



**НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА,
ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ
БАН**

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ
за получаване на научната степен „доктор на науките”
професионално направление 4.4. “Науки за Земята”
(“Земен магнетизъм и гравиметрия”)

на
проф. д-р Диана Василева Йорданова

***Тема: Магнетизмът на льоса в България – палеоархив на
климата през плейстоцена***

София, 2025 г.

Дисертационната работа съдържа 364 страници, от които 27 стр. списък на цитираната литература. Включва **173** фигури и **10** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съвпадат с тези в дисертацията. Библиографията обхваща 604 заглавия.

Изследванията, представени в дисертационния труд са проведени основно в Палеомагнитната лаборатория към секция “Земен магнетизъм” от Департамент “Геофизика”, както и в редица чуждестранни лаборатории.

Дисертационната работа е обсъдена и насочена за защита от разширен семинар на Департамент “Геофизика” към НИГГТ – БАН, проведен на 21.05.2025г.

Изказвам своята искрена благодарност на колегите от Палеомагнитната лаборатория за позитивната и колегиална атмосфера, както и за помощта на младите колеги (Петър Петров, Даниел Ишлямски, Божурка Георгиева) и техническия сътрудник Росица Михайлова за провеждането на многобройните магнитни измервания. Благодаря на проф. д-н. Йордан Евлогиев за ползотворното сътрудничество и дискусии върху стратиграфията на льоса в България. Специално признание дължа на чл. кор. проф. Даниела (Нели) Йорданова за съдействието, споровете и съветите през всичките години на съвместна работа. Безрезервната подкрепа на семейството ми позволи завършването и оформянето на дисертационния труд в относително кратки срокове.

Възможността за осъществяване на активно международно сътрудничество и съвместни изследвания с колеги, работещи върху льоса в Европа като Prof. France Lagroix (IPGP, Paris, France), Prof. Pierre Antoine (CNRS-Univ. Paris 1-UPEC, France), Prof. Sophie Cornu (Aix Marseille Univ, INRAE, Aix en Provence, France), Prof. Sanda Balescu (Université de Lille, France) позволиха приложението и използването на най-модерните и съвременни методи и достъпа до уникална научна инфраструктура за изследванията на льоса в България.

Цел на дисертационния труд:

Целта на дисертационния труд е да се направи реконструкция на палеоклиматичните условия през глациалния плейстоцен за територията на Северна България чрез обобщаване и анализ на магнитните свойства на представителни разрези на лъсово – почвени отложения.

За постигане на основната цел на изследването са решени следните специфични задачи:

- 1) Прецизиране на хроностратиграфията на лъсово – почвените последователности чрез нови данни за възрастта на реперни нива от разрезите;
- 2) Анализ на ефекта от различните условия на еолична седиментация, при които може да протича почвообразуването през интерглациалните епохи (с или без отлагане на прахов материал) върху формирането на магнитния сигнал в дълбочина по почвените профили;
- 3) Получаване на нови данни за геохимичния състав на лъсови и почвени проби от изследваните профили за оценка на основните източници на материал в различните локалитети и степента му на изветряне. Тази информация е от съществено значение за отделяне на ефекта от разлики в минералогията на детритния материал от различни източници, от различна степен на вторично магнитно обогатяване на палеопочвите в резултат на климатични изменения.
- 4) Получаване на детайлни записи на измененията на основните магнитни параметри в дълбочина по изследваните лъсово – почвени профили и отделяне на педогенния сигнал;
- 5) Построяване на времеви модел за всеки профил чрез корелация на измененията в дълбочина на магнитната възприемчивост с добре датиран глобален запис на палеоклиматичните изменения за последните 800 хил.г.;
- 6) Реконструкция на палеоклиматичните условия през глациалния плейстоцен за територията на Северна България и анализ на получените резултати в регионален и глобален контекст.

Актуалност на изследванията

Получаването на детайлни записи на климатичните промени за глациалния плейстоцен в глобален и регионален мащаб е от първостепенно значение за изграждане на достоверни модели на измененията на климата в близкото и далечното бъдеще. Инструменталните записи на измененията в климатичните фактори (средногодишна температура и валежи) са относително кратки и не позволяват да се вземат пред вид дългопериодичните колебания с характерни времена от порядъка на десетки до стотици хиляди години, каквито са периодите във вариациите на астрономическите параметри (ексцентрицитет на земната орбита, прецесия и наклон на оста на Земята) (Ruddiman, 2006; Maslin and Brierley, 2015), определящи смяната на топли (интерглациални) и студени (глациални) епохи. Опростените модели на климата, разглеждащи влиянието на

количеството на парниковите газове, обикновено предполагат наличието на квази-линейно поведение на климатичната система. Това е в противоречие с наблюдаваните резки изменения в палеоклимата на фона на постепенните промени във външните движещи фактори (Overpeck et al., 2006). Резките промени в палеоклимата обикновено са съпроводени от изменения в състава на атмосферата, включително на количеството парникови газове (въглероден двуокис, метан, азотен двуокис) и аерозоли (прах, неорганичен въглерод). Това от своя страна е пряко свързано с функционирането на биосферата и педосферата на сушата, както и със значими изменения в биохимията на световния океан (Ridgwell, 2002; Archer et al., 2004; Smith Jr. et al., 2009). Въпреки постигнатия напредък в изясняване на връзката между земната повърхност и атмосферата в контекста на планетарните процеси и явления (Sun et al., 2015), получаването на достовърни мултидисциплинарни записи на климатичните промени в миналото е от голямо значение за изграждане на прецизни модели за бъдещото развитие на тези взаимодействия и дефиниране на необходимите мерки за постигане на устойчивост и приспособимост към глобалните промени. Това изисква задълбочаване на знанията относно пространствените и времеви изменения в климата както в регионален, така и в глобален мащаб.

Лъсовите седименти имат еоличен произход и са едни от най-широко разпространените кватернерни отложения на сушата с квази – непрекъсната седиментация. Формирането им е пряко свързано с планетарните изменения на климата през плейстоцена и редуването на глациални и интерглациални епохи (Maher, 2016). Поради това измененията в свойствата на лъсово – почвените профили представляват ценен архив на историята на климата в геоложкото минало.

Структура на дисертацията

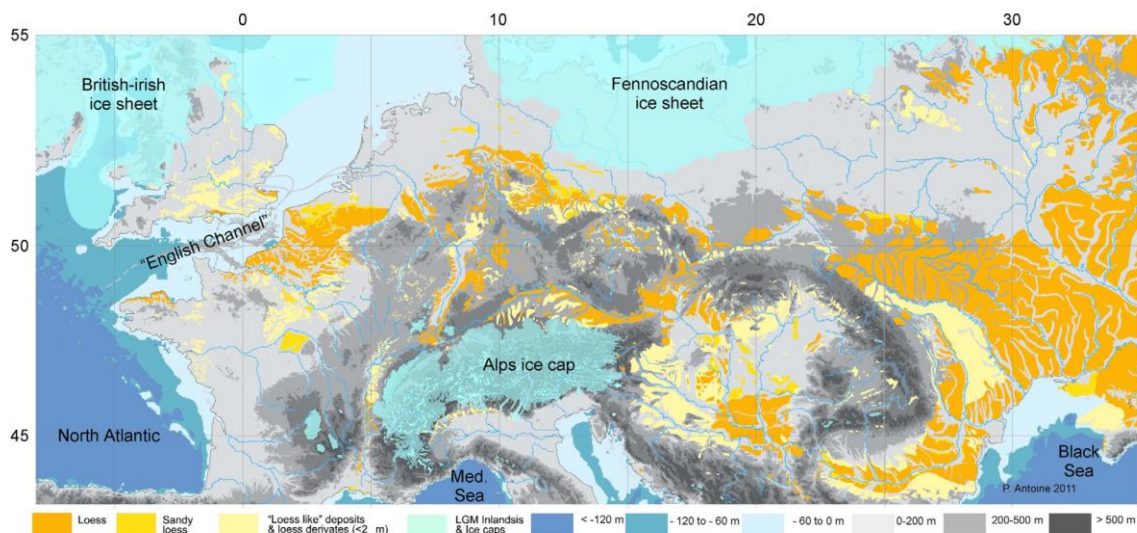
Дисертационният труд се състои от увод, единадесет глави, приноси и списък на цитираната литература. В **Увода** са дефинирани целите и задачите, поставени в изследването. Представена е накратко актуалността на проблематиката и ролята ѝ за борбата с климатичните промени и устойчивото развитие.

В **Глава 1 “Формиране и основни характеристики на лъсовата покривка в Европа и България – състояние и актуалност на проблема”** са представени накратко механизмите за формиране на лъсово – почвените последователности в зависимост от източника на еоличен материал.

Формирането на лъоса като седимент включва пет главни етапа: 1) образуване на дребни прахови частици чрез механично изветряне и ерозия на скалите; 2) емисия на алевритовата (прахова) фракция (под въздействието на вятъра); 3) транспорт; 4) отлагане и 5) акумулация / лъосификация (Crouvi et al., 2024). Механичният състав на лъсовите седименти е представен главно от фракцията с размери на зърната (2 – 63 микрона). Минералогията се доминира от кварца, който представлява около 50 – 70% от общия

минерален състав. Другите главни минерални компоненти са фелдшпатите (5 – 30%), слюдите (5 – 10%), карбонатите (0 – 30%) и глинестите минерали (10 – 15%) (Руе, 1987).

Лъсовата покривка в Европа е разположена на юг от Феноскандинавския леден щит и Алпийските ледници (Фиг. 1.2). Обширни площи от Източна Европа, Долно- и Средно- Дунавската област, Западна Европа и Южна Англия също са заети от лъсовата покривка.



Фиг. 1.2. Схема на разпространението на лъсовите седименти в Европа. Източник: Crouvi et al. (2024).

Класическият модел на формиране на т. нар. „гласиален лъос“, разглежда формирането на прахов ситнозем като резултат от процесите на механично изветряне (гласиално „смилање“) на скалите в гласиалните области и последващо отлагане на материала във формираните гласиални канали пред ледниците. Този материал е достъпен за еоличен транспорт при понижаване на водното ниво. Увлечените от вятъра частици се отлагат в перигласиалните области, където се формират лъсови седименти. С настъпване на затопляне на климата през интергласиалните епохи на плейстоцена, ледниците се отдръпват на север и съответно силно намалява или спира формирането на прахов материал, който може да се транспортира от вятъра и отлага под формата на лъос. Под въздействие на повишаването на температурата и валежите, в растителната покривка започват да доминират дървесни видове и се формират добре развити почви. Тези почви се затрупват от лъсов материал при последвалата гласиална епоха. Така те се регистрират като „палеопочви“ в седиментния лъсов разрез.

Глобалните цикли на изменение на климата през геоложката история на Земята се обуславят от изменението в астрономическите параметри на земната орбита (прецесия и наклон на оста на въртене на Земята, и ексцентрицитет на земната орбита на движение около Слънцето). Астрономическата теория за обяснение на цикличността на залежаванията през кватернера е предложена от Миланкович в началото на 20^{ти} век (Milanković, 1941). Изменението в астрономическите параметри се отразява основно върху разпределението на инсолацията в горната част на атмосферата, което води до сезонните климатични вариации и изменението на климата с географската ширина. В

същото време, някои важни особености в глобалните записи на палеоклимата за кватернера, като например смяната на доминиращата цикличност от 41 хил.г. на 100 хил.г. преди около 1 млн.г., заедно с увеличаването на амплитудата и асиметрията на глациалните цикли, не могат да бъдат обяснени от класическата теория на Миланкович. Съвременните модели разглеждат също и ролята на големината и еволюцията на континенталните ледници върху изменението на климата (Ganopolski, 2024).

