



Preliminary results from integrated magnetic and geomorphologic investigations of the archaeological site "Ada tepe" (Eastern Rhodopes)

Antonia Mokreva, Emilia Tcherkezova, Neli Jordanova

NIGGG-BAS, Acad. G. Bonchev str., bl.3, 1113 Sofia; antoniamokreva@abv.bg; etcherkezova@geophys.bas.bg; vanedi@geophys.bas.bg

Abstract

This paper presents the preliminary results from integrated magnetic and geomorphologic investigations of archaeological site "Ada tepe" (Eastern Rhodopes). The main goal of this work is to investigate the anthropogenic impact on the Holocene deposits using field geomorphologic mapping and analysis of magnetic susceptibility and other magnetic characteristics of those deposits. The analysis of magnetic susceptibility was done on the basis of 66 geomorphological observation points, from which 100 samples from different depth levels of soils/sediments, archaeological structures such remains of buildings, worksites and dump locations with waste from ancient mining and ore processes are gathered. The results show that magnetic susceptibility (X) and laboratory remanent magnetizations could be successfully utilized for reliable classification and identification of the nature of the materials. Samples from soils and archaeological levels are characterized by the highest values of X, while materials from dump sites have systematically lower X values. Sediments possess the lowest magnetic susceptibilities. The computer processing and visualization of the input data and the results were done using geographic information system (GIS).

Ключови думи: магнитна възприемчивост, геоморфология, Ада Тепе, древен рудодобив

Предварителни резултати от интегрирани магнитни и геоморфоложки изследвания на археологически обект „Ада тепе” (Източни Родопи)

Антония Мокрева¹, Емилия Черкезова¹, Нели Йорданова

¹ - НИГГГ – БАН, ул. Акад. Г. Бончев, бл.3, 1113 София; antoniamokreva@abv.bg; etcherkezova@geophys.bas.bg; vanedi@geophys.bas.bg

Въведение

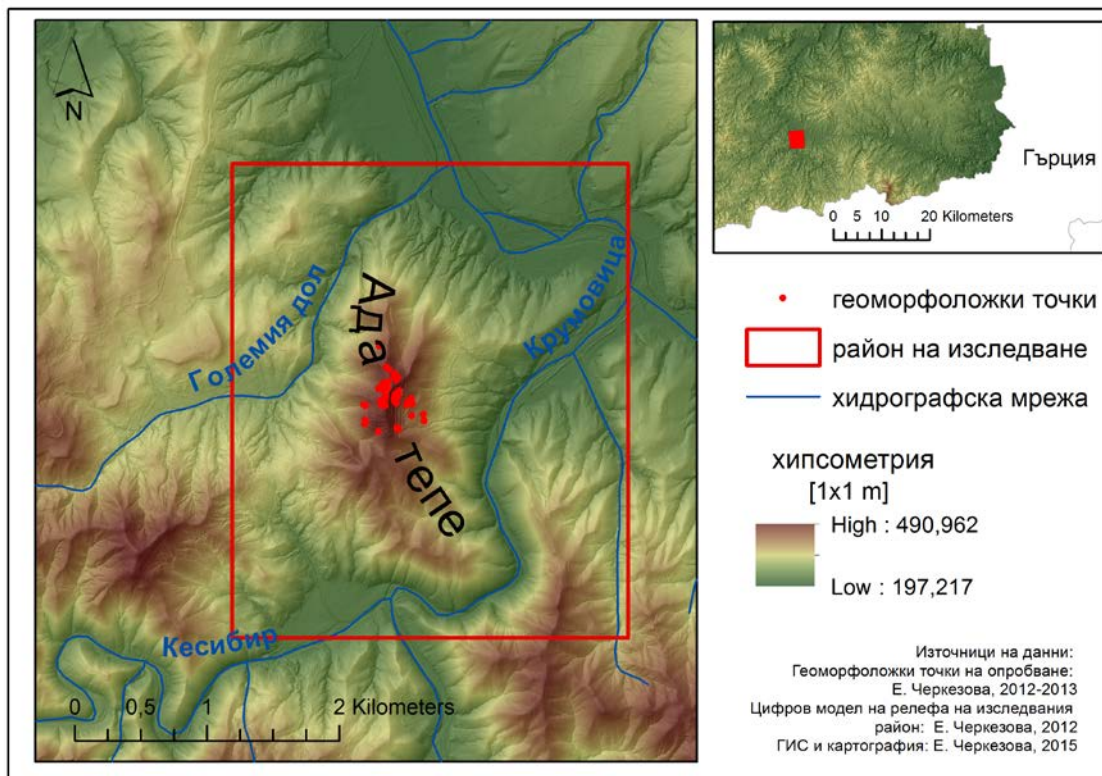
Археологическите изследвания на останките на Ада Тепе датират от 2001г., когато започват и проучванията за потенциала на рудното находище за извличане на злато от компанията Volkan Mineral and Mining AD, клон на канадската фирма Dundee Precious Metals. По време на геоложките проучвания са открити и следи от древна човешка дейност на върха на хълма Ада Тепе. Археологическите проучвания, водени първоначално от д-р Г. Нехризов от НАИМ-БАН, а след това от д-р Хр. Попов и д-р Кр. Ников от НАИМ-БАН, показват, че намерените останки датират главно от късната бронзова епоха – 14-11 в. пр.Хр. (Popov and Jockenhövel, 2011), докато ранната желязна епоха по намерените индикации и структури покрива периода 8-7 в. пр.Хр. (Popov and Jockenhövel, 2011). Отвалите от отработена скална маса в процеса на древната рудодобивна и рудопреработвателна дейност са най-широко разпространените останки от човешката дейност в района на Ада тепе, покриващи около 120 000 м² (Popov and Jockenhövel, 2011). В процеса на проучване на археологическия обект са направени освен археологически изследвания, и множество интердисциплинарни изследвания като геоложки, геофизични, геоморфоложки опробвания, поленов анализ, С¹⁴-анализ, както и дистанционни (въздушно лазерно сканиране - ВЛС) и наземни геодезически измервания и др. (Попов и Ников, 2011) за изясняване на обхвата и технологията на древната рудодобивна дейност.

Настоящата работа е един първоначален опит за прилагане на магнитометрични изследвания за получаване на допълнителна информация за свойствата и закономерностите в магнитните свойства на различни материали, събрани в процеса на археологическите и геоморфоложки изследвания на Ада Тепе.

