.е. Както и в случая с пещ № 1 от Плиска, впечатление прави наличието на потенциални датируеми интервали по реперната крива на интензитета, които напълно отхвърлят някои от интервалите, дадени от инклинацията и деклинацията и обратно. Този факт отново потвърждава важността на едновременното използване и на трите геомагнитни елемента. В същото време, сравнението между археомagnetния и радиовъглеродния датируем интервал за този обект, което се вижда на Фиг. 3 б), показва почти пълно съвпадение между тях. Това е един чудесен пример за точността на датирането, която може да се постигне с помощта на археомagnetния метод.



Фигура 1: Сравнение на археомангнитните резултати за пещ № 1 (Дворцов център – Плиска) със съответните български реперни криви за: а) инклинация; б) деклинация; в) интензитет.



Фигура 2: Археоманитно датиране на пещ № 1 (Дворцов център – Плиска) след комбиниране на получените датируеми интервали за инклинацията, деклинацията и интензитета (894-993 г. н.е.).



Фигура 3: а) Археоманитно датиране на обект “Орловка” с помощта на реперните криви за трите елемента на геомагнитното поле (5323-5237 г. пр.н.е.); б) Сравнение между археоманитния и радиовъглеродния датируеми интервали.

Синхронизация на археологически обекти по епохи

Наред с датирането, синхронизацията на археологически обекти по епохи е едно от най-важните приложения на археомагнитния метод в археологията. Извършва се чрез съпоставяне на стойностите за трите елемента на земното магнитно поле, получени за различни археологически обекти, отнесени към една и съща епоха според археологическите датировки. Така по независим от археологическите данни път може да се потвърдят разликите в степента на културно развитие в отделните поселища, които са съществували по едно и също време или да се синхронизират отделни нива на различни селищни могили, представляващи една и съща култура. Тези възможности на метода са особено ценни за енеолитната епоха, при която съществуват проблеми в радиовъглеродните датировки (Boyadziev, 1995). Като пример може да се посочи енеолитната могила в гр. Русе, от която са опробвани няколко жилищни хоризонта (Ковачева и съавт., 1995). Хоризонтите се отнасят към различни култури според намерените във всеки един от тях артефакти. Получените археомагнитни данни показват, че I хоризонт (броен от горе надолу) от могилата в гр. Русе, отнесен към късния енеолит, може да се синхронизира с XIII хоризонт (броен от долу нагоре) от селищната могила край с. Голямо Делчево, Варненско. От Таблица 1 се вижда, че средните стойности за деклинацията, инклинацията и палеоинтензитета за двата обекта са много близки, което по независим път потвърждава предположенията на археолозите за едновременното съществуване на съпоставените стратиграфски хоризонти от двете селищни могили и отговарящите им културни особености.

Таблица 1: Синхронизация на два хоризонта от могилите в гр. Русе и с. Голямо Делчево, Варненско (N_{dir} – брой независимо ориентирани образци, използвани за определяне на средната посока на древното поле; N_{int} – брой резултати, използвани при определяне на средната стойност на палеоинтензитета).

Лаб. №	Обект (хоризонт)	Археологическа датировка (г. пр.н.е.)	$D(^{\circ})$	$I(^{\circ})$	N_{dir}	$F_a(\mu T)$	N_{int}
51	Голямо Делчево XIII	4250-4200 (по стратиграфия)	6.65	45.95	10	39.23	11
297	Русе I	4300-4200 (по стратиграфия)	6.50	48.80	29	40.93	3

Таблица 2: Синхронизация на обект Татар маша с други обекти по археомагнитни данни (N_{dir} – брой независимо ориентирани образци, използвани за определяне на средната посока на древното поле; N_{int} – брой резултати, използвани при определяне на средната стойност на палеоинтензитета).