Във втората част от Глава 1 е представена накратко информацията относно площното разпространение, дебелината и стратиграфията на льосовите последователности в Северна България съгласно досегашните изследвания. Авторът на дисертационния труд се базира главно на детайлния анализ и описание на еоличните наслаги в Северна България (площно разпространение, граници, изменения в зърнометричния състав, литофациални разновидности и стратиграфия) в публикациите на проф. д.г.н. Йордан Евлогиев и монографиите му „Плейстоценът и холоценът в Дунавската равнина“ (2005г.) и „Кватернерна геология и геоморфология на Дунавската равнина“ (2019 г).

Концептуален модел за формирането и еволюцията на седиментационния басейн на Долния Дунав през глациалния плейстоцен е представен в работата на Јира (2014) въз основа на наличните данни от изследванията на льоса в България, Румъния, Молдова и Украйна. Установени са следните основни закономерности:

- най-едрозърнестите и дебели льосови наслаги са разположени в тясна ивица, следваща непосредствено съвременното течение на р. Дунав.
- Встрани от течението на р. Дунав (в северна и южна посока) средният механичен размер на льосовия ситнозем и дебелината на льосовите хоризонти постепенно и закономерно намаляват.
- Северната и южната периферии на льосовата област са заети от льосовидни седименти с високо глинесто съдържание и малка дебелина.

Тези закономерности, наблюдавани в льосовата покривка на българския дял на Долнодунавската равнина, са подробно систематизирани, описани и анализирани в работите на Евлогиев (2005; 2019) и Evlogiev (2007). Те утвърждават хипотезата, че основен източник на еоличен материал за формиране на Долнодунавския льос е алувия на реката, както и алувия на главните притоци на р. Дунав в областта.

Началото на льосонатрупването в Северна България става върху различни палеогеоморфоложки форми. Най-старата (Плиоценската денудационна заравненост, PDS) е оформена през плиоцена по протежение на бреговата част на Дакийския басейн. Другата форма, заемаща терени с по-ниски надморски височини е Старото плейстоценско ниво (OPL). В СЗ България то е врязано в романски, сарматски и горно кредни седименти, а в Централна Северна България цокълът е всечен в кредни мергели, глинени, пясъчници и варовици и в романски седименти. В СИ България OPL е ерозионно и ерозионно – акумулативно (Евлогиев, 2019). То е оформено преди около 2.59 млн.г. Върху речните тераси на р. Дунав (Т₆ до Т₁) също са акумулирани льосови седименти с различен брой льосови и палеопочвени хоризонти. Броят на льосовите хоризонти в

наслагите върху дадена речна тераса съответстват на броя застудявания, които е преживяла дадената геоморфоложка форма (Евлогиев, 2005).

В Глава 2 “Основни принципи на магнетизма на льосово - почвените седименти” се разглеждат основните понятия и теории от магнетизма на естествените материали. Поради окислителните условия на земната повърхност, желязото в изветрителните продукти е представено от окиси на желязото. Те са изключително чувствителни към променящите се условия на околната среда (температура, влажност, рН, редукционен потенциал и др.) (Cornell and Schwertmann, 2003). Поради това магнитните им свойства отразяват характеристиките на средата и нейните промени във времето и пространството.

Всички естествени материали притежават някакъв тип магнитни свойства при поставянето им във външно магнитно поле. Съгласно този критерий те най-общо се разделят на диамагнитни-, парамагнитни- и феро(и)магнитни. Диамагнетизмът е свойство на всички материали и се характеризира със спонтанна намагнитеност с обратна посока спрямо посоката на индуциращото външно магнитно поле. Парамагнитните минерали са друга група вещества, които във външно магнитно поле придобиват спонтанна намагнитеност с посока, успоредна на посоката на индуциращото поле. Спонтанните намагнитености при диа- и парамагнетичите изчезват при премахване на индуциращото магнитно поле. Третата група материали, която всъщност е и главен обект на изследване на магнетизма на околната среда, са феро- (фери-) магнитите. Те имат свойството да запазват придобитата намагнитеност под въздействие на външно магнитно поле дори и след премахване на действието на полето. Тази намагнитеност в отсъствие на индуциращо поле се нарича „остатъчна“. Големината на намагнитеностите на феромагнитните вещества е значително по-голяма в сравнение с тези на диа- и парамагнитите.

В Глава 2 в синтезирана форма са представени основите на феромагнетизма, доменното състояние на феромагнитните частици, процесите на намагнитване и основните магнитни характеристики, използвани в магнетизма на материалите и магнетизма на околната среда. Дефинирани са понятията за магнитна възприемчивост, честотно зависима магнитна възприемчивост, намагнитеност на насищане, изотермична остатъчна намагнитеност, безхистерезисна остатъчна намагнитеност.

Магнитната възприемчивост (k) е основна характеристика на веществата. Дефинира се като големина на намагнитеността (M), придобита от материала при поставянето му в слабо постоянно магнитно поле с големина H :

$$k = M/H$$

В системата SI k е безразмерна величина и се нарича обемна магнитна възприемчивост. Мас - специфичната магнитна възприемчивост (χ) се получава като k се раздели на плътността (ρ) и се изразява в мерни единици m^3/kg .

Магнитната възприемчивост на силно магнитните окиси на желязото (магнетит, магхемит) силно зависи от размера на частиците. Най-дребните частици с нано-размери съществуват в т.нар. суперпарамагнитно състояние (суперпарамагнитни частици, SP), в което имат неколкостранно по-висока магнитна възприемчивост в сравнение с тази за същия вид частици с по-големи размери. В същото време суперпарамагнитните частици не могат да придобиват остатъчна намагнитеност. Феримагнитите с малко по-големи размери на зърната съществуват в т.нар. стабилно еднородно състояние (SD). Еднородните частици имат най-ниска магнитна възприемчивост, но придобиват най-ефективно и с най-голям интензитет т.нар. безхистерезисна остатъчна намагнитеност (ARM). Безхистерезисната намагнитеност се създава в лабораторни условия при едновременното действие на променливо магнитно поле с намаляваща до нула амплитуда и друго слабо постоянно магнитно поле (Dunlop and Özdemir, 1997). С увеличаване на размера на зърната, феромагнитните частици преминават в т.нар. псевдо-еднородно (PSD) и многодоменно (MD) състояние. Преходът между SP и SD състояние се идентифицира най-лесно при измерване на магнитната възприемчивост (κ) в слабо магнитно поле с две различни работни честоти. Преминаването на една частица от SP в SD състояние води до рязко намаляване на големината на (κ), измерена на високата честота (Thompson and Oldfield, 1986; Worm, 1998). Разликата между стойностите на (κ), измерени на ниската (lf) и високата (hf) честоти е наречена честотно – зависима магнитна възприемчивост $K_{fd} = K_{lf} - K_{hf}$. Същата зависимост е в сила и за мас-специфичните стойности на (κ). Нормирането на χ_{fd} с феримагнитната компонента на K , изразено в проценти е другата широко използвана величина в магнетизма на околната среда – процентът честотно зависима магнитна възприемчивост ($\chi_{fd}\%$):

$$\chi_{fd}\% = 100 * (\chi_{fd} / \chi_{lf})$$

И двата параметъра (χ_{fd} и $\chi_{fd}\%$) се използват широко за идентифициране и оценка на концентрацията на суперпарамагнитни частици в естествени материали (Worm, 1998; Liu et al., 2005).

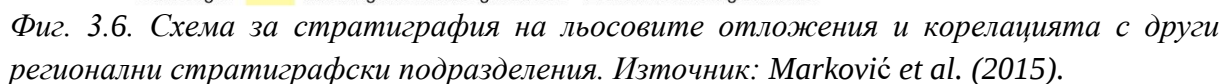
Глава 3 “Състояние на магнитните изследвания на лъсово – почвени седименти в Долнодунавския район и Европа – синтезис ” представя досегашните изследвания върху магнетизма на лъсово – почвените разрези от Централна и Източна Европа. Едни от най-дебелите и стари лъсово-почвени наслаги са отложени на лъсовите плата, които са в близост до речната мрежа на средното течение на р. Дунав (Marković et al., 2011; Újvári et al., 2014). Това отново потвърждава водещата роля на алувия на р. Дунав като основен източник на лъсов ситнозем.

Широко застъпени са магнитните изследвания на лъсово – почвени разрези от румънската част на Долнодунавската лъсова област – Влашката низина и Добруджа. Най-дебелите профили, които са изследвани детайлно от различни колективи през последните 25 г. са Мостища (Mostistea), Мирча вода (Mircea Voda) (Panaiotu et al., 2001; Buggle et al., 2009, 2012; Necula et al., 2013), Костинешти (Costinesti) (Necula et al., 2015) и Лунка (Lunca) (Constantin et al., 2015; Necula et al., 2024). Дебелината им варира от 12 m на брега на Черно море (Costinesti) до 34 m. (Lunca) в централната част на Влашката

низина. За разлика от изследванията на българския лъос, за лъосово – почвените профили от територията на Румъния има обширна база данни от абсолютни датировки на лъосовите хоризонти в резултат на наличната лаборатория и специалисти по термолуминисцентно датиране (Timar Gabor et al., 2017; Constantin et al., 2021).

Вариациите в дълбочина по лъосово – почвените профили на магнитната възприемчивост са едни от най-често използваните записи за пространствена корелация на разрези в регионален и глобален план. В резултат на процесите на педогенно магнитно обогатяване по време на интергласиалните (или интерстадиални) епохи, нивата от разрези, претърпели някаква степен на вторично изветряне, начални стадии на почвообразуване или формиране на недоразвити почви, се открояват ясно на фона на ниската магнитна възприемчивост на неизветрелите лъосови наслаги. Досегашните изследвания на магнетизма на лъосово-почвените седименти се основават на възприетата хипотеза (Maher et al., 2003), че педогенезата върху лъосови седименти става чрез механизма на надграждане – т.е. формиране на почвата при продължаваща седиментация на еоличен материал. Това позволява да се направи пряка корелация на големината на магнитния сигнал с климатичните фактори, и по-специално – с количеството валежи, като се приеме, че факторите „време“ и „почвообразуваща скала“ не влияят върху степента на магнитното обогатяване. Предложени са различни педотрансферни функции, чрез които се дава връзката между големината на магнитното обогатяване и средногодишното количество валежи. Педогенното магнитно обогатяване най-често се оценява чрез големината на магнитната възприемчивост в В-хоризонта на палеопочвите (Maher, 2016; Long et al., 2016; Maxbauer et al., 2016). Установено е, че зависимостта на магнитните параметри от климатичните фактори (валежи, температура) не е еднаква за различните лъосови области (Китай, Азия, Европа, Съединените Щати) (Geiss and Zanner, 2007; Radakovic et al., 2019; Alekseev et al., 2023). Това показва съществена роля, която имат локалните фактори като напр. релеф, растителност, за големината на магнитното обогатяване на почвите.