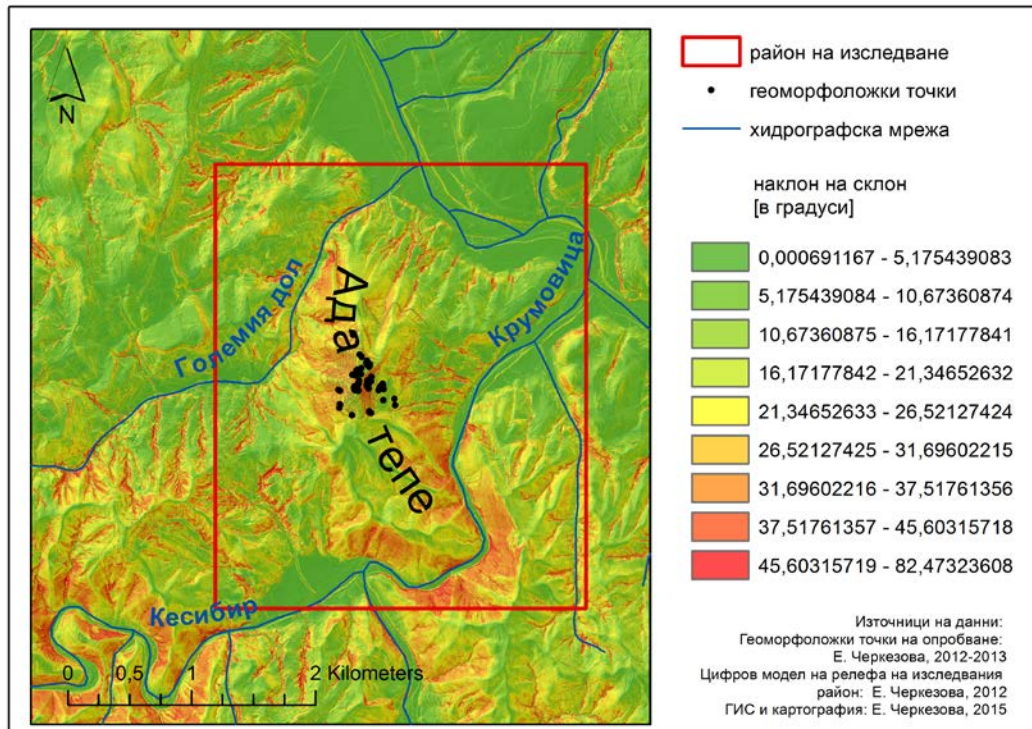
Желязото е един от основните химични елементи в земната кора и играе съществена роля за свойствата на скалите, седиментите, почвите и растителността. Желязото съществува в различни валентни форми (Fe^{2+} , Fe^{3+}) в условията на земната повърхност и това обуславя наличието му във вид на окиси, хидроокиси, филосиликатни съединения и т.н. (Dunlop and Ozdemir, 1997). Магнитните изследвания се използват за изучаване на поведението на окисите и хидроокисите на желязото, присъстващи в различни естествени материали – скали, почви, седименти, растителност. Установени са редица закономерности в образуването, физичните характеристики и поведението на Fe-съдържащите минерали в различните материали. Археоманетизмът е едно от най-старите направления в палеомагнетизма, базирайки се на магнитните свойства на горелите археологически останки. Магнитните частици, образувани в резултат на термичните трансформации на началните Fe-съдържащи компоненти имат много фини размери, като обикновено са в еднодомно ($d \sim 0.03 \mu\text{m}$) и/или суперпарамагнитно състояние ($0.01 \mu\text{m} < d < 0.03 \mu\text{m}$) (Dunlop and Ozdemir, 1997). Феримагнитните частици, образувани в резултат на горене имат значително по-дребни размери в сравнение с тези, образувани в процесите на изветряне на първичните минерали и на педогенеза (Oldfield and Platzman, 2007). Въз основа на тези и други специфични магнитни характеристики на желязо-съдържащите минерали в различните по вид останки може да се направи опит за тяхната независима идентификация и класификация, което е основната цел на проведеното изследване.

Район на изследване

Районът на изследване се намира между $41^\circ 24' 55.8''$ – $41^\circ 27' 41.184''$ сев. ширина и $25^\circ 37' 18.372''$ – $25^\circ 40' 45.0114''$ изт. дължина (Черкезова, 2012). Намира се в хипсометричен пояс между 209, 9 и 491 m по данни от генериран цифров модел на релефа с пространствена резолюция 1x1 m на базата на данни от въздушно лазерно сканиране (Фиг. 1). С изключение на билните части, които имат наклони от 0 до 5 градуса, районът на изследване се характеризира с високи стойности на наклона на склоновете (между 12 и над 25 градуса) (Фиг. 2).



Фиг. 1 Местоположение на района на изследване



Фиг. 2 Наклон на склоновете в градуси

Релефът на земната повърхност на изследвания район се характеризира със сложна геоложка и геоморфоложка обстановка. В геоложко отношение районът на Ада тепе попада в Източнородопската металогенна зона и принадлежи към находище „Хан Крум“ (Балтов и Дончев, 2012). Геоложките и структурно-тектонските изследвания в района показват наличие на епитермална златосъдържаща минерализация. Според Балтов и Дончев (2012) в тектонско отношение той попада в границите на Кесебирския метаморфен купол, при образуването на който се проявява Токачкия разлом на отделяне с посока С-СЗ и Ю-ЮИ и слаб наклон между 10-15 градуса на север. В резултат на движенията по този разлом според авторите се е образувала много сложна разломна система с различна вергентност като тези разломи са контролирали хидротермалната дейност.