Лаб. №	Обект (хоризонт)	Археологическа датировка (г. пр.н.е.)	$D(^{\circ})$	$I(^{\circ})$	N_{dir}	$F_a(\mu T)$	N_{int}
100	Халка Бунар	280 – 278 (по монети)	348.7	62.2	12	77.23	20
277	Пистирос	280 – 279 (по графити)	347.10	66.20	5	74.29	17
274	Сборяново	260 – 240 (по печати, надписи)	350.23	63.22	21	71.85	23
371	Татар маша	290 – 285 (по монети)	350.9	61.5	19	76.31	10

От разкрития в местността Татар маша край с. Княжево, Хасковско, дом на тракийски владетел са опробвани различни съоръжения от изпечена глина за археомагнитен анализ. Съгласно археологическите съображения, периодът на обитаване на жилището може да се раздели на два етапа: първият обхваща времето между 320 и 285 г. пр.н.е., а вторият – между 260 и 240 г. пр.н.е. Опробваните структури се отнасят към първия етап на обитаване, който завършва с опожаряване на жилището около 290-285 г. пр.н.е. След провеждане на анализа, за елементите на древното магнитно поле от този обект се получава: $D = 350.9^{\circ}$ и $I = 61.5^{\circ}$ с оценка на грешката от 2.1° , $F_a = 76.31 \pm 3.94$

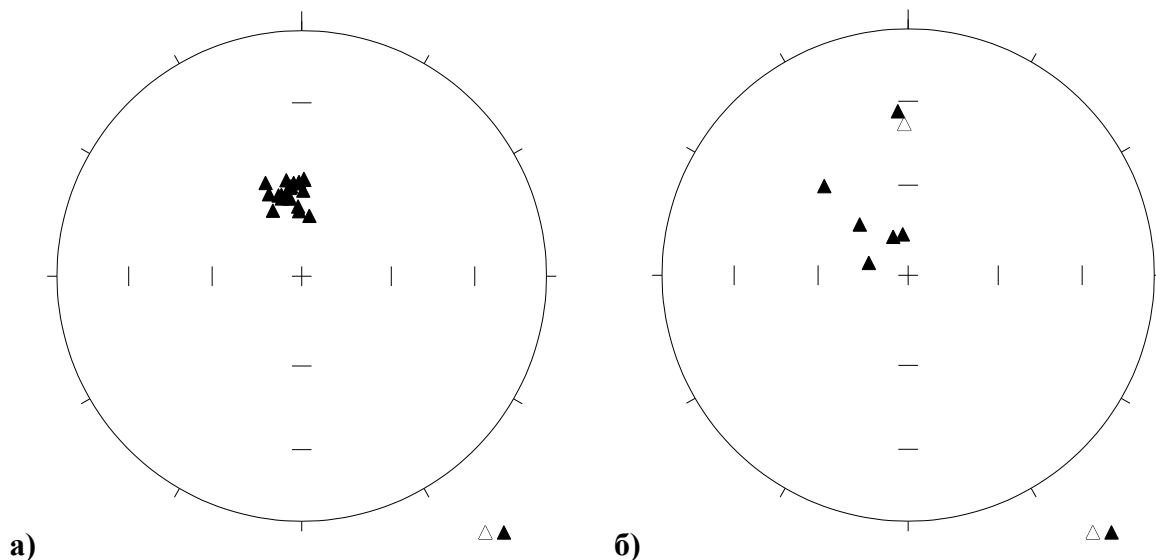
μТ. От използваните реперни обекти за построяване на реперните криви има три археологически обекта с близки археомагнитни резултати до тези, получени за жилището от Татар маша. Това са грънчарският център Халка бунар при с. Горно Белево, Старозагорско, тракийското селище от комплекса Сборяново (Разградско) и едно от нивата на емпорион Пистирос близо до Пазарджик. Средните стойности на елементите на древното геомагнитно поле и археологическите датировки за посочените обекти са приведени в Таблица 2.

Датировката на изследваните структури от Халка бунар и Пистирос е в началото на III век пр. н.е., т.е. близо до края на възможния археомагнитен датируем интервал за Татар маша. Датата на опожаряването на тракийското селище от комплекс Сборяново е по-нова от предполагаемия период на опожаряване на Татар маша. Прегледът на стойностите за получените археомагнитни елементи показва, че тези на Татар маша са най-близки до стойностите за Халка бунар, което ги прави синхронни във времето.