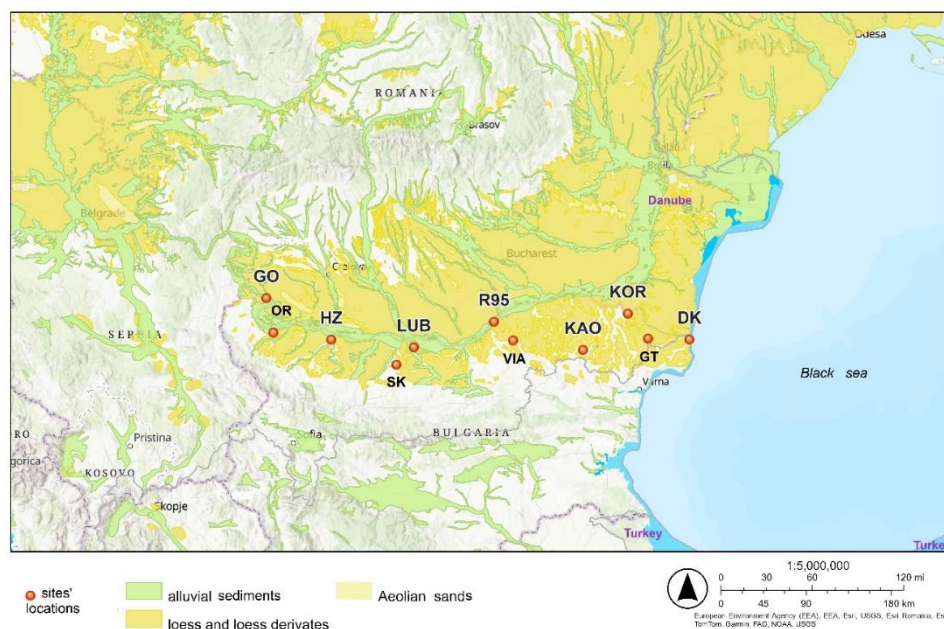
В раздел 3.2. се разглежда въпросът относно стратиграфската корелация на лъосово – почвените разрези от Европа. Вариациите на магнитната възприемчивост по профилите са едни от най-често използваните за тази цел записи. В последните десетилетия е постигнат значителен успех в това направление, както и при съставянето на карти на лъосовите отложения в Европа (Haase et al., 2007; Marković et al., 2015; Lehmkuhl et al., 2021). В работата на Marković et al. (2015) е представена единна стратиграфска номенклатура за лъосово – почвените последователности в Европа, която допринася за унифициране на означенията и по-лесна корелация на разрези от различни територии. Фиг. 3.6. е показана предложената схема за стратиграфия на лъосовите отложения и корелацията с други регионални стратиграфски подразделения.



Установяването на положението на границата Матуяма – Брюнес в льосовия комплекс от Дунавския басейн е докладвано в няколко изследвания на льоса на територията на Сърбия, Румъния и Украйна (Marković et al., 2003; Song et al., 2018; Balescu et al., 2003; Radan, 2012; Bakhmutov et al., 2023). Палеомагнитната граница е установена в последния льосов хоризонт (седми или осми в зависимост от използваната стратиграфска схема). Палеомагнитните изследвания на льосови седименти от България са ограничени и датират от сравнително отдавна. Първата работа е на Калчева и кол. (1988), където са докладвани резултатите от палеомагнитно изследване на льосови седименти от Русенско. Границата Матуяма – Брюнес е идентифицирана в седмия

лъсов хоризонт в разрез при с. Николово (Бъчварова, 1992; Евлогиев, 2005). Палеомагнитни данни за лъсово-почвените комплекси при гр. Вятково и гр. Каолиново са представени в работата на Болшаков и Свиточ (1995). Авторите намират отрицателна намагнитеност в шести лъсов хоризонт.

Глава 4 „Описание на изследваните профили на лъсово - почвени разрезии от България. Методология и лабораторна апаратура“. представя лъсово – почвените профили, включени в дисертационния труд. В главата са представени детайлни описания на литоложките единици, представени във всеки от профилите. На Фиг. 4.1. е показана карта с площното разпространение на лъсовите седименти в Северна България, върху която са обозначени локалитетите на изследваните лъсово – почвени разрезии. Местоположенията са такива, че обхващат основните типове лъс (песъчлив, типичен, глинест).



Фиг. 4.1. Местоположения на изследваните лъсово – почвени профили. Схемата на разпространение на лъсовата покривка е съгласно Lehmkuhl et al. (2021).

От района на западната част на Дунавската равнина са изучени три профила – „Гомотарци“ (GO), „Орсоя“ (OR) и „Хърлец“ (HZ) (Фиг. 4.1.). И трите локалитета са разположени върху речните тераси на р. Дунав и р. Огоста: „Гомотарци“ – върху Т₃, „Орсоя“ – Т₁ и „Хърлец“ – Т₂ на р. Огоста. Поради това, лъсовия комплекс върху тези млади геоморфоложки форми е непълен и е представен от най-младите отложения. При с. Хърлец са опробвани и изследвани два профила, които са разположени на около 500 м. разстояние един от друг. Трите профила са опробвани непрекъснато на всеки 5 см.

От централната част на Дунавската равнина са изучени два лъсово – почвени профила – „Любеново“ (LUB) и „Сухият кладенец“ (SK) (в района на с. Върбица,

Плевенско). Профил „Любеново“ представлява сондажна ядка, която е включена в работите на Евлогиев (2005) и е описана от него като „Сондаж В4“ при с. Любеново. Местоположението на сондажа е на 12.5 km южно от р. Дунав и има обща дебелина от 62.8 м. Това е най-дебелият льосово – почвен профил, изследван досега от територията на Северна България и обхваща пълната льосово – почвена последователност, състояща се от седем (осем) льосови хоризонта и шест погребани почви. За магнитни анализи са събрани проби на всеки 20 см от сондажната ядка. Профил „Сухият кладенец“ (SK) обхваща също пълния комплекс от льосове и палеопочви, като общата дебелина на разреза е 26 м. Опробван е детайлно на всеки 2 см. В средата на втори льосов хоризонт е идентифициран видим слой от вулканска пепел (тефра) с дебелина 20 см.

От района на Североизточна България са изследвани шест профила. Профил „Русе“ е опробван в градски изкоп, разкрит във връзка със строителни дейности. Локалитетът се намира върху четвърта надзаливна тераса на р. Дунав. Опробвани са 17 м от наслагите. От Добруджанското плато са опробвани два профила – „Коритен“ (KOR) и „Генерал Тошево“ (GT). Профилът „Коритен“ е сондажна ядка (B12) от изследванията на проф. дгн Й. Евлогиев (Евлогиев, 2005), от която е събран материал от всеки 10 см. Общата дебелина на разреза е 33 м. Разграничават се шест погребани почви и седем льосови хоризонта. Профил (GT) е опробван в района на тухлената фабрика в гр. Генерал Тошево. Изследваната част от разреза включва горната част на льосово - почвения комплекс до втората погребана почва включително и има обща дебелина от 8 м.

Профилите „Каолиново“ и „Вятово“ са опробвани в открити рудници за добив на каолин на КАОЛИН ЕОД. Льосовият комплекс в разрез „Вятово“ заляга върху педокомплекс от червени глини, отложени върху плиоценската денудационна повърхност (PDS). Над червените глини заляга льосово – почвената последователност, състояща се от седем льосови хоризонта и шест погребани почви с обща дебелина 21 м. Профилът е опробван непрекъснато на всеки 5 см. Събрани са както насипни, така и ориентирани проби за магнитостратиграфски анализ и палеомагнитни изследвания. Льосово – почвените отложения в района на гр. Каолиново са опробвани в няколко разреза в рамките на три кампании за събиране на проби през 2011, 2017 – 2019, и през 2023 г. в откритите рудници за добив на каолин. Опробвани са льосово – почвените разреза, разкриващи се в кариера „Дойранци“ (три профила) и два разреза в кариера „Кус“, обхващащи долните нива на льосовите наслаги. От разреза, опробван през 2011 г., са събрани проби на всеки 5 см, а от останалите разреза – на всеки 2 см.

Льосово – почвеният профил „Дуранкулак“ (DK) е опробван на брега на Черно море в близост до границата с Румъния, на север от с. Дуранкулак. Общата дебелина на разреза е 15 м., като се разграничават пет палеопочвени хоризонта и шест льоса.

В последния раздел на Глава 4 е описан набора от проведени магнитни измервания и анализи и е дадена техническа информация за използваната апаратура и методика, което позволява да се оцени точността на измерванията и достоверността на получените резултати.

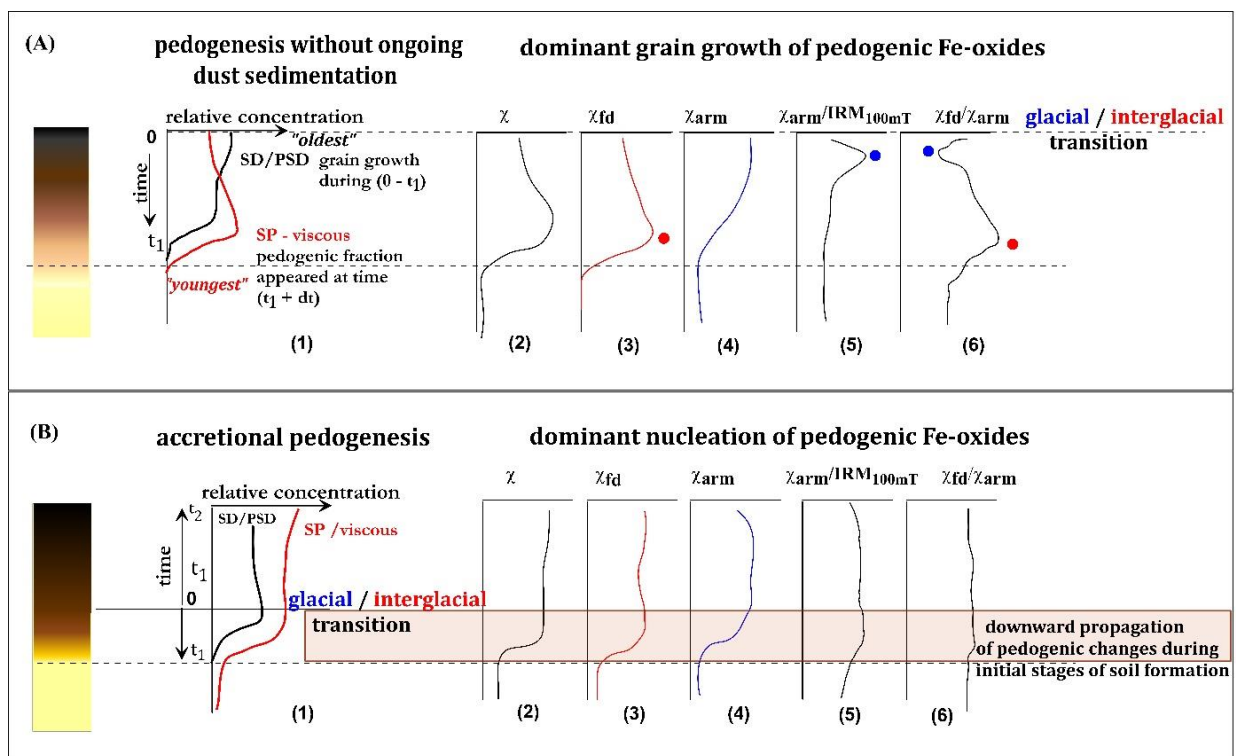
Глава 5 „Иновативни хипотези за ролята на факторите на околната среда при формиране на магнитния запис в дълбочина по почвените профили, развити върху лъс“ представлява оригинален принос на автора към развитие на идеите, свързани с процеса на запазване на информацията относно палеоклиматичните условия в магнитния запис в дълбочина по почвените профили.

Един подценен и неизследван въпрос в магнетизма на лъсово – почвените профили е как магнитният запис отразява времевия процес на еволюция в концентрацията, размера, стабилността и реактивността на променящите се окиси на желязото в почвата в отговор на променящите се условия на околната среда по време на почвообразуването. Типичната продължителност на интергласиалните епохи през плейстоцена варира между 10 – 30 хил. г., достигайки до 40 (60) хил. г. за по-старите интергласиали (MIS 13, MIS17) (Past Interglacials Working Group of PAGES, 2016). Такава времева скала е относително дълга в сравнение с установения период от няколко хиляди години, необходими за достигане на стационарно състояние в магнитното обогатяване на почвата (Maher and Thompson, 1995; Thompson and Maher, 1995). Съгласно Alexandrovskiy (2007), добре развити черноземни и канелени почви се образуват за около 2 000 години.