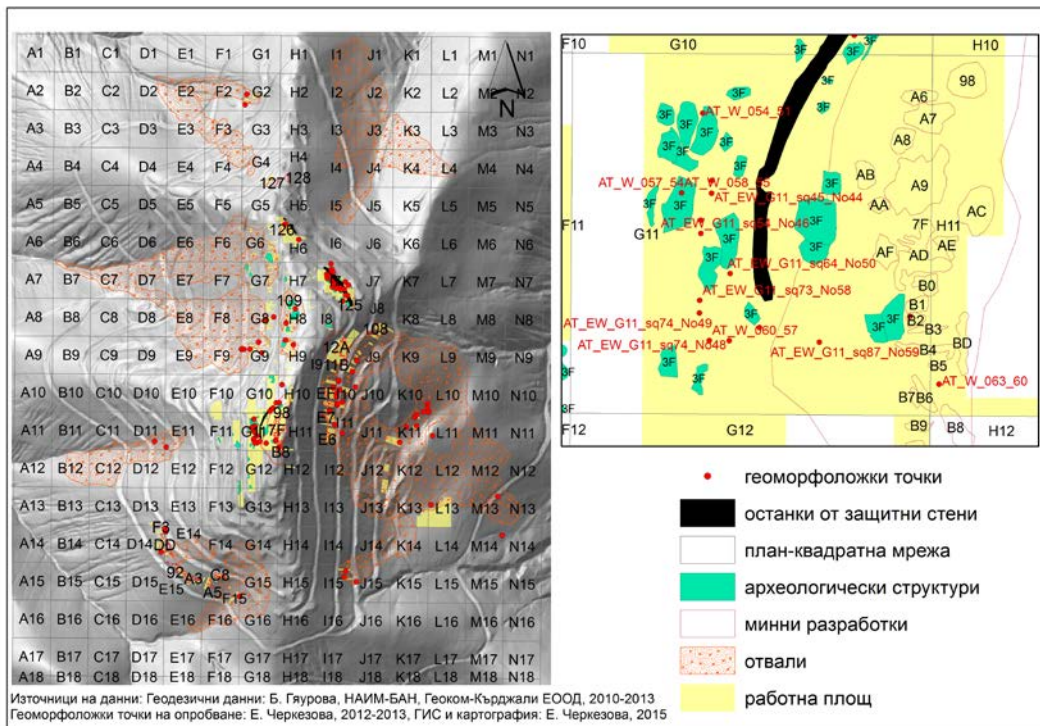
Находището на злато в участъка на Ада тепе се намира в маастрихтски-палеоценски наслаги на т.нар. Шаваровска формация на границата между седиментен комплекс и намиращ се под него метаморфен комплекс (Marchev et al. 2004, 63; Балтов и Дончев, 2012). Тази граница се определя от Токачкия разлом на отделяне. Находището в участъка на Ада тепе се състои от две рудни тела – долна част „Стената“ (добре обособено рудно тяло с лещовидна форма с дължина 350 м, ширина 150 м и дебелина 17 м от кварц-метасоматичен тип със средно съдържание на злато 7,3 гр/тон) и развита отгоре „Горна част“ (Балтов и Дончев 2012: 165). Под него е развит метаморфен комплекс. Според Балтов и Дончев (2012) тектонски тип глина, образувана на контакта на Кесебирския метаморфен купол и отгорележащите седименти по разлома на отделяне и приплъзване играе важна роля при последващи метасоматични и хидротермални процеси. Хидротермалната дейност според тези автори се характеризира с първи етап на безрудна метасоматична промяна от аргилитов тип, която замества и се налага върху скалите от горната част на фундамента (амфиболити и шисти), като на места хидротермите проникват през тях и се отлагат в грубокъсовите седименти. Около това рудно тяло в зоните на отделяне и приплъзване по-късно са образувани по-малки пластообразни тела, наситени със златна минерализация. При преминаване през гравийни и дребносъкови конгломерати се наблюдава интензивна силификация, а едрокъсовите брекчи се явяват по-неблагоприятни за златосъдържащите разтвори (Балтов и Дончев, 2012:166).

Обликът на съвременния релеф в изследвания район се определя в голяма степен от широко разпространените кватернерни наслаги и антропогенна натовареност вследствие на рудодобивна дейност. Кватернерните наслаги представляват изветрителна зона, покриваща лежащите по тях палеогенски и допалеозойски скали, представлявана от елувиални, делувиални, колувиални наслаги и почви (Черкезова, 2012). Стръмните склонове в района на изследване са една от предпоставките за образуване на сипеи както вследствие на естествени процеси, така и вследствие на антропогенна дейност.

Досегашните археологически проучвания показват, че рудодобивна дейност в района на изследване е имало още в началото на къснобронзовата епоха 15 в. пр. Хр. (Попов и Ников, 2011), характеризиращ се основно като отрит рудодобив в източните и западни склонове на Ада тепе (Tcherkezova et al., 2014: 211). Подземна рудодобивна дейност е открита единствено в западния склон на Ада тепе (Черкезова, 2012; Tcherkezova et al., 2014). Впоследствие рудодобивната дейност се разширява, което се доказва с разкрито селище в западния склон на Ада тепе (Попов и Ников, 2011; Tcherkezova et al. 2014, Abb. 2F: 211). Данните от абсолютно датирание (C^{14}) показват, че добивът на злато в участъка на Ада тепе е продължил непрекъснато от 15 до 11 в. пр. Хр., но постепенно се редуцира през ранната желязна епоха – 11-10 в. пр. Хр. (Tcherkezova et al., 2014: 212). Човешка дейност е регистрирана в периода 4 - 1 в. пр. Хр., доказана със съществуващо на върха на Ада тепе светилище (Попов и Ников, 2011; Popov and Jockenhövel 2011; Popov et al., 2014: 29).

Материали и методи

От 66 геоморфоложки точки са събрани 100 насипни проби, взети по време на теренни геоморфоложки изследвания в периода 2012-2013г. от изследваните археологически структури от Ада Тепе – останки от постройки, работни площадки и отвали с технологичен отпадък от древния рудодобивен и рудопереработвателен процес. На Фиг.3 е показано местоположението на опробваните структури и геоморфоложки точки.



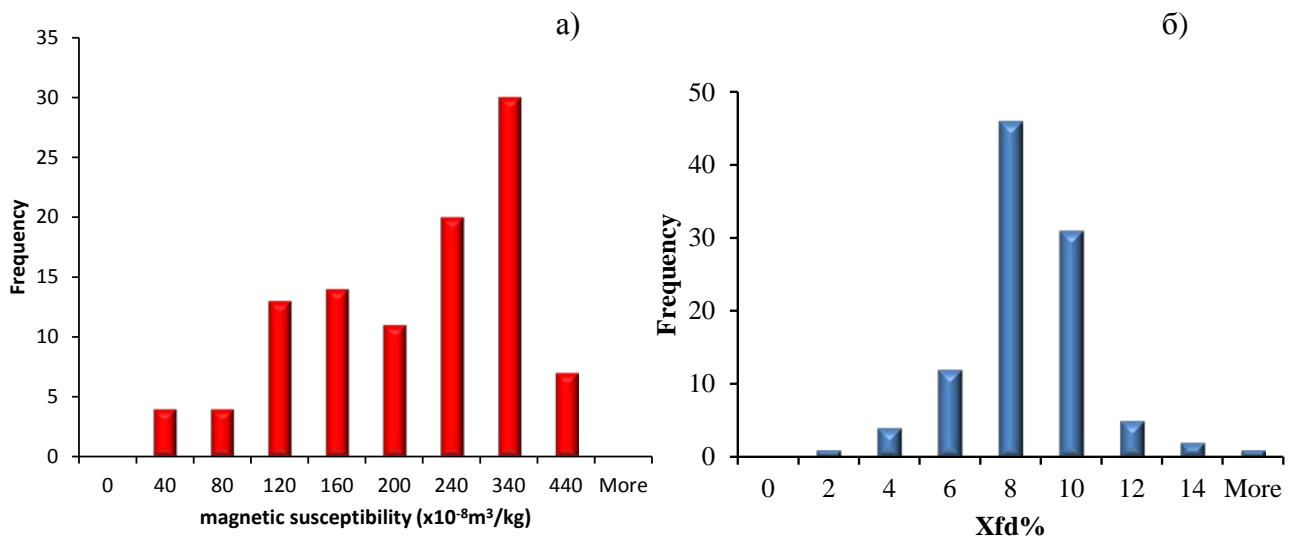
Фиг. 3. Ситуационен план на геоморфоложките точки и работната площ на спасителните археологически разкопки