Идентифициране на положението „in situ” на изследваните структури

Идентифицирането на положението *in situ* е всъщност рутинна практика при археомагнитната работа. Без сигурност за позиционирането на образците не може да се получи резултат за елементите на посоката на древното геомагнитно поле. Установяването на това положение дава възможност да се докаже дали дадена структура е била разместена след последното ѝ опалване. Например, дали дадено жилище е рухнало по време на пожар или по-късно.

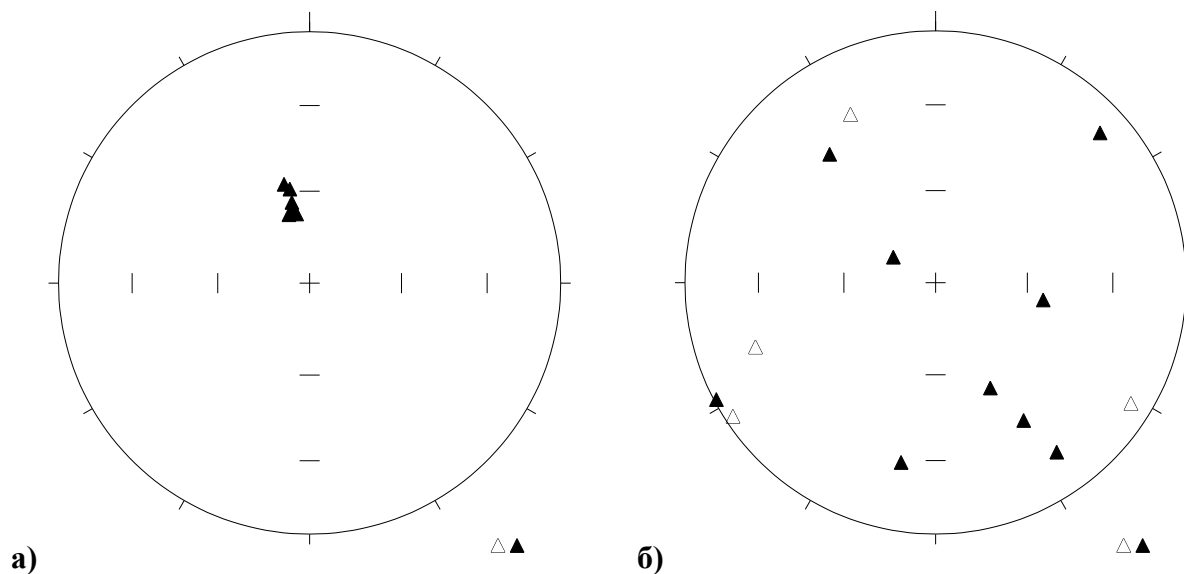
За да бъде една структура *in situ* е необходимо да се наблюдава добра вътрешна съгласуваност между установените по експериментален път вектори на остатъчно намагнитване и същевременно определените стойности за I и D да са реални (около $360^\circ \pm 30^\circ$ за деклинацията и между 40 и 75° за инклинацията). Ако тези условия са изпълнени, то опробваната структура се е запазила под земята в течение на времето така, както е изстинала в древността. В противен случай се счита, че тя е била разместена след последното ѝ изстиване поради различни причини (при разместване на земните пластове, където е разположен археологическият обект, при срутване на изправени структури след пожара и т.н.). За степента на вътрешна съгласуваност между векторите на остатъчното намагнитване лесно се съди по техните стойности или чрез представяне им във вид на стереографски проекции. Нека илюстрираме това с помощта на два примера.



Фигура 4: Стереографски проекции на векторите на остатъчната намагнитеност за независимо ориентираните образци от Татар маша: а) проби, които са разкрити *in situ*; б) проби, които не са разкрити *in situ*.

За седем от всички дванадесет събрани образци от структура 2 на тракийския владетелски дом в местността Татар маша още по време на полевата работа възниква съмнение дали са намерени *in situ*, тъй като представляват парчета от паднали замазки. Резултатите от археомагнитното изследване

категорично доказват, че тези парчета са паднали в следствие т.е. след окончателното им изстиване. Това ясно се вижда от стереографските проекции на векторите на остатъчната намагнитеност за пробите от структура 2 (Фиг. 4 б)) и сравнението им с тези, получени от останалите структури (Фиг. 4 а)). Като друг пример може да се посочи резултатът за палеопосоката за проби от южната порта на тракийското селище от комплекс Сборяново (Ковачева, 1998). За археомагнитно изследване са събрани 29 образци, за 14 от които се предполага, че са паднали след пожар мазилки без да има категорични археологически доказателства за това. Резултатите за палеопосоката, добити от тези 14 проби, недвусмислено показват, че те не са намерени *in situ*, с което се потвърждава и хипотезата на археолозите-проучватели (Фиг. 5).