Началната хипотеза за изграждане на настоящия концептуален модел е, че процесите на зараждане и нарастване по размер на педогенните силно магнитни частици на железните окиси са два противопоставящи се процеса по време на еволюцията на почвата. Относителният превес на единия процес спрямо другия зависи от концентрацията на Fe^{2+} йони в почвения разтвор, освободени в резултат на изветрянето на литогенните минерали. Процесите на образуване на педогенната магнитна фракция в почвите зависят главно от цикличната смяна на окислителни и редукиционни фази. Предложеният модел, освен тези известни зависимости и процеси, разглежда в допълнение и ролята на еоличната седиментация по време на почвообразуването като фактор, който определя вариациите в разпределението на размерите на фракцията педогенен магнетит.

Почвообразуването в класическото почвознание се разглежда като процес, протичащ при стабилни условия на повърхността, без постъпване на нов материал (Schaetzl and Anderson, 2009). В такива условия „посоката на времето“ при формиране на почвата е противоположна на нормалната седиментационна „посока на времето“, където има натрупване на материал в посока нагоре. По време на периодите на почвообразуване и еволюция на почвения профил, педогенните трансформации *in-situ* се реализират чрез миграция на фронта на изветряне на първичните минерали от повърхността в дълбочина (Schaetzl and Anderson, 2009; Kirkby, 2018) (Фиг. 5.7 А). При такъв сценарий, най-младото изветряне протича на известна дълбочина от повърхността (Yoo and Mudd, 2008). Скоростите на изветряне на повърхността намаляват поради все по-малкото количество свежи минерални повърхности, които са налични за протичане на изветрителните процеси. В резултат, педогенните минерали се образуват на различна дълбочина в почвения профил, като тези на най-голямата дълбочина (като напр. В-хоризонтите) никога не биват изложени на повърхностните условия на средата. Така

педогенните минерали, формирани от изветрителните продукти на дъното на почвения профил, са колективно най-млади (Фиг. 5.7. А). В по-плитките части на профила известно количество „млади“ частици съществуват едновременно със „старите“ такива. Количеството на минералите, подложени на изветряне (т.е. такива, които са източник на Fe^{2+}) намалява експоненциално с времето и привноса на йони в почвения разтвор също намалява. Този процес започва да благоприятства нарастването на размера на частиците за сметка на появата на нови (Baumgartner et al., 2013) и нарастване на кристалинността на педогенните окиси (Thompson et al., 2006). Следователно, педогенните магнитни частици близо до повърхността, образувани и запазили се при серията окислително-редукционни цикли от началото на процеса на почвообразуване, ще нарастват до по-едри (SD до PSD) размери. Схематично тези вариации в размера на педогенните магнитни частици в дълбочина по профила са показани на Фиг. 5.7.А-1. Съответното проявление на описаните процеси в магнитните характеристики на почвата е показано на Фиг. 5.7А 2-6.



Фигура 5.7. Идеализирана диаграма на измененията в концентрацията на най-дребните суперпарамагнитни (SP) и по-едрите еднодоменни до псевдоеднодоменни (SD/PSD) педогенни феримагнитни минерали в дълбочина по профилите на почви, формирани без привнос на прахов материал (А) и при акреционни почви (В).

Относителното намаляване на χ_{fd} в посока към повърхността показва израстване на фракция частици отначало от SP магнетит/магхемит към SD (PSD) ефективен магнитен размер. Дълбочината на максимума в χ_{fd} ще отразява дълбочината на най-

съвременния фронт на изветряне на Fe-съдържащите литогенни частици (Фиг. 5.7А-3). По-нататъшната еволюция на педогенната магнитна фракция във времето се проявява в магхемитизиране и крайна трансформация в хематит, протичащи в геоложки периоди от време (Jiang et al., 2018). Общото количество на фракцията магнетит/магхемит, което може да носи ARM (т.е. да дава принос към χ_{arm}) (Фиг.5.7А-4) ще намалява в дълбочина поради все по-младата възраст в по-дълбоките нива, което означава и по-малък брой и по-слабо интензивни окислително-редукционни цикли при промяна на количеството почвена влага (Barcellos et al., 2018), както и ограничено количество органично вещество и микробна активност. Магнитният параметър χ_{arm}/IRM_{100mT} , който е чувствителен към вариациите в размера на дребните SD частици (Geiss and Zanner, 2007) ще има максимум близо до повърхността (Фиг. 5.7А-5). Това дълбочинно отместване на добре изразения максимум в χ_{arm} и χ_{fd} се отразява във вариациите в дълбочина на отношението χ_{fd}/χ_{arm} (Фиг.5.7А-6).

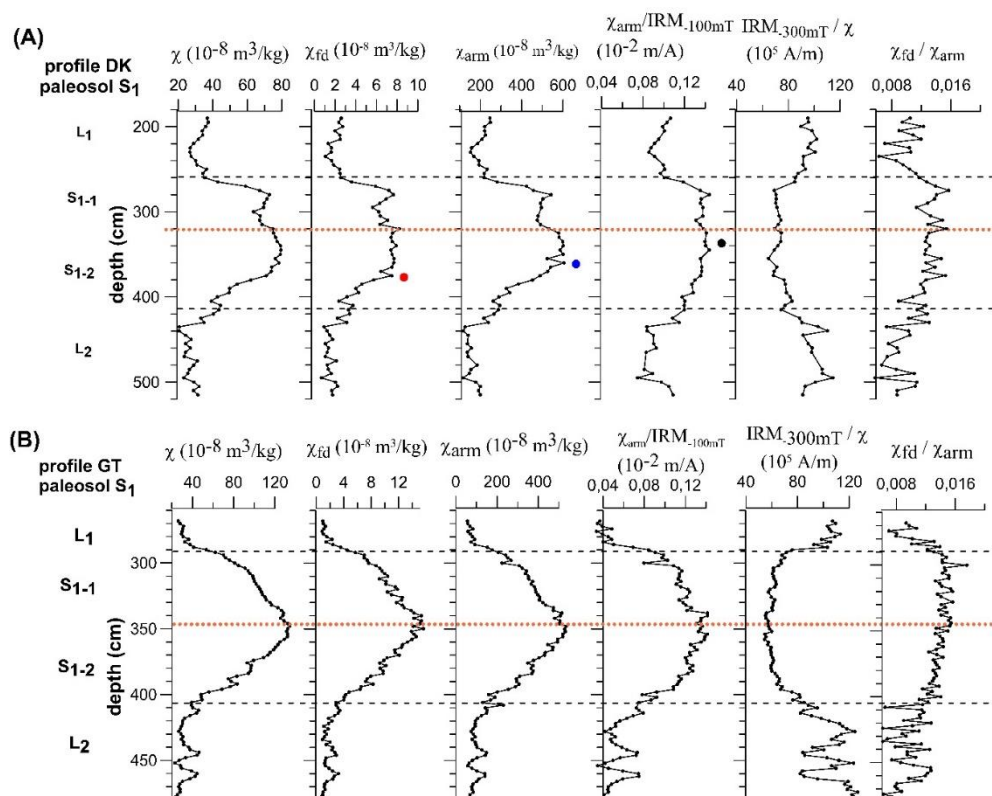
При наличие на активен източник на прахов материал по време както на глациалните, така и през интерглациални епохи ще има непрекъсната седиментация. В този сценарий отлагането на прахов материал и процесите на почвообразуване протичат едновременно и в резултат се образуват акумулативни почви (Фиг. 5.7В). Когато привносът на прахов материал на повърхността е слаб до умерен, това предотвратява естественото затихване на скоростта на изветряне с времето (Reeves and Rothman, 2013). Тогава почвата се развива в посока нагоре, като постъпващият нов свеж материал на повърхността се трансформира в почва (Johnson and Watson-Stegner, 1987; Schaetzl and Anderson, 2009). Комбинацията от високо съдържание на органика, интензивна микробна дейност, висока скорост на изветряне и подходящи климатични условия се проявява в интензивно почвообразуване и развитие на мощни почвени хоризонти (Mason, 1998; Lowe and Tonkin, 2010; Eger et al., 2012). Такива условия се реализират в умерения климатичен пояс с умерено количество валежи до 1200 мм/год, което благоприятства магнитното обогатяване на почвите (Balsam et al., 2011). Важна характеристика на акумулативните почви е, че педогенните минерали, формирани “*in situ*” от всяко ниво в почвата са били изложени на повърхностните условия на средата в даден момент от образуването им (Фиг. 5.7В). Тази универсална последователност в еволюцията на магнитните минерали на всяка дълбочина от акумулативните почви се изразява в наличието на широк спектър на размерите на зърната на педогенната компонента (Фиг. 5.7.В-1-5). Големината (интензивността) на тази педогенна компонента ще зависи от количеството валежи и характера на тяхната сезонност, тъй като средногодишното количество валежи и сезонната им изменчивост контролират изветрителните процеси и свързаните с тях биогеохимични процеси (Dixon et al., 2016). Друго следствие от съществуването на педогенните минерали от всяко ниво в условията на земната повърхност на даден етап от време е, че тези минерали са формирани при по-високи температури на повърхността, в сравнение с температурата в дълбочина на почвения профил. Заедно с нарастването на почвата във височина по време на акумулативната педогенеза, мощността ѝ също се увеличава до известна дълбочина (Liu et al., 2004) поради високата скорост на формиране в началните етапи на почвообразуване. Това води до съпътстващо проникване на педогенните процеси и в дълбочина в долулежащия

лъсов материал (Фиг. 5.7.В-1). Горните разсъждения са в унисон с модела на синхронните вариации на магнитните параметри, чувствителни към размера на магнитните частици (χ_{fd} , χ_{arm} , $\chi_{arm}/IRM-100mT$, χ_{fd}/χ_{arm}), както е показано на Фиг. 5.7.В-2-6.

Този концептуален модел за процесите на формиране и еволюция на педогенната магнитна фракция по профилите на почви, формирани в условията на прекъсване в седиментацията или продължаващ привнос на прахов материал, е демонстриран и тестван чрез анализ на поведението на набора от магнитни параметри и отношения в дълбочина по трите профила на съвременна почва от разрезите „Дуранкулак“ (DK), „Генерал Тошево“ (GT) и „Колобър“ (KOL).

Предложеният модел е приложен за анализ и интерпретация на поведението на магнитните параметри в дълбочина по профилите на първата погребана почва в разрезите DK и GT. Прилагайки същите разсъждения, както за холоценските почви, може да се предположи, че палеопочвеният хоризонт S_{1-1} на профила DK в интервала (320 - 260 см) е формиран в акумулативен режим на продължаваща прахова седиментация, подобно да най-младата холоценска почва в профила. Това заключение се базира на паралелните промени в параметрите χ_{fd} , χ_{arm} и $\chi_{arm}/IRM-100mT$ в дълбочина (Фиг. 5.6.А).

Поведението на магнитните параметри в почвения хоризонт S_{1-2} показва отместване в дълбочина на максимумите на трите параметъра, апроксимиращи магнитните размери на частиците, което говори за доминиращо почвообразуване „отгоре-надолу“ при липса или минимално отлагане на прахов материал. Обратно, синхронните вариации на магнитните параметри в палеопочвата S_1 на профила GT (Фиг. 5.6.В) показва по-вероятно продължаващо натрупване на лъсов материал по време на топлия период MIS 5е в сравнение с условията през холоцена. Долната част на палеопочвата S_1 (S_{1-2}) отразява началото на почвообразуването през периода MIS 5е. Вариациите на магнитните параметри по профила DK са характерни за условия без продължаващо натрупване на прахов материал. Може да се направи извода, че вариациите на предложените в емпиричния модел магнитни характеристики може успешно да се използват за изследване на режима на почвообразуване със или без едновременна седиментация на еоличен материал.