В лабораторни условия материалът е изсушен, отделени са едрите скални късове, а останалият насипен материал е пресят през сито с размер на отвора 2мм. Тази фракция е използвана за магнитните измервания, проведени в Палеомагнитната Лаборатория на НИГГГ. Проведени са измервания на магнитната възприемчивост (X) като насипният материал е поставен в немагнитни контейнери с обем 10cm^3 и е използван капа-мост KLY-2 (AGICO Ltd., Czech Rep.). За същите проби са направени измервания на магнитната възприемчивост при приложено магнитно поле с ниска честота ($X_{LF} = 0.46\text{Hz}$), а след това с висока честота ($X_{HF} = 460\text{Hz}$) чрез капа-метър Bartington (Bartington Inc., UK), свързан със сензор MS2C. Изчислена е честотно-зависимата магнитна възприемчивост ($X_{fd} \% = (X_{LF} - X_{HF}) / X_{LF} * 100$), която отразява относителния принос на най-дребните (суперпарамагнитни) частици в общия ансамбъл магнитни частици.

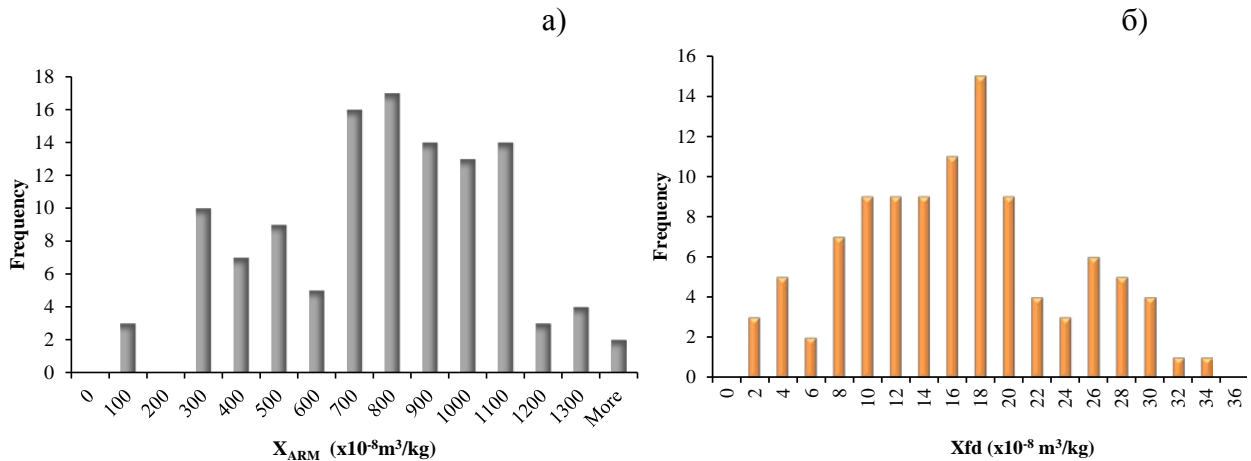
За измервания на лабораторно създадени остатъчни намагнитености са приготвени кубични образци чрез изливане в пластмасови контейнери с обем 10cm^3 на смес от гипс, 2гр. от пресетия материал от образците и вода. След изсъхване контейнерите-държачи са отстранени, а получените кубични образци са използвани за индуциране на безхистерезисна остатъчна намагнитеност (ARM), изотермична остатъчна намагнитеност (IRM) при приложено постоянно магнитно поле от 300mT, а след това - 1T. Намагнитеностите са измерени на ротационен магнитометър Minispin (Molspin Ltd., UK).

Резултати

На Фиг. 4 са показани хистограмите на разпределението на магнитната възприемчивост (X) и на $X_{fd}\%$. Магнитната възприемчивост на изследваните проби варира в широк интервал - между $(20-460) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, което показва силни различия в концентрацията на магнитните минерали. Друга особеност на полученото разпределение е наличието на три обособени групи проби – първата група се характеризира с ниски стойности на X в интервала $(20-80) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, втори максимум в разпределението се забелязва в интервала $(100-220) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, а пробите с най-високи стойности в X обособяват третата група – с X между $(240-440) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ (Фиг. 4а). В същото време другата характеристика – процентът честотно зависима магнитна възприемчивост ($X_{fd}\%$) се характеризира с нормално разпределение на стойностите с един максимум в честотата на разпределение в интервала $X_{fd}\% = 6-10\%$ (Фиг. 4б).



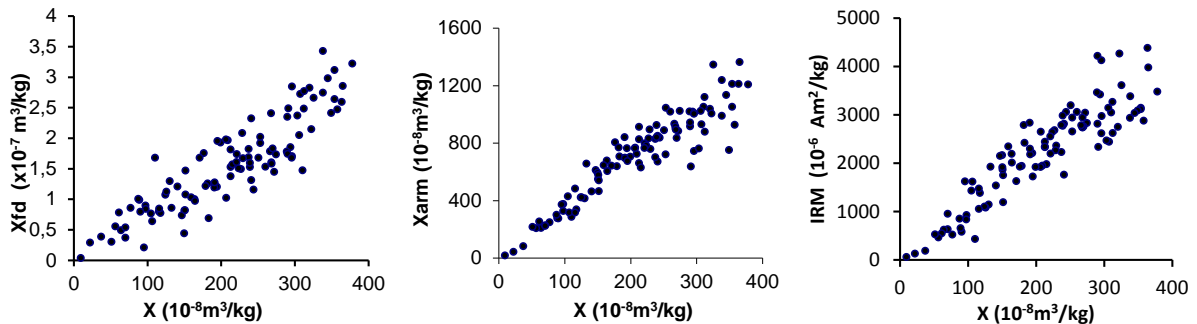
Фиг. 4. Хистограми на разпределението на магнитната възприемчивост (а) и на процентът честотно-зависима магнитна възприемчивост ($X_{fd}\%$) (б).