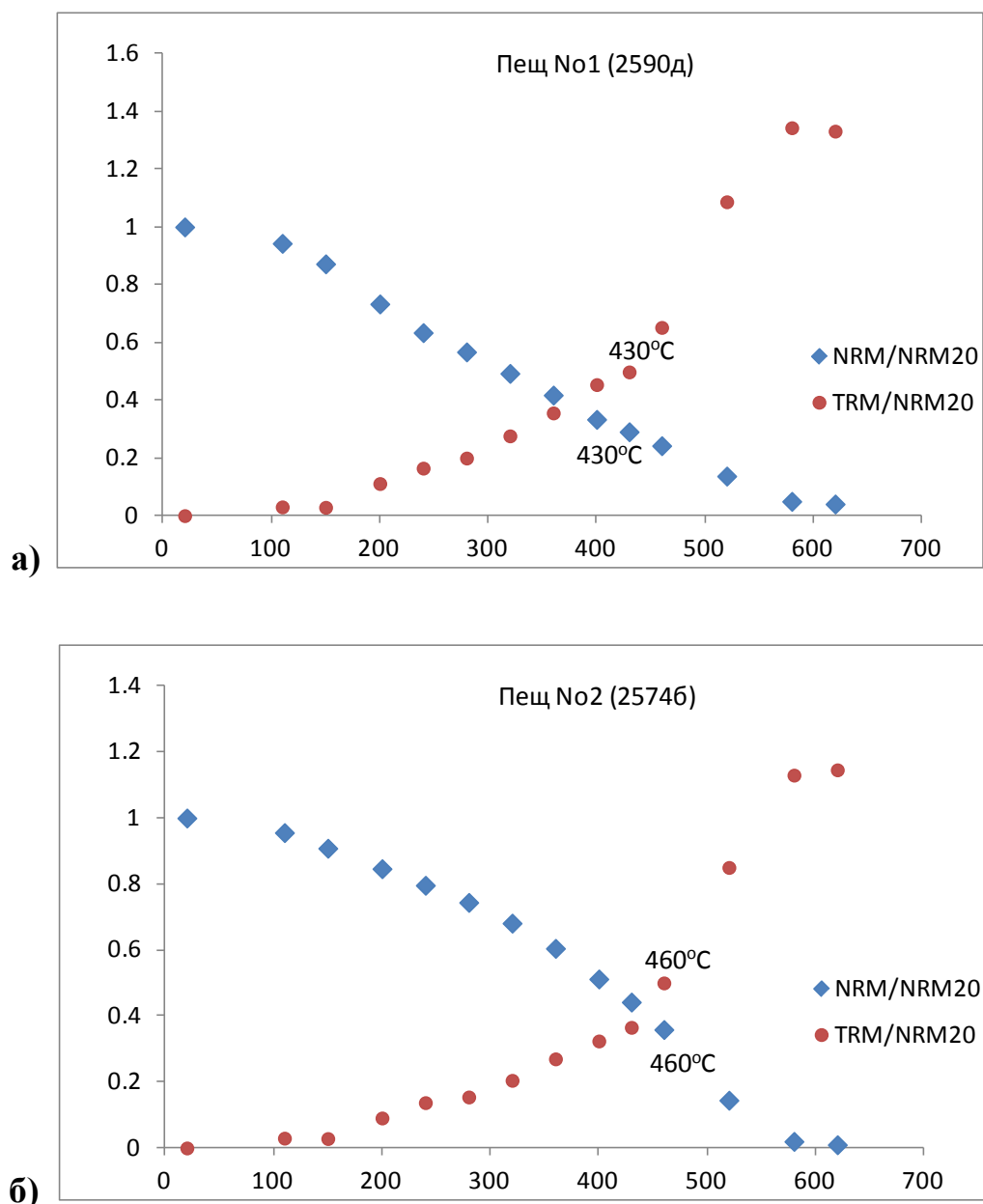
Фигура 5: Стереографски проекции на векторите на остатъчната намагнитеност за независимо ориентирани образци от Сборяново: а) проби, които са разкрити *in situ*; б) проби, които не са разкрити *in situ*.