Фигура 5.6. Вариации на магнитните параметри в дълбочина по профилите на първата палеопочва в разрезите DK (A) и GT (B).

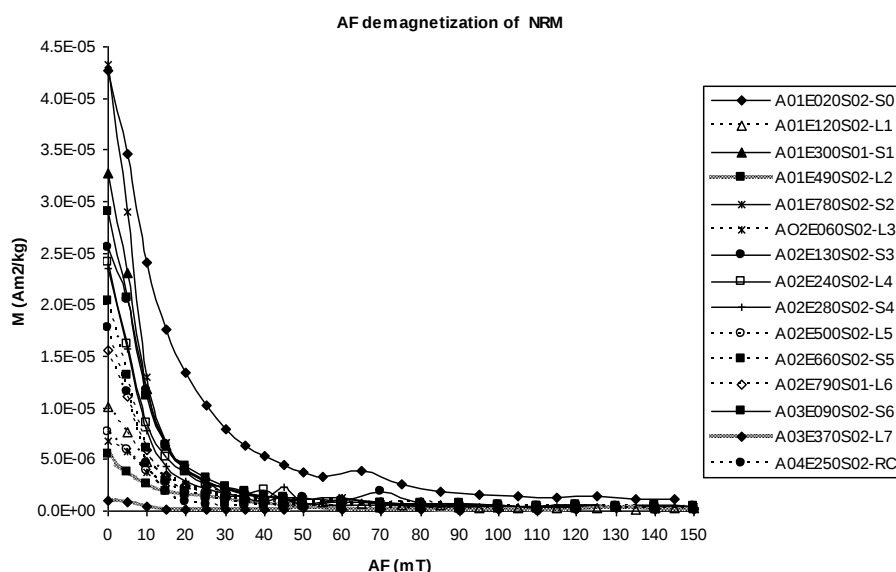
Предложеният нов концептуален модел се базира на следните диагностични зависимости:

1. Наличието или липсата на еолична прахова седиментация по време на почвообразуването върху льосов материал може да се определи чрез високо-разделително изследване на магнитни параметри, показващи зависимост от размера на частиците;
2. Почвообразуването, протичащо в стабилни условия на земната повърхност (отгоре-надолу) без продължаваща седиментация се характеризира с изявена разлика на дълбочините, на които се регистрира максимума в стойностите на магнитните параметри – на най-голяма дълбочина в χ_{fd} , следван от χ_{arm} и най-плитко разположен максимум в χ_{arm}/IRM_{100mT} .
3. Магнитните характеристики на почвите, развити в условия на непрекъсната седиментация (акумулативни почви) показват синхронни вариации в дълбочина по профила;
4. Отношението IRM_{300mT}/χ е предложено като приближение на промените в отношението прах/глина, което често се използва за идентифициране на стратиграфската граница между глациални и интерглациални периоди в еоличната седиментация.

В Глава 6 „Датиране и магнитостратиграфия на лъсовия комплекс в България“ е представена компилация на резултатите от проведените колективни интердисциплинарни изследвания с участието на автора на дисертационния труд за датиране на нива от лъсово – почвени профили от Северна България чрез прилагане на различни датиращи методи. Основният принос на автора е свързан с палеомагнитните изследвания на лъсово – почвения профил „Вятово“, където е получен детайлен запис на палеомагнитната граница Матуяма – Брюнес и с тейхронологичното датиране на нивото с тейфра от втори лъсов хоризонт на профил „Сухият кладенец“.

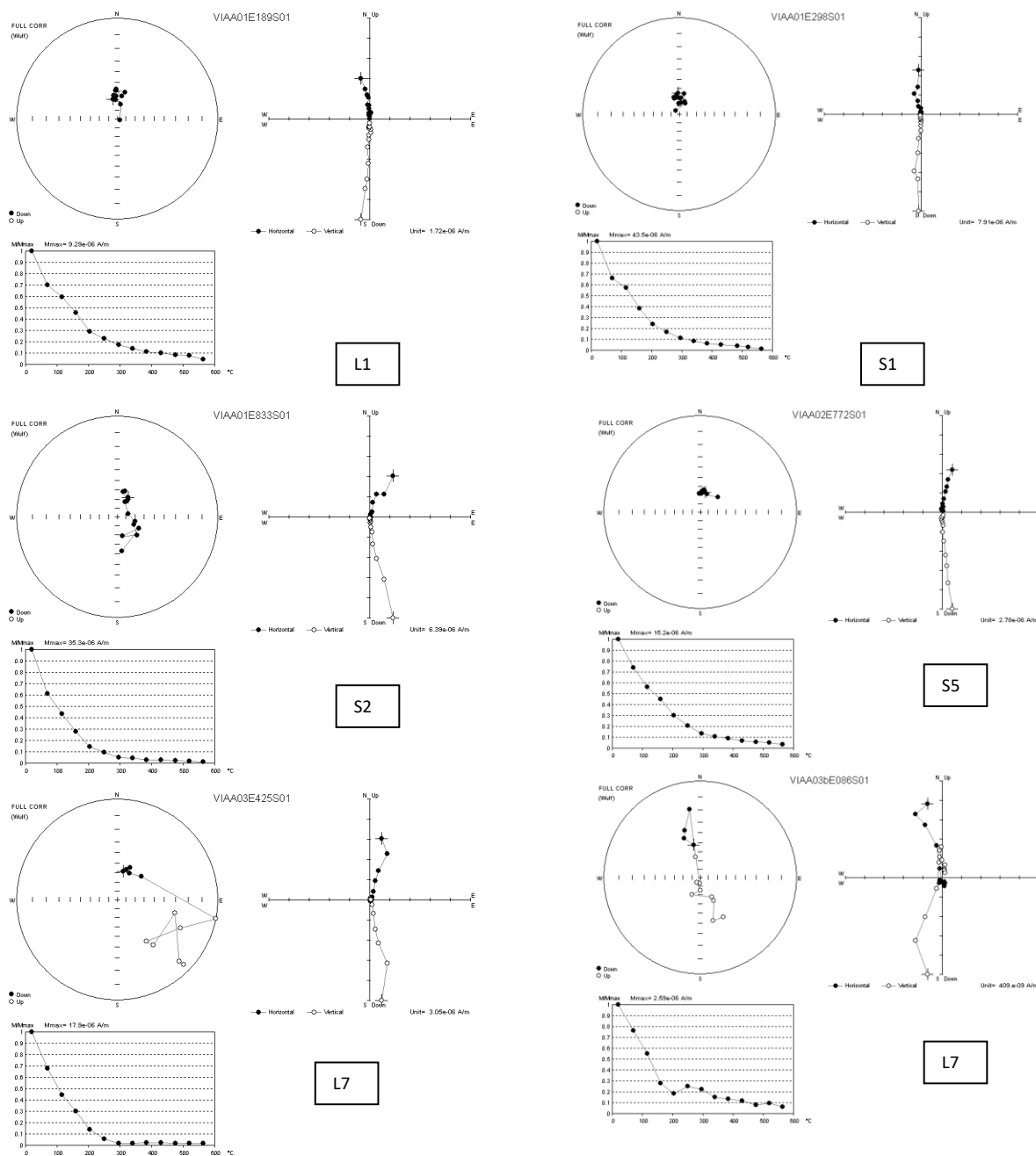
Магнитостратиграфия на лъсово – почвения профил „Вятово“

Събрани са общо 275 ориентирани цилиндрични образеца в дълбочина по профила, който е с обща мощност 27 м. Пилотна колекция от избрани проби от различни нива на профила е подложена на стъпково размагнитване с променливо магнитно поле с увеличаваща се максимална амплитуда от 0 до 150 mT. Резултатите показват наличието на много магнитно мека вискозна компонента (Фиг. 6.1.).



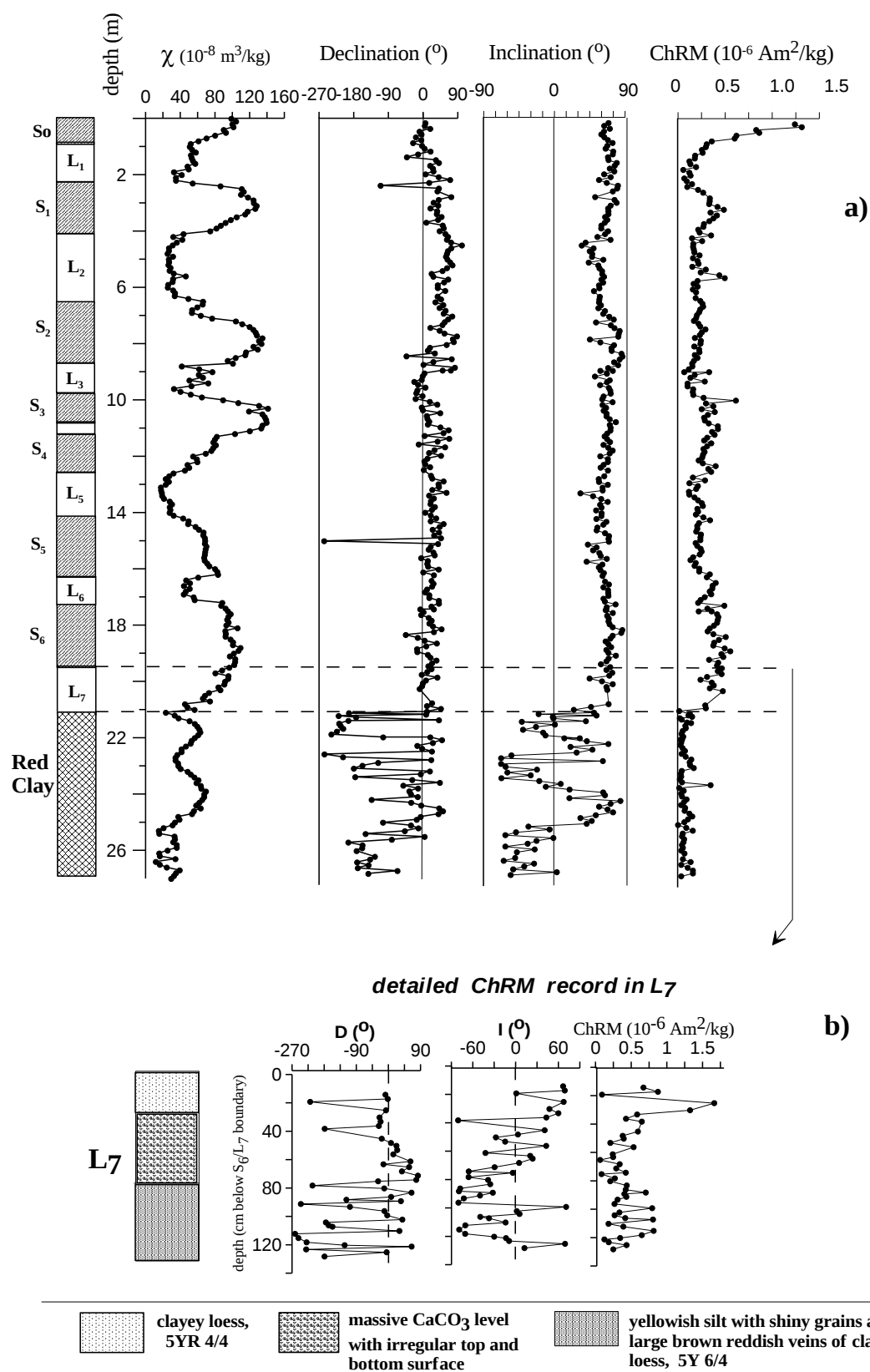
Фиг. 6.1. Изменение на интензитета на вектора на естествената остатъчна намагнитеност (NRM) при стъпково размагнитване с променливо магнитно поле (AF).