Фиг. 5. Хистограми на разпределението на безхистерезисната възприемчивост X_{ARM} (а) и на честотно-зависимата магнитна възприемчивост (X_{fd}) (б)

Параметрите X_{ARM} и X_{fd} , отразяващи съответно концентрацията на стабилни еднородни частици магнетит и на суб-микронни суперпарамагнитни частици (Walden et al, 1999) също така доказват наличието на три групи образци (Фиг. 5).

Хистограмите на разпределенията на основните магнитни характеристики – X , X_{fd} , X_{ARM} – показват присъствието на широк набор от размери магнитни частици – както с най-фини суперпарамагнитни и еднородни размери, така и с по-едри, многодомени. Този извод се потвърждава и от право пропорционалната зависимост между X и параметрите X_{fd} , ARM и IRM (Фиг. 6).

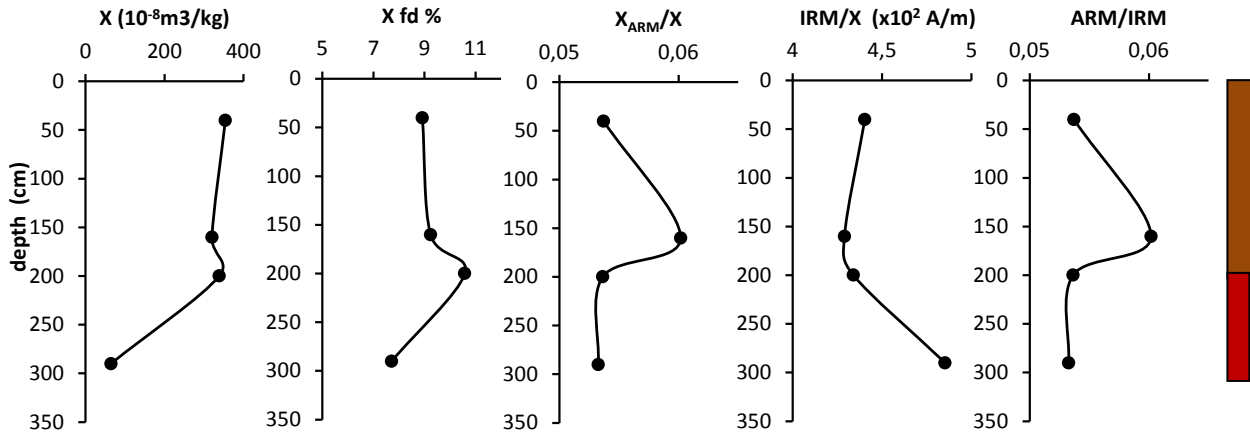


Фиг. 6. Зависимост на магнитната възприемчивост (X) от честотно-зависимата магнитна възприемчивост (X_{fd}), от безхистерезисната остатъчна намагнитеност (ARM) и от изотермичната остатъчна намагнитеност (IRM).

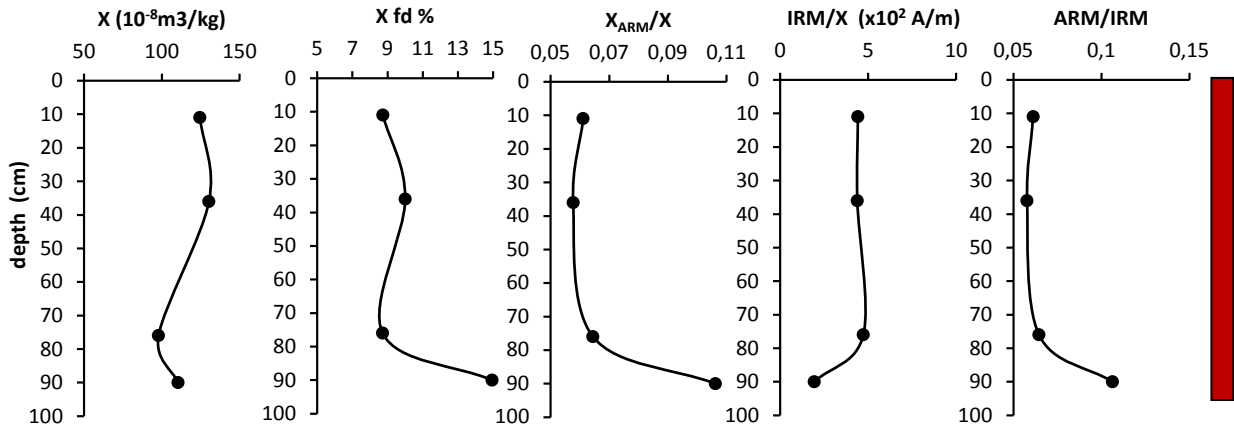
В част от геоморфоложките точки са взети проби от няколко дълбочини, обхващащи различни стратиграфски нива от обекта. На Фиг. 7 са показани получените магнитни резултати за три от изследваните профили, два от които се намират на източния склон, а третият – на югозападния склон. За отделните нива е определен и цвета на материала съгласно скалата на Мунсел за цвета на почвите. На Фиг. 7 символично са отбелязани и преобладаващите цветове на различните слоеве. Най-ярък контраст е регистриран в профила в т. №3, където най-дълбоките части са представени от стерилни наслаги с жълтеникав цвят. Магнитната възприемчивост в горните нива на профилите №65 и №3 е висока, докато за №14 е почти наполовина по-ниска (Фиг. 7).



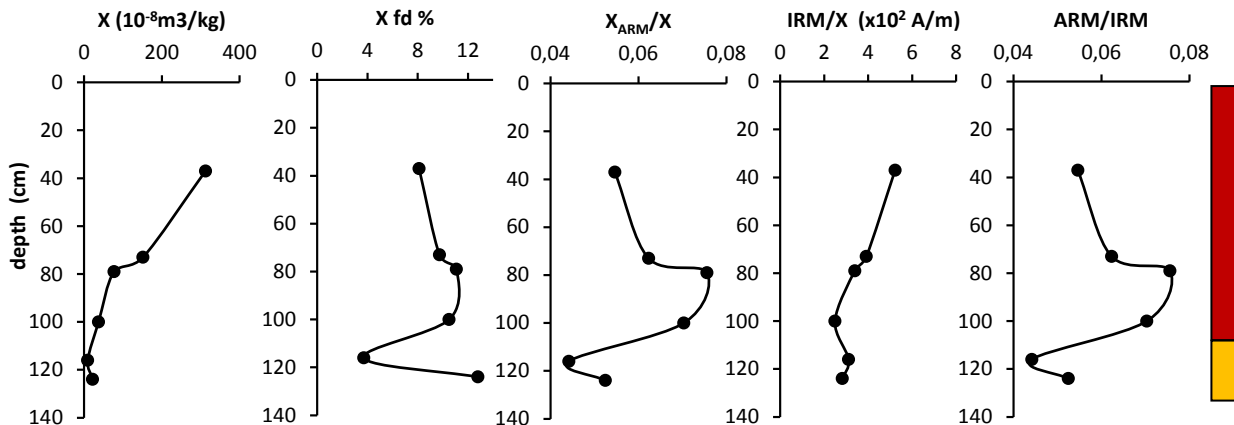
а) геоморфоложка точка № 65 (източен склон)