Определяне на температурите на опалване в древността

Възстановяването на температурата на изпичане или опалване на праисторическите материали от горяла глина може да донесе ценна информация за археолозите, които се интересуват например от технологията на производството в грънчарските пещи или от степента на разпространение на пожарите, с които често завършват периодите на обитаване на древните селища. Голямо преимущество на археомагнитния метод при определяне на температурите на опалване, когато те са до 700° С е фактът, че се получават като следствие от експеримента за определяне на палеоинтензитета, т.е. определянето на температурите в случая не е самоцел и за него не е нужен нарочен експеримент.

За възстановяването на древния интензитет (F_a) е използван модифицирания от Coe (1973) метод на Thellier & Thellier (1959). Той се състои накратко в последователно стъпково греене на образците в определен температурен интервал. При всяка температура образците се грят веднъж в нулево магнитно поле и веднъж в лабораторно индуцирано слабо магнитно поле (от порядъка на земното). В първия случай част от носената от материалите естествена остатъчна намагнитеност (NRM) се изтрива, а във втория се създава лабораторна термоостатъчна намагнитеност (TRM). При липса на минералогични промени, кривата на размагнитване на NRM ще бъде симетрична на кривата на придобиване на TRM. Температурата, при която симетричността се нарушава, показва промяна в минералогията на изследвания материал и може да се предполага, че той не е бил грят в древността до по-високи температури. Установената по този начин максимална температура на опалване ще е толкова по-близка до реалната, колкото по-малка е температурната стъпка, която се прилага при възстановяване на палеоинтензитета. На Фиг. 6 е представен графично резултатът от експеримента за определяне на палеоинтензитета за два образца от двете опробвани пещи от Средновековния