Поради тази силна вискозност, размагнитването с променливо поле не е подходящо за отделяне на вектора на първичната характеристична намагнитеност. На Фиг. 6.3. са показани примери за измененията на посоката и интензитета на NRM по време на стъпково температурно размагнитване. Освен стабилната характеристична компонента ChRM, образците съдържат и значителна по интензитет нестабилна компонента, най-вероятно с вискозен произход.



Фиг. 6.3. Резултати от стъпковото температурно размагнитване на NRM за представителни проби от разреза

След внимателен преглед на пилотните детайлни размагнитвания, са избрани следните температурни стъпки за провеждане на масова „чистка“ на всички останали ориентирани образци от колекцията: 300°C, 325°C, 350°C. Вариациите в дълбочина по профила на посоката на ChRM (деклинация D и инклинация I) и нейния интензитет след парциално температурно размагнитване на 325°C са показани на Фиг. 6.4 а.



Фиг. 6.4. а) Вариации в дълбочина по профил „Вятово“ на магнитната възприемчивост (χ), посоката (деклинация D и инклинация I) и интензитета (ChRM) на вектора на първичната остатъчна намагнитеност. б) детайлен запис на прехода Матуяма – Брюнес, записан в седиментите от седмия льосов хоризонт.

Съпковото температурно размагнитване на NRM показва наличието на вторична компонента с посока, съвпадаща повече или по-малко с посоката на съвременното геомагнитно поле за България (Фиг. 6.3.) и имаща вискозен или химически произход. Тази компонента се размагнитва при нагряване в интервала 200 – 250°C, което също се потвърждава и от промяната в наклона на кривата на изменение на интензитета на NRM с увеличаване на температурата. Посоките на ChRM след парциално размагнитване на 300, 325 и 350°C са определени чрез анализ на основните компоненти и показват систематични вариации (Фиг. 6.4). Няколкото изключения на хаотични посоки и две положителни посоки в дълбочинния интервал на инверсията M/V вероятно се дължат на механични дислокации в лъсовия материал или химическо пренамагнитване след отлагането на лъоса, както може да се предположи от наличието на големи вторични карбонатни конкреции и глинести червеникави вени (Zhu et al., 2006). Друга причина за наблюдаваните резки промени в посоката на характеристичната намагнитеност по време на инверсия на геомагнитното поле може да бъде т.нар. „механизъм на заключване“ (lock-in depth mechanism) на намагнитеността в лъсово - почвените седименти (Spassov et al., 2003b). Предишно палеомагнитно изследване на долната част на лъсовия комплекс близо до гр. Русе (разкритие Николово) намира границата M/V между хоризонтите S₆ и L₇ (Бъчварова, 1993).

Характеристичната намагнитеност на червените глинени показва две поредни смени от обратна към нормална полярност (Фиг. 6.4). Съгласно резултатите от изследванията на магнитната минералогия, червените глинени могат да бъдат разглеждани като мощен педо-комплекс, формиран в сухоземни условия с интензивно изветряне. Вариациите на магнитната възприемчивост в тази част от профила (Фиг. 6.4) предполагат наличието на поне две палеопочви. Двата периода с нормална полярност на геомагнитното поле съответстват на увеличението на магнитната възприемчивост в двете последователни палеопочви. Зоната с нормална магнитна полярност, определена в горната част на хоризонта на червените глинени вероятно съответства на суб-хрон Харамилъ (0.99 – 1.07 Ma) или обхващаща етапите 27 – 31 от изотопно-кислородната крива (Shackleton et al., 1990; Tiedemann et al., 1994). Второто събитие с нормална полярност в червените глинени се намира в средата на хоризонта. Вземайки предвид сравнително голямата продължителност на епохата Матуяма и долната възрастова граница на комплекса от червени глинени, определена на 2.6 Ma (Евлогиев, 2005), може да се предположи, че това събитие съответства на суб-хрона Олдувай (1.78 – 1.94 Ma).

Резултати от термолуминисцентно датиране на проби от български лъсово – почвени профили

Профили „Вятово“ и „Каолиново“

Идентифицирането на палеомагнитната граница Матуяма – Брюнес в седми лъсов хоризонт на профил „Вятово“ е един от основните хроностратиграфски маркери за лъсово – почвените наслаги от района на Долния Дунав, като маркира началото на еоличната акумулация през глациалния плейстоцен. Тъй като получените данни за вариациите на елементите на земното магнитно поле (деклинация и инклинация) по

профила не показват наличието на екскурзии на полето по време на съвременната геомагнитна епоха Брюнес, други хроностратиграфски маркери от палеомагнитните данни за горната част на разреза липсват. Проведеното термолуминисцентно датиране на представителни нива от първите три лъсови хоризонта на профилите „Вятово“ и „Каолиново“ в сътрудничество с проф. Балеску (Balescu et al., 2020) спомагат за изработване на времеви модел за лъсово – почвените наслаги с добре верифицирани данни за възрастите и на по-младите лъсови хоризонти. В Таблица 6.2. са показани резултатите от датирането.

site	sample	Loess unit	Corrected ages: MAAD IRSL ₆₀ (ky)	chronostratigraphy
Viatovo	VIA 1	L ₁	60 ± 5	MIS 2-4
	VIA 2	L ₂	167 ± 14	MIS 6
	VIA 3	L ₃	285 ± 35	MIS 8
	VIA 4	L ₇	>1066	> M/B (773 ka)
Kaolinovo	KA 1	L ₁	44 ± 3	MIS 2-4
	KA 2	L ₂	184 ± 29	MIS 6
	KA 3	L ₃	264 ± 64	MIS 8

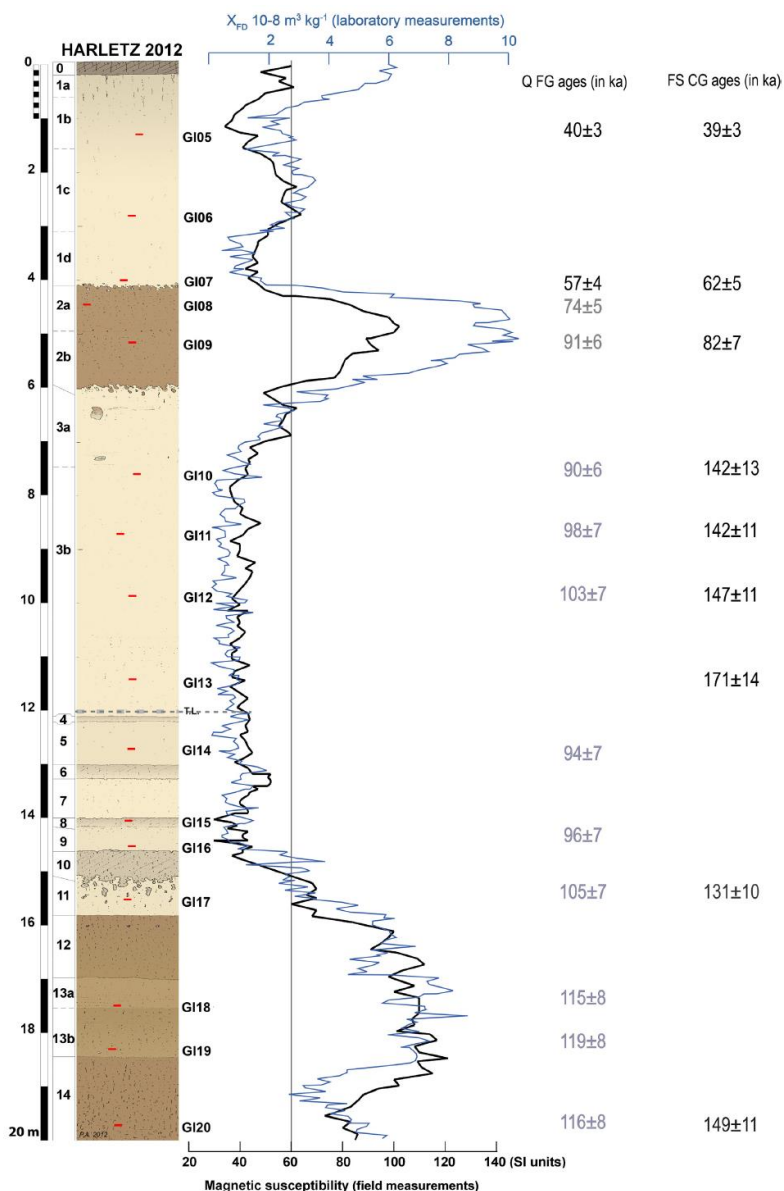
Таблица 6.2.

Датите, получени за L₁ варират в интервала 41 – 69 хил.г., което, съотнесено с дълбочината на изследваните проби по двата профила, показва, че най-вероятно лъсовите наслаги от последния глациал (Last Glacial Maximum (LGM)) с възрасти около 20 – 26 хил. г. са подложени на засилена ерозия. Поради това и дебелината на L₁ в лъсовия комплекс от Долнодунавската област е относително малка. Датираният интервал за L₁ (41 – 69 хил.г.) предполага, че първи лъос е акумулиран главно през изотопно – кислородния стадий 4 (MIS 4), който е засегнат от опочвяване и изветрителни промени през интерстадиала MIS 3. Датите за втория лъсов хоризонт са в интервала 153 – 213 хил.г., съответстващи на изотопно – кислородния стадий MIS 6. Трябва да се отбележи, че пробите от L₂ са взети от дълбочини под нивото на криптотефрата, идентифицирана по локалния максимум на магнитната възприемчивост в този лъсов хоризонт. Датите, получени за третия лъсов хоризонт (L₃) (293 ± 17 и 296 ± 17 хил.г.) съответстват на изотопния стадий MIS 8. Следователно, данните от термолуминисцентното датиране на първите три лъсови хоризонта от профилите „Вятово“ и „Каолиново“ са изцяло в подкрепа на предложената корелативна схема между вариациите на магнитната възприемчивост в дълбочина по лъсово – почвените профили и астрономически калибрираната глобална изотопно – кислородна крива за ядки от световния океан (Lisiecki and Raymo, 2005), отразяваща палеоклимата.

Профил Хърлец (2012 г)

Проведено е термолуминисцентно датиране на 13 нива от льосово – почвения профил „Хърлец“, опробван през 2012 г. съвместно с колеги от Франция (Lomax et al., 2019). Хронологията се базира на данни, получени по фракция дребни кварцови зърна и едри фелдшпатови частици.

Резултатите от датирането по двете фракции (дребни кварцови зърна (Q FG) и едри калиеви фелдшпати (FS CG)) са представени на Фиг. 6.7.