б) геоморфоложка точка № 14 (източен склон)



в) геоморфоложка точка № 3 (югозападен склон)



Фиг. 7. Вариации в дълбочина по три опробвани вертикални профила на набор от магнитни параметри и отношения – магнитна възприемчивост (X), процент честотно-зависима магнитна възприемчивост ($X_{fd} \%$), отношенията X_{arm}/X , IRM/X , ARM/IRM



И в трите профила, обаче, $X_{fd}\%$ е висок – около 9% в горните нива, предполагайки значително относително количество на фините суперпарамагнитни частици в общия комплекс от магнитни частици. Съдейки по вариациите на представените магнитни отношения за профила в т. 65 (Фиг. 7а), горните слоеве са обогатени със стабилни еднодоменни частици, докато в най-дълбокият слой доминира съдържанието на многодоменни частици, както може да се предположи от минимума в X , съчетан с максимум в отношението IRM/X (Фиг. 7а). Обратна ситуация се наблюдава за профила в т.14 (Фиг. 7б). Най-дълбокото ниво, характерно с увеличаване на X , $X_{fd}\%$, X_{arm}/X и ARM/IRM , а намаляване на отношението IRM/X говори за по-голямо съдържание на по-дребни, суперпарамагнитни и еднодоменни частици, докато горните слоеве се характеризират с по-голямо съдържание на едри MD частици. За профила в т. 3 (Фиг. 7в) горните слоеве до дълбочина около 75 см се характеризират с максимуми в X и IRM/X , както и високи $X_{fd}\%$, говорещо за преобладаващо съдържание на SP и MD фракции. Слойт 80-100см е обогатен с еднодоменни частици, както се вижда по изявения максимум в X_{arm}/X и ARM/IRM . Най-дълбокият жълтеникав слой има много ниска магнитна възприемчивост, поради което най-вероятно високата стойност на $X_{fd}\%$ не е реална, а се дължи на неточност при измерването. Тук и минералогията на съединенията на желязото е различна, както може да се предположи по контрастния цвят спрямо по-плитките нива.

Показаните резултати за изследваните профили демонстрират чувствителността на магнитните параметри на материалите към минимални промени в концентрацията и размера на силно магнитните окиси на желязото.

Съгласно получените до момента археологически данни, характера и продължителността на древната рудодобивна и преработвателна дейност е била различна в различните части на Ада Тепе (Popov and Jockenhövel, 2011; Попов и Ников, 2012; Tcherkezova et al. 2014). Вземайки предвид това, получените магнитни данни бяха систематизирани според: 1) типа материал (наслаги, отвал, културен пласт) и 2) местоположение по склоновете на обекта (N, NE, W, SW). Получените средни стойности за основните магнитни параметри са представени в Таблица 1. В първата колона са отбелязани номерата на точките, включени в съответната група образци, за които е дадена средната стойност. В случаите, когато пробите от E и NE склонове показват съществено различни стойности на магнитните параметри, те са отделени в различни групи, като напр. за отвалите и за материала от културните слоеве. Основните закономерности в данните, наблюдавани в Таблица 1, могат да се обобщат в следното: а) наслагите с жълтеникав цвят, в които по правило липсват останки от човешка дейност и се считат за стерилни пластове, показват най-ниски стойности на магнитните параметри, зависещи от концентрацията на железните окиси – X , χ_{ARM} , IRM . Средната магнитна възприемчивост за наслагите от източния и запад-югозападните склонове са много близки (Табл.1), както и останалите характеристики. Наслагите от археологически пластове имат по-силна магнитна възприемчивост в сравнение с тях. За пробите от отвали от източния склон се наблюдава разделяне на характеристиките в две групи – с ниска магнитна възприемчивост (проби с номера 41, 42, 92, 93) и с висока магнитна възприемчивост (проби с номера 65, 77, 78), като няма систематична зависимост от дълбочината, от която е взета пробата (Табл.1). Материалът от отвалите от N- NE склонове има висока магнитна възприемчивост, сходна с тази от групата с високо X от източния склон. Образците от отвалите от западния склон имат по-ниска магнитна възприемчивост, подобна на тази за номера 41, 42, 92, 93 (Табл.1). Същите взаимовръзки се наблюдават и за другите характеристики за горните проби.

Образците от почви от културни пластове от различните склонове показват сходни магнитни характеристики (Табл.1), характеризиращи се със силно магнитно обогатяване в сравнение с наслагите. Изключение прави групата почви, включваща номера 13, 14, 15, 16, 50, 69, 90 (Табл.1).

За пробите от локалитети, които не са включени в Табл.1, не бе известно със сигурност от какъв вид материал са взети. За тях на базата на получените зависимости в Табл.1, бе направен опит за класификация според техните магнитни характеристики. В Таблица 2 са показани номерата на опробваните точки, съответните им магнитни характеристики и в последната колона е направената класификация според тези характеристики. При определянето на вида на материала са взети под внимание стойностите на магнитните параметри – X , X_{arm} , IRM и изчислените отношения, като са съпоставени с получените средни стойности за



материалите от съответните склонове (Табл.1). Както се вижда, магнитните свойства може успешно да се приложат като класификационен признак за различните материали от Ада Тепе.