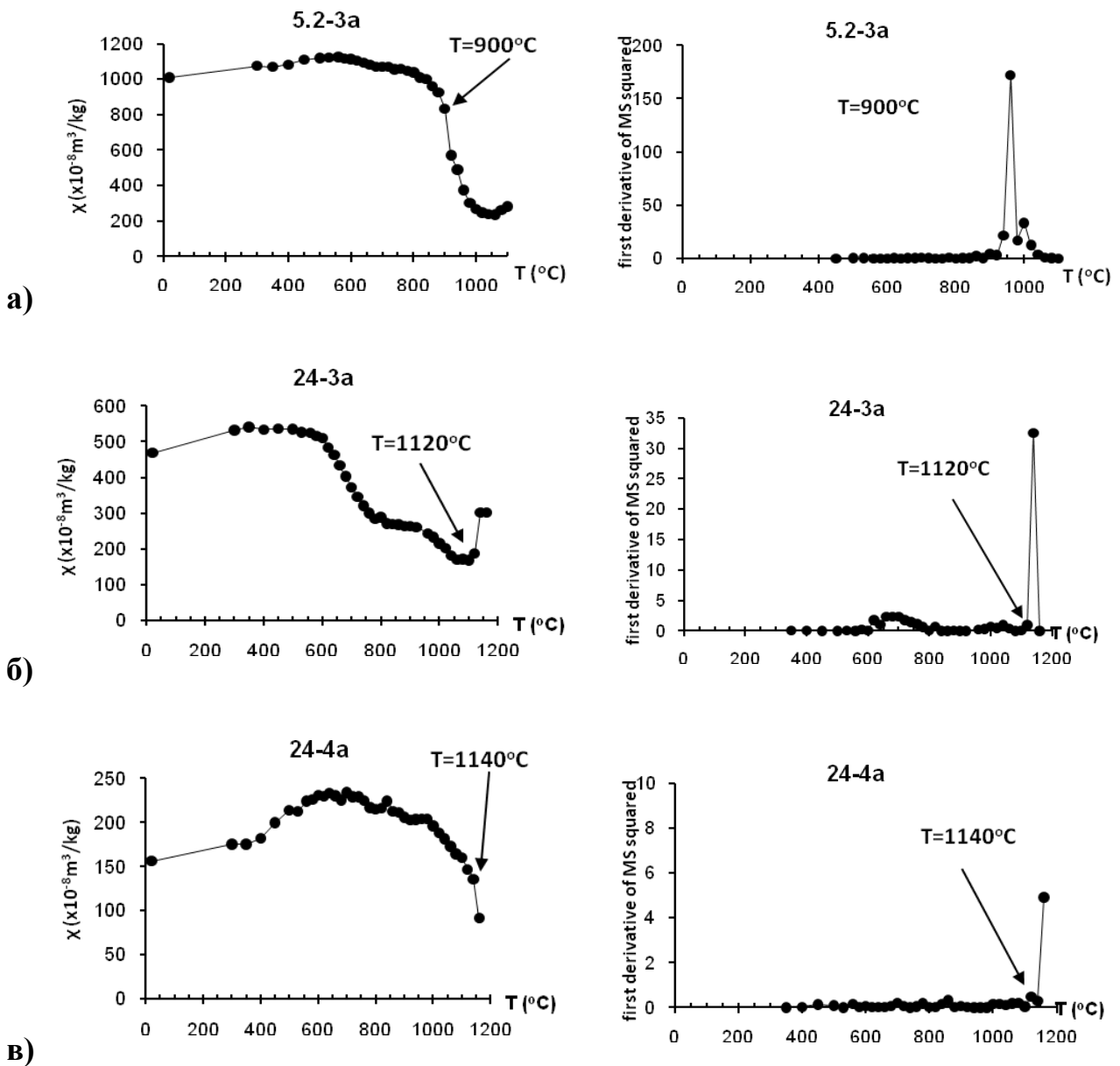
дворцов комплекс в Плиска (*Kostadinova-Avramova et al., 2014*). Вижда се, че минералогичните промени при образец с лабораторен номер 2590д от пещ № 1 настъпват при около 430 °С, докато тези за образец 25746 от пещ № 2 се наблюдават след 460 °С. Това се съгласува много добре с археологическите предположения, според които двете пещи са били използвани в древността за битови нужди. Малко по-високите температури, предположени за пещ No 2, са свързани с факта, че тя е била куполна, за разлика от пещ № 1.



Фигура 6: Максимални температури на опалване на двете опробвани пещи от Дворцов комплекс-Плиска: а) 430 °С за пещ № 1; б) 460 °С за пещ № 2. Стойностите за NRM и TRM, получени след всяка температура, са нормирани на първоначално измерената стойност на носената от материала намагнитеност (NRM при 20 °С).

Друг начин за възстановяване на температурите на опалване на древните структури е използването на една от основните магнитни характеристики на веществата – магнитната възприемчивост. За разлика от намагнитеността, за която са отговорни само желязо-съдържащите

минерали, магнитната възприемчивост е функция от целия минерален състав на материала. Това обуславя и възможността с нейна помощ да се определят много по-високи достигани температури на опалване (над температурите на Кюри), отколкото чрез експеримента за палеоинтензитета. Работата се състои най-общо в стъпково лабораторно нагряване на образците и измерване на магнитната им възприемчивост при стайна температура след всяка стъпка (Rasmussen et al., 2012). Методът се основава на факта, че при лабораторното нагряване в неизпечената глина протичат различни минералогични трансформации, които обикновено водят до значителни промени в магнитната възприемчивост. След охлаждане процесите на неоформация обикновено са необратими и минералите, които са се образували при високите температури до голяма степен се запазват във времето. В резултат на това максималната температура, която е била достигната при изпичането, може да бъде възстановена от кривата на магнитната възприемчивост, получена при стъпковото нагряване на образците в лабораторията.



Фигура 7: Максимални температури на опалване в древността на образци от Обект 15 по АМ „Струма“ според резултатите от магнитната възприемчивост: а) образец 5.2-3а (900 $^{\circ}\text{C}$); б) образец 24-3а (1120 $^{\circ}\text{C}$); в) образец 24-4а (1140 $^{\circ}\text{C}$).