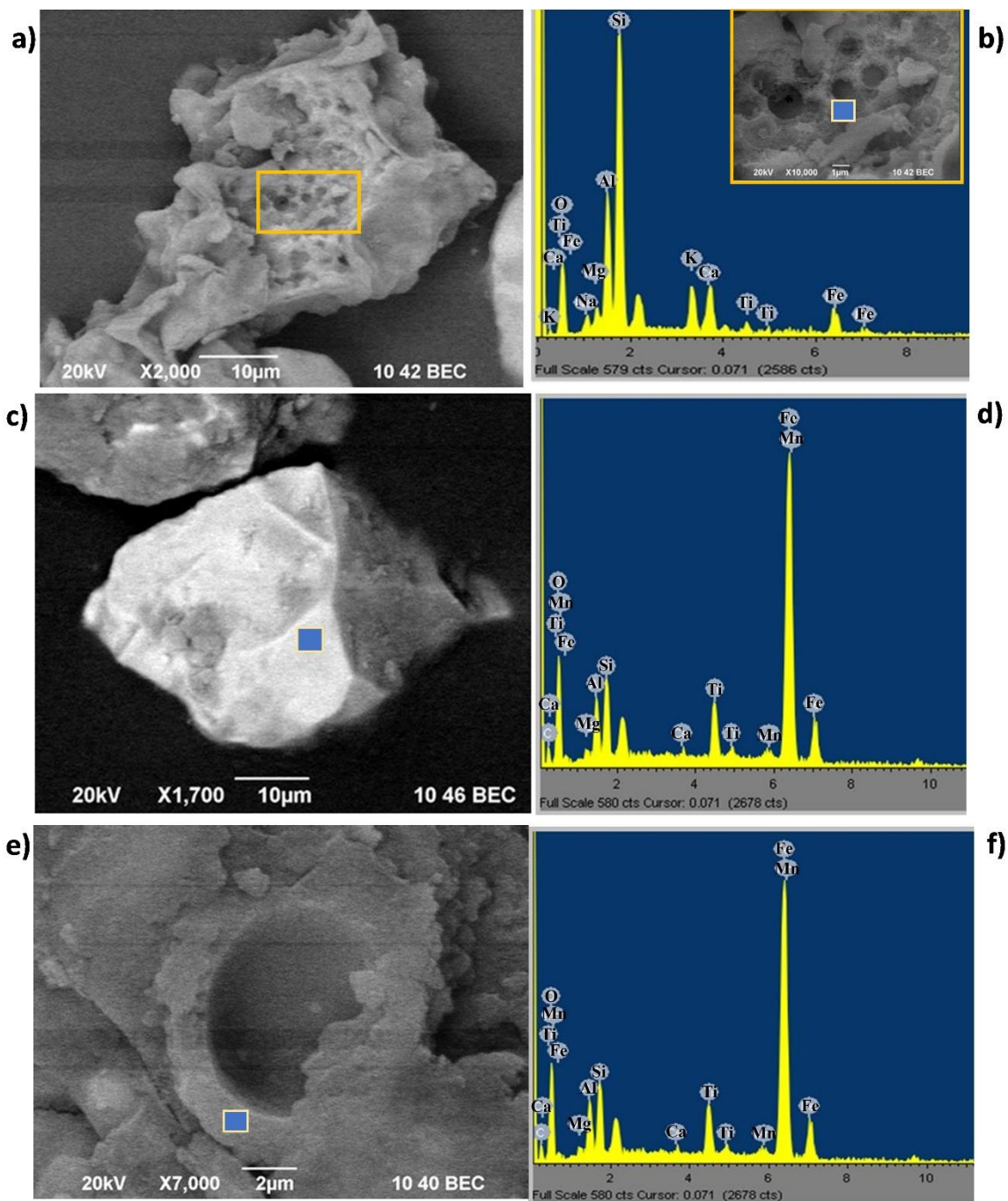


Фиг. 6.7. Възрасти (хил.г.), получени чрез термолуминисцентно датиране по дребна фракция от кварцови зърна (Q FG ages) и едри фелдшпатови зърна (FS CG ages), представени в дълбочина по стратиграфската колонка на профил „Хърлец“ заедно с вариациите на магнитната възприемчивост.

Резултатите позволяват да се направят някои заключения относно палеогеографските условия в района. Както се вижда от Фиг. 6.7, датите, получени за пробите от първия льосов хоризонт (GI05 и GI06) са в интервала 60 – 40 хил.г. Тук отново, както и при датите, получени за локалитетите от Североизточна България (“Вятово” и “Каолиново”), липсва материал с възрасти от последния глациален максимум (MIS 2). Това отново показва наличието на засилени ерозионни процеси. Възрастта за пробата GI06, която попада в рамките на недоразвитата почва, показва, че тя се е формирала преди 40 хил.г., т.е. в началото или средата на MIS 3. Както на територията на България, така и в Румъния, тази слабо развита почва е идентифицирана повсеместно. Навсякъде тя се характеризира с много слабо педогенно обогатяване и недоразвит почвен профил. В някои от локалитетите, като например “Вятово”, палеопочвата, формирана по време на MIS 3 се разполага непосредствено под съвременната (холоценска) почва. В румънските льосово – почвени *gazrezi* при Тузла, Мирча вода и Мостица отново се наблюдава подобна картина (Balescu et al. 2003, 2010; Buggle et al. 2009; Timar et al. 2010). Това показва наличието на широко застъпени ерозионни процеси по време на MIS 2 в Долнодунавската льосова област. Пробите от втория льосов хоризонт в профил “Хърлец” показват възрасти до 130 – 185 хил.г. (Фиг. 6.7), основно от анализите върху зърна от фелдшпати. Тези дати съответстват на глациала MIS 6.

Датиране на материала от нивото с видима тефра от втори льосов хоризонт на профил „Сухия кладенец“ (Плевенско)

Микроскопските наблюдения на единични частици от нивото с тефра във втори льосов хоризонт на профил „Сухия кладенец“ показват наличието на частици с типичните морфоложки характеристики на вулканска тефра от подводни магматични изригвания (Pardo et al., 2014; Ross et al., 2022) (Фиг. 6.9 a, b). Наблюдават се също така и плътни частици с гладки стени и остри ръбове (Фиг. 6.9. c, d), които в литературата са описани като резултат от бързото изстиване на магмата и фрагментацията на вулканското стъкло (Dürig et al., 2012; Cashman and Rust, 2016). Данните от елементния анализ на тези частици показват високо съдържание на желязо и манган (Фиг. 6.9 d, f).

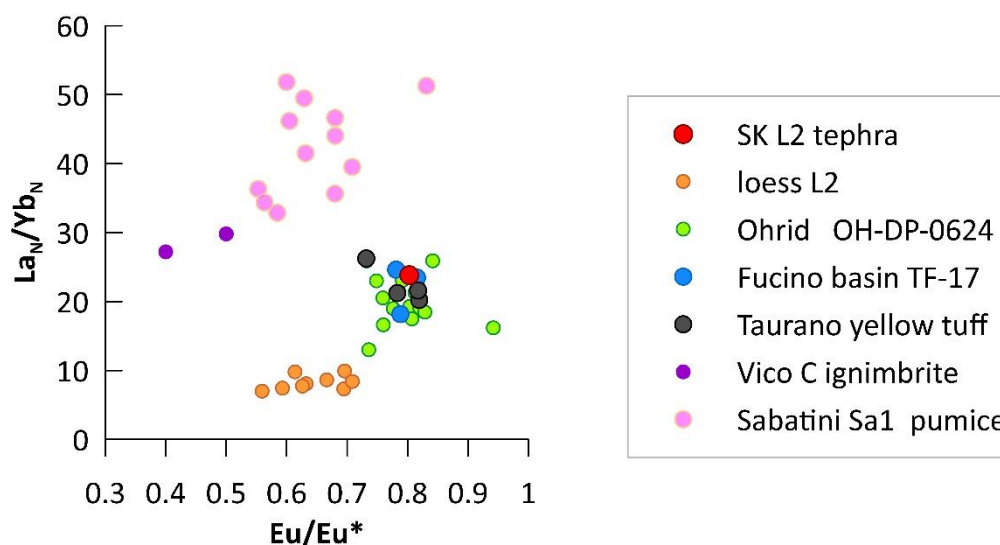


Фиг. 6. 9. Микрофотографски снимки със сканиращ електронен микроскоп на единични частици от вулканска пепел от нивото с тефра във втори льосов хоризонт на профил „Сухия кладенец“. Отдясно са показани спектрите от точковия рентгенов анализ на елементния състав.

Проведени са геохимични анализи на материала от нивото с тефра, като са определени съдържанията на главните, второстепенните и елементите – следи чрез LA-ICP-MS анализи. Използван е тефрохроностратиграфският подход, при който се сравнява наблюдаваният геохимичен състав на тефрата с геохимичните характеристики

на вулканските скали от вероятните вулкански центрове, от които би могло да произхожда отложената в лъсово – почвения разрез тефра (Lowe, 2011). Привързването на дадена тефра към вероятният ѝ източник позволява да се направи и съответното заключение относно възрастта на стратиграфското ниво от седиментния разрез, съдържащ тефрата. За избора на най-вероятните вулкански изригвания, с които да се сравни геохимичния състав на тефрата, са използвани като ориентир получените възрасти от термолуминисцентното датиране на проби от втори лъсов хоризонт за другите профили от Северна България (“Вятово”, “Каолиново”, “Хърлец”), както и датиращият интервал, получен чрез корелацията на вариациите на магнитната възприемчивост в дълбочина по профила с астрономически калибрираната световна изотопно – кислородна крива на Lisiecki and Raymo (2005). Вземайки предвид получената възрастова оценка от 164 ± 2 ka за нивото на дълбочина на видимия слой тефра в профила “Сухия кладенец” (Jordanova et al., 2022a), геохимичните данни за тефрата са сравнени с геохимичните сигнали за слоеве тефра и криптотефра на подобна възраст от други регионални палеоекологични записи, като тефрата от Охридското езеро - слой (OH-DP-0624) (Leicher et al., 2016; 2021), датиран на 159.71 ± 4.03 ky и слоя тефра TF-17 от седиментна ядка от басейна Fucino (Giaccio et al., 2017) датирана на 158.3 ± 3.0 ky. Според Giaccio et al. (2017) и компилацията на Leicher et al. (2021), най-вероятният вулканичен източник от тези добре датирани слоеве от тефра е игнимбритът Таурано (Belkin et al., 2016) с приблизителна възраст от 159.3 ± 1.6 ky.

Анализирайки геохимичните данни, бе установено, че най-добра дискриминираща роля има съпоставката на стойностите на аномалията на европия (Eu/Eu^*) с отношението на редкоземните елементи лантан и итербий, нормирани към състава на метеоритите от хондритен тип (La_N/Yb_N) (Фиг. 6.10.).



Фиг. 6.10. Графика на зависимостта между аномалията на европия (Eu/Eu^*) и отношението La_N/Yb_N за пробите от тефрата във втори лъсов хоризонт на профил „Сухия кладенец“, сравнени със стойностите на отношенията, получени от анализите на нива с (крипто)тефри от други регионални седиментни разрези и някои от възможните вулкански центрове – източници на тефрата.

Както се вижда на Фиг. 6.10, най-добро сгруппиране на данните имаме между сигнала от тефрата в профил „Сухия кладенец“ и жълтите туфити от Таурано, както и тефрата от това изригване, идентифицирана в седиментните записи от езерото Охрид и басейна Фучино. Базирайки се на резултатите, представени на Фиг. 6.10. е отхвърлена хипотезата, изказана в предишни публикации върху льосово – почвени профили от Централна и Югоизточна Европа с криптотефра във втори льос, за възможността вулканската пепел да е едновъзрастна с игнимбрита Vico – C от вулканската провинция Кампания (Marković et al., 2015; Antoine et al., 2019; Laag et al., 2021; Jordanova et al., 2022a). Както се вижда от Фиг. 6.10., аномалията на европия за Vico – C е с по-ниски стойности в сравнение с останалите данни.

Същите заключения относно източника на тефрата и нейната възраст са получени и от анализите за съдържанието на главните елементи в единични частици вулканска пепел, сепарирано от материала с тефрата (Fernandez et al., 2024). Така в резултат на проведените анализи, за пръв път е направено абсолютно датиране на широко разпространената тефра във втория льос от Централна и Източна Европа. Получената възраст от 159.3 ± 1.6 ку представлява важен хроностратиграфски маркер за льосово – почвените наслаги в Европа.