ID (геоморф. точка №)	склон	Depth [cm]	χ_{ARM}	χ_{ARM}/χ	IRM	ARM/IRM	χ	IRM/ χ	Вид на материала
41, 42, 50	E	73-128	492,1	4,40	1512,9	0,057	108,3	6,43	наслаги жълтеникави
63,95,96	NE	12-73	902,9	3,65	2756,0	0,053	248,9	5,53	археол. структ
3,5,10,81,100	W, SW	10-124	355,3	2,94	967,2	0,060	109,6	3,93	наслаги
65,77,78	E	10-260	1084,8	3,26	2995,3	0,058	333,0	4,50	отвал
41,42,92,93	E	24-125	609,3	4,18	2031,8	0,048	145,5	7,14	отвал
62,64,84,85	N, NE	22-51	925,6	3,78	2988,7	0,049	245,0	6,15	отвал
66,67,68,71,74, 101	W	20-65	656,2	3,61	2174,8	0,048	183,3	5,99	отвал
13,14,15,16,50, 69,90	E	5-145	516,8	3,6	1587,4	0,058	141,9	5,33	почва от културен пласт
87,88,89,97,98, 99	N, NE	35-60	956,4	3,5	3388,5	0,046	277,3	6,08	почва от културен пласт
1,2,3,7,8,11,102	SW	9-53	1096,2	3,7	3184,4	0,056	294,9	5,36	почва от археол. слой
51,53,54,56,58, 60,68,69,73	W	15-100	736,7	3,0	2536,6	0,049	251,9	5,05	почва от културен пласт

Таблица 1. Средни стойности на основните магнитни параметри за пробите от различни материали, групирани според положението им по склоновете на Ада Тепе. Безхистерезисна възприемчивост χ_{ARM} ($\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$), отношението χ_{ARM}/χ , изотермична остатъчна намагнитеност IRM ($\times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$), отношението ARM/IRM, магнитна възприемчивост χ ($\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$), отношението IRM/ χ ($\times 10^2 \text{ A/m}$).

Дискусия

Изследванията на магнитната възприемчивост на различни материали от археологически обекти е високо чувствителен метод за определяне на степента на влияние на човешката дейност (в повечето случаи въздействието на огъня) и характера на въздействието (Tite, 1972; Gedye et al., 2000; Oldfield and Crowther, 2007; Church et al., 2007; Linford and Platzman, 2004). Степента на обогатяване на магнитната възприемчивост на засегнати от обгаряне обекти зависи от наличното количество желязни йони в различните минерали, съставлящи почвата и коренната скала в определения локалитет. Естествените педогенни (хидро)окиси на желязото се образуват при типични за повърхността на Земята условия, поради което са подложени на термични трансформации при въздействие на по-високи температури. Продукт от тези трансформации най-често е магнитният минерал магхемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), който възниква при фазовите трансформации на хидроокисите гьотит, лепидокрокит, ферихидрит в присъствието на органично вещество (Cornell and Schwertmann, 2003; Hanesch et al., 2006). Значителното (десетократно) магнитно обогатяване на материалите от археологическите нива (почви) от Ада Тепе спрямо стерилните наслаги (Табл.1) говори, че и в този случай основният магнитен минерал е от магнетитов тип, най-вероятно магхемит. Това се потвърждава и от получените стойности на отношението $S = \text{IRM}300\text{mT}/\text{IRM}1\text{T}$ (данните не са показани в настоящата статия), близки до 1, което означава, че материалите достигат магнитно насищане в



слаби полета (до 300mT) и практически липсва висококоерцитивен минерал (гьотит, хематит) (Thompson and Oldfield, 1986). Тези заключения се подкрепят и от проведените от Ajdanlijsky et al. (2008) минералогични анализи на тежката минерална фракция от седименти и керамика от светилицето на билото на Ада Тепе. Авторите установяват наличие основно на магнетитови (детритни) зърна с различна степен на окисление и разлагане, както и хематит и пирит.

ID (геоморф. точка №)	СКЛОН	Depth [cm]	χ_{ARM}	χ_{ARM}/χ	IRM	ARM /IRM	χ	IRM/ χ	Класификация по магнитни характеристики
83	W	13	223,4	3,3	633,0	0,06	68,4	4,6	наслаги
59	W	65	300,6	3,3	851,2	0,06	90,1	4,7	наслаги
80	W	40	226,2	2,0	949,0	0,04	113,4	4,2	наслаги
82	W	40	338,3	3,0	1383,8	0,04	114,0	6,1	наслаги
57	W	75	422,2	3,4	1078,0	0,06	123,5	4,4	наслаги
76	W	30	539,5	3,6	1751,7	0,05	148,2	5,9	отвал
9	SW	83	641,9	3,8	1628,5	0,06	169,9	4,8	отвал
91	E	75	764,6	4,0	2208,4	0,06	189,5	5,8	отвал
55	W	78	673,6	3,5	1723,3	0,06	195,0	4,4	отвал
60	W	55	629,8	3,0	1978,8	0,05	212,2	4,7	отвал
75	W	12	765,0	3,5	2553,9	0,05	217,8	5,9	отвал
61	W	13	895,0	4,0	2262,5	0,06	226,5	5,0	отвал
52	W	56	671,3	2,8	1760,3	0,06	238,4	3,7	отвал
70	W	42	893,0	3,4	2737,9	0,05	262,4	5,2	почва от културен пласт
86	N	55	1023,2	3,8	2827,0	0,06	269,6	5,2	почва от културен пласт
88	N	30	1019,3	3,6	3460,7	0,05	282,2	6,1	почва от културен пласт
79	E	60	1051,7	3,5	3045,6	0,05	300,1	5,1	почва от културен пласт
52	W	38	877,7	2,8	2623,0	0,05	308,4	4,3	почва от културен пласт
6	SW	9	927,0	2,7	2878,7	0,05	347,4	4,1	почва от културен пласт
52	W	22	1206,9	3,2	3474,9	0,06	374,9	4,6	почва от културен пласт

Таблица 2. Класификация на материалите според получените магнитни характеристики за точки, където не е направена еднозначна идентификация на вида им. Означенията са както в Табл. 1.

В настоящето изследване се обособяват три основни групи материали според техните магнитни характеристики (Фиг. 4-6), което много добре съвпада с трите основни вида опробвани структури – стерилни наслаги, отвали и почви/археологически материали. Магнитните характеристики на отделните слоеве също служат за разграничаване на промени в състава и/или минералогията им (Фиг. 7). Най-силното магнитно обогатяване на образците от почви от археологически слоеве говори за най-интензивно влияние на различни и многобройни процеси на опалване. Отвалите, свързани с отпадъчните продукти от добива и обработката на златната руда, също имат относително завишени магнитни свойства спрямо стерилните пластове (Табл. 1), което служи за основа на разграничаването им в обекта. В отделни локалитети от източните и североизточните склонове, обаче, се наблюдава също силно завишена магнитна възприемчивост на материалите от отвали, достигащи стойности, дори по-високи от тези за почвите (Табл. 1). Поради това, може да се изкаже преположението, че в тези локалитети е



вероятно използването на огън в процеса на древен рудодобив. Фактът, че в източните и североизточни склонове на Ада Тепе се разграничават две групи материали от отвали (Табл.1) – с висока и ниска магнитна възприемчивост, е в подкрепа на установените в процеса на археологическите проучвания поне два етапа в древния рудодобив (Popov and Jockenhövel, 2011; Попов и Ников, 2012). Свързването на установените две групи магнитни характеристики на отвалите от тази част с конкретните археологически етапи, обаче, изискват по-детайлни изследвания в бъдеще.