Описаният метод е приложен върху 148 неориентирани проби, взети през лятото на 2014 г. от различни части на 25 жилищни структури, намерени при спасителни археологически разкопки при строителството на АМ „Струма” – Обект 15 край с. Мурсалево, Благоевградско. Магнитната възприемчивост е определена на мас-специфична основа, т.е. вземайки под внимание и изменението на теглото на образците в процеса на нагриване. Измерена е и т.нар. честотно-зависима магнитна възприемчивост, отразяваща присъствието и относителното количество на най-фините частици от оксиди на желязото, които се образуват в процеса на обгаряне на глината. Тези допълнителни параметри не са включени в методиката на *Rasmussen et al. (2012)*, но те дават повече информация за характера на наблюдаваните изменения на магнитната възприемчивост при нагриване.

Температурата, която е била достигната при опожаряването в древността би трябвало да съвпада с температурата на изпичане в лабораторията, след която измененията на магнитната възприемчивост протичат с най-голяма скорост. Въз основа на това максималните температури на опалване са определени от графиките, показващи зависимостта на магнитната възприемчивост от температурата, както и квадрата на първата производна на магнитната възприемчивост като функция на температурата при лабораторното греене. Няколко типични примера са представени на Фиг. 7, където със стрелки са означени определените максимални температури на изпичане.

Археоманитният метод е единственият геофизичен метод, който позволява възстановяването на елементите на геомагнитното поле в археологическото минало. Той е и единственият метод за абсолютно датирание, провеждан в България. Същевременно, неговите полезни приложения за разрешаването на някои проучвателни проблеми показват големите възможности на този метод в областта на интердисциплинарните изследвания, свързани с проучването и опазването на културно-историческото наследство.

Благодарности

Представените изследвания са направени с финансовата подкрепа на договор ДФНИ К02/13 към ФНИ на тема „Огънят в древността, зарегистриран в археологическите останки и почвите – магнитни изследвания в полза на археологията и почвознанието”.

Литература

- Ковачева, М., Йорданова, Н., Бояджиев, Я., Попов, В., 1995, Археоманитно изследване на енеолитната могила в гр. Русе, БГС XXI, 73-86
- Ковачева, М., 1998, Векови вариации на геомагнитното поле по археоманитни данни, Дисертация за получаване на научната степен “доктор на физическите науки”, НИГГГ-БАН
- Boyadziev, Y., 1995, Chronology of Prehistoric Cultures in Bulgaria, D. Bailey and I. Panayotov (eds.), Prehistoric Bulgaria, Monographs in World Archaeology 22, Prehistory Press, Madison, Wisconsin, 149-192
- Coe, P.C., 1967, Palaeointensity of the Earth's magnetic field determined from tertiary and quaternary rocks, Journal of Geophysical Research 72, 3247-3262
- Kostadinova-Avramova, M., Lesigyarski, D., M., Kovacheva, M. 2014, Archaeomagnetic study of two medieval ovens discovered in the Pliska Palace, North-eastern Bulgaria. Bulgarian e-Journal of Archaeology 4, 35-50
- Kostadinova-Avramova, M., Kovacheva, M., Boyadzhiev, Y., 2014a, Contribution of stratigraphic constraints of Bulgarian multilevel tells in the prehistory and comparison with archaeomagnetic observations, Journal of Archaeological Science 43, 227-238
- Kovacheva, M., Kostadinova-Avramova, M., Jordanova N., Lanos, Ph. and Boyadzhiev, Y., 2014. Extended and Revised Archaeomagnetic Database and Secular Variation Curves from Bulgaria for the Last Eight Millennia, Physics of the Earth and Planetary Interiors 23, 79-94
- Rasmussen, K.L., De La Fuente, G.A., Bond, A.D., Mathiesen, K.K., Vera, S.D., 2012, Pottery firing temperatures: a new method for determinating the firing temperature of ceramics and burnt clay, Journal of Archaeological Science 39, 1705-1716
- Theillier, E., Theillier, O., Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, Annales de Géophysique 15, 285-376