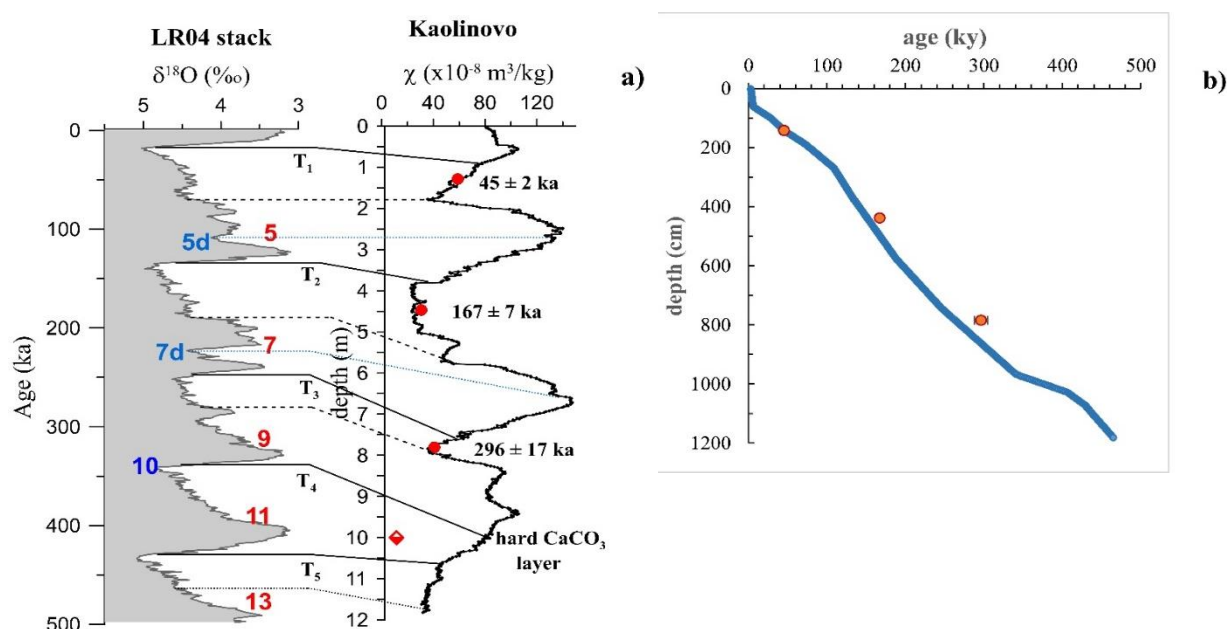
Корелациите на нивата с тефра, идентифицирани в различните седиментни записи от региона освен установяването на абсолютната възраст на тефрата дават ценна информация за пространственото проследяване на далечния атмосферен пренос на пепелта от вулканичната дейност на италианските вулкански провинции.

Датиране на нивото със слабо развита почва над втората погребана почва в разрез „Каолиново“ чрез изотопи на метеорния берилий

Проблемът с точната хроностратиграфия на недоразвитата почва, която се идентифицира в льосово – почвените отложения както в Европа, така и от Таджикистан и Китай над втората погребана почва (S₂) възниква в резултат на присъщата неточност в датите от термолуминисцентното датиране, които в този интервал от възрасти имат неточност, която е в рамките на продължителността на интервала на почвообразуване. Липсата на други геохронологички маркери е една от основните причини за този все още неразрешен проблем. Един възможен подход за преодоляване на трудностите, свързани с прилагането на термолуминисцентния метод е изследване на записите на вариациите в концентрацията на космогенни изотопи, които варират в геоложкото минало в резултат на промените в интензитета на земното магнитно поле (Elsasser et al., 1956). Особено подходящ в това отношение е космогенният изотоп на берилия -¹⁰Be, който има дълъг период на полуразпад (1.39 млн.г.) (Korschinek et al., 2010). Той се формира в атмосферата, след което бързо се адсорбира върху аерозолни частици. Изотопите на берилия (¹⁰Be) се акумулират на земната повърхност чрез мокро отлагане (валежи от дъжд и / или сняг) (Baumgartner et al., 1997). Тъй като продукцията на изотопа е обратно пропорционална на интензитета на геомагнитното поле, изследването на ¹⁰Be в льосовите седименти е един от популярните методи за идентификация на палеомагнитни

екскурзии и инверсии на ЗМП през глациалния плейстоцен (Raisbeck et al., 2006; Simon et al., 2018). Освен интензитета на геомагнитното поле, други фактори, изграещи роля за формиране на общата концентрация на ^{10}Be в седиментите и почвите са слънчевата активност, атмосферната циркулация и валежи, както и разреждащия ефект от отлагането на прахови частици (лъосонатрупването) (Heikkilä et al., 2009, 2013; Graly et al., 2011).

За използване на данните от изотопните анализи на метеорния берилий с цел датиране, е необходимо първоначално да се построи времеви модел за профила. На Фиг. 6.14. е показан корелативния модел и използваните корелационни максимуми и/или минимуми от кривите на магнитната възприемчивост за профил „Каолиново“ и изотопно – кислородната крива LR04.



Фиг. 6.14. Корелативен метод за построяване на времеви модел за лъосово – почвен профил „Каолиново“, кариера „Дойранци“.

На Фиг. 6.14.б е представена зависимостта на пресметнатата възраст от дълбочината чрез използвания времеви модел (корелация). Доброто съответствие с датите от термолуминисцентното датиране е в подкрепа на реалистичността на модела.

Съдържанието на метеорен берилий ^{10}Be е определено за 49 броя проби от различни нива от профилите No 2 (Каолиново 2017/2019) и 4 (профил Кус 2019) от района на гр. Каолиново. Анализите са направени в рамките на международно сътрудничество с проф. Софи Корну (CEREGE, Aix Marseille Univ., France), като измерванията са проведени с ускорителния мас спектрометър ASTER.

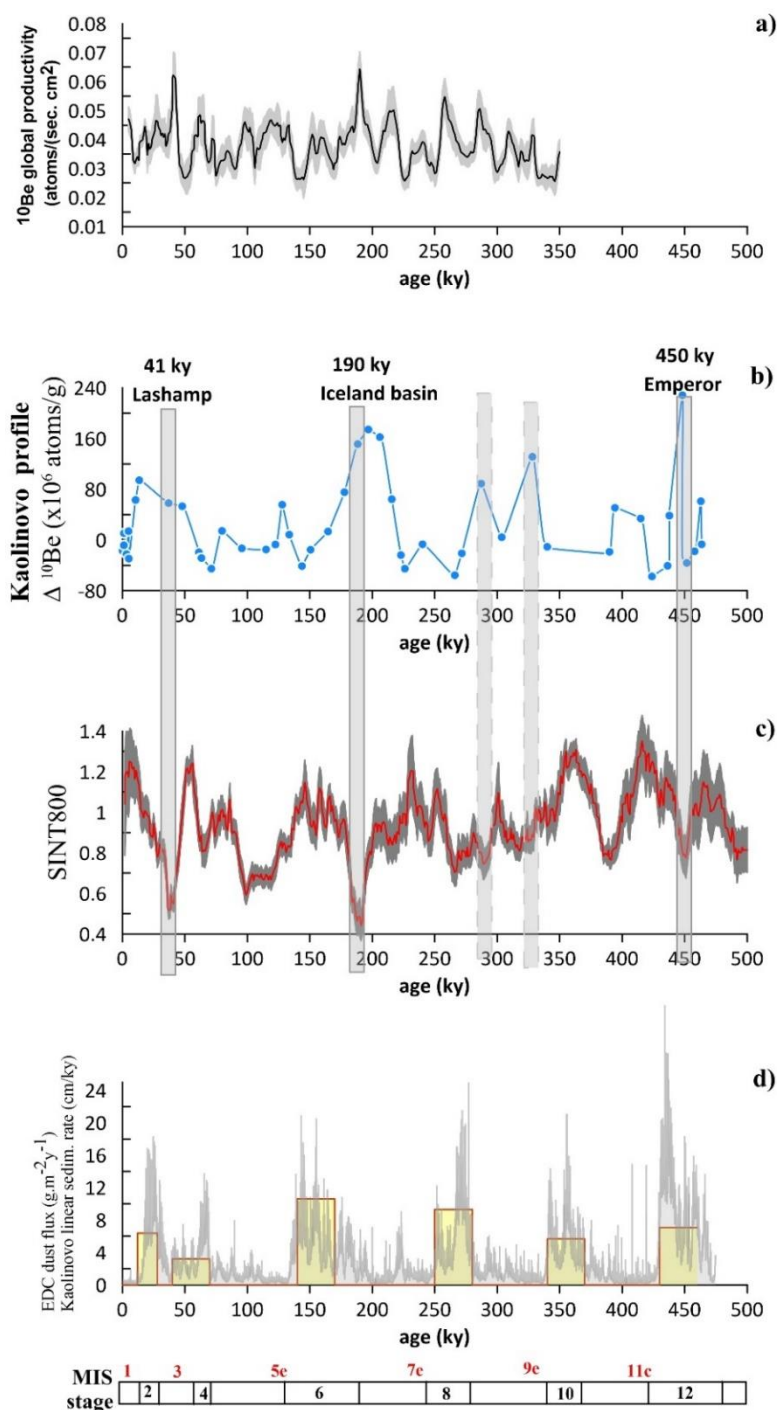
Използването на комбинация от магнитни и изотопни данни за лъсово – почвени профили с цел извличане на информация за поведението на интензитета на древното геомагнитно поле и палеовалежите, са работите по китайския лъос (Zhou et al., 2007a; 2010; 2014; 2015; An et al., 2014). В тези изследвания се приема, че източникът на прахов материал е един и същ за всички лъсови хоризонти, и следователно унаследеното количество изотопи на берилия, което е акумулирано в лъсовия материал преди началото на почвообразуването, е постоянно. Това допускане се базира на наблюдаваната силна корелация между измерената магнитна възприемчивост (χ) и съдържанието на метеорен берилий ^{10}Be . Тъй като е установено, че педогенната магнитна възприемчивост се определя най-вече от количеството валежи (Maher and Thompson, 1995; Maher et al., 2003), регресионното уравнение, даващо връзката между (χ) и ^{10}Be позволява да се намери „моделираното“ („предсказаното“) количество ^{10}Be , дължащо се на вариациите в количеството валежи в рамките на геоложкия период от време. Разликата между измереното и „предсказаното“ количество ^{10}Be се приема за сигнала, модулиран от вариациите в интензитета на земното магнитно поле.

В настоящето изследване е изчислен т.нар. „фонов“ сигнал в лъсовите хоризонти чрез пресмятането на т.нар. „фенова магнитна възприемчивост“ (χ_{bg}). Разликата ($\chi - \chi_{bg}$) е частта от (χ), която се дължи на педогенното магнитно обогатяване и се означава като (χ_{pedo}). Съществена особеност на изследвания профил е преобладаващия принос на стабилни еднородни частици магнетит / магхемит в магнитното обогатяване на разреза за дълбочините 8 – 12 м. Поради това е възприета хипотезата, че за тази част от профила по-добра оценка на количеството валежи ще се получи чрез магнитното отношение $\text{ARM}/\text{IRM}_{100\text{mT}}$, което е чувствително към присъствието на стабилни еднородни магнетити / магхемити (Maxbauer et al., 2016)), а не чрез χ_{pedo} .

Вземайки пред вид ниската скорост на седиментация в района на изследване и възможните различни източници на прахов материал, даващи принос към лъосонатрупването през различните глациални епохи, взаимовръзката между магнитните параметри и измерените концентрации на метеорния берилий (^{10}Be) е разгледана поотделно за всяка двойка лъос – палеопочва. Пресметнати са линейните регресии, апроксимиращи линейната връзка между магнитните индикатори за количеството валежи (χ_{pedo} или $(\text{ARM}/\text{IRM}_{100\text{mT}})_{pedo}$) и измерените концентрации на ^{10}Be ($^{10}\text{Be}_m$). Използвайки регресиите като трансферни функции, от магнитните данни са пресметнати „апроксимираните“ стойности $^{10}\text{Be}_{est}$, отговарящи на количеството берилий в материала, повлияно от климата, т.е. от валежите. Големината на разликата $^{10}\text{Be}