Заклучение

Проведените пилотни изследвания на магнитните свойства на различни материали от геоморфоложки обвързани точки от Ада Тепе показва потенциала на този подход за бързо, ефективно и точно класифициране и идентифициране на основните типове материали. Концентрацията на силномагнитните минерали магнетит/магхемит, образувани в процеса на човешкото въздействие, е прецизен индикатор за степента на промяна на изходния материал.

Благодарности

Магнитните изследвания в работата са направени с частичната финансова подкрепа на договор ДФНИ К02/13 към ФНИ на тема „Огънят в древността, регистриран в археологическите останки и почвите – магнитни изследвания в полза на археологията и почвознанието”.

Литература

- Балтов, И., Дончев, И.Й. 2012. Георесурси и технологии за преработка на златни и златосъдържащи руди в България. 2012. София, Изд. „Геология и минерални ресурси“, 298 с.
- Попов, Х. и Ников, Кр., 2012. Спасително археологическо проучване на Ада Тепе, община Крумовград. Цели, методи на работа, резултати и перспективи. Материали за професионално обсъждане. 4-6 ноември, 2012. Крумовград, Кърджали, 1-93.
- Черкезова, Е. 2013. Разномасщабна класификация на Ада тепе и водосборния басейн на река Крумовица (Източни Родопи). - Проблеми на географията, БАН, кн. 1-2. 105-116.
- Черкезова, Е. 2012. Морфографска класификация на водосборните басейни на реките Арда, Върбица, и Крумовица (Източни Родопи) чрез метода на размита логина. -Проблеми на географията, БАН, кн. 3-4. 101-111.
- Ajdanlijsky, G., Nehrizov, G., Ilieva, E., Zlatanov, D., 2008. Mineralogical peculiarities of the heavy mineral fraction from sherds and sediments from the archaeological site “Ada Tepe”, Kroumovgrad district. *Geoarchaeology and Archaeomineralogy* (Eds. R. I. Kostov, B. Gaydarska, M. Gurova). 2008. Proceedings of the International Conference, 29-30 October 2008 Sofia, Publishing House “St. Ivan Rilski”, Sofia, 83-92.
- Church, M.J., Peters C., Batt C.M., 2007. Sourcing Fire Ash on Archaeological Sites in the Western and Northern Isles of Scotland, Using Mineral Magnetism. *Geoarchaeology: An International Journal*, Vol. 22, No. 7, 747–774.
- Cornell, R.M., & Schwertmann, U., 2003. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. Wiley, New York.
- Dunlop, D. & Ozdemir, O., 1997. *Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers*, Cambridge Studies in Magnetism, Cambridge University Press, 291.
- Gedye S.J., Jones R.T., Tinner W. , Ammann B., Oldfield F., 2000. The use of mineral magnetism in the reconstruction of fire history: a case study from Lago di Origlio, Swiss Alps. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164, 101–110
- Hanesch, M., Stanjek, H., Petersen, N., 2006. Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon. *Geophys.J.Intern.*, 165, 53-61.
- Linford N., Platzman E., 2004. Estimating the approximate firing temperature of burnt archaeological sediments through an unmixing algorithm applied to hysteresis data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 147, 197–207.
- Marchev, P., Singer, B.S. Jelev, D. Hasson, S., Moritz, R. Bonev, N. 2004. The Ada Tepe deposit: a sediment hosted, detachment fault-controlled, low-sulfidation gold deposit in the Eastern



- Rhodopes, SE Bulgaria. -Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 84, 59–78.
- Oldfield F., Crowther J., 2007. Establishing fire incidence in temperate soils using magnetic measurements. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 249, 362–369.
- Popov H. and Jockenhövel A., 2010. At the Northern Borders of the Mycenaean World: Thracian Gold Mining From the Late Bronze and the Early Iron Age at Ada Tepe in the Eastern Rhodopes. *Anodos. Studies of the Ancient World* 10/2010, (Proceedings of the International Conference THE PHENOMENA OF CULTURAL BORDERS AND BORDER CULTURES ACROSS THE PASSAGE OF TIME), 265-281.
- Popov, H., Tsinsonov, Z., Georgiev, P. 2014. Feuersetzen beim Abbau der goldhaltigen Quarzgänge im spätbronzezeitlichen Goldbergwerk auf dem Ada Tepe, Südbulgarien. -Experimentelle Archäologie in Europa – Bilanz 2014, Kategorie: Experiment und Versuch, 27-44.
- Popov, H., Jockenhövel, A., Tsinsonov, Z., Iliev, S. 2011. Montanarchäologische Forschungen in den Strhodopen, Südbulgarien. -In. Nikolov, V., Bachvarov, K., Popov, H. Interdisziplinäre Forschungen zum Kulturerbe auf der Balkanhalbinsel."Nice-AN" EOOD, Sofia, 253-290.
- Tcherkezova, E., Popov, H., Jockenhövel, A. 2014. LiDAR-Daten zur Unterstützung der montanarchäologischen Untersuchungen am spätbronzezeitlichen Goldbergwerk Ada Tepe (Stadt Krumovgrad, Rhodopen/Südostbulgarien). -In. Smolnik, R. [Hrsg.]. *ArcheoMontan-2013. Krusna krajina. Erzgebirgslandschaft – Ore Landscape. Arbeits- und Forschungsberichte zur sächsischen Bodenmerkmalepflege. Beiheft 28, Landesamt für Archäologie Dresden 2014, 209-221.*
- Thompson R. and Oldfield, F., 1986. *Environmental Magnetism*. Allen&Unwin Ltd. UK
- Tite, M., 1972. The influence of geology on the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites. *Archaeometry* 14 (2), 229–236.
- Walde, J., Oldfield, F., Smith, J. (eds.), 1999. *Environmental magnetism: a practical guide*. Technical Guide, No6, Quaternary Research Association, London.
- Zboril, R., Mashlan M., Petridis D., 2002. Iron(III) Oxides from Thermal Processes Synthesis, Structural and Magnetic Properties, Mössbauer Spectroscopy Characterization, and Applications. *Chem. Mater.*, 14, 969-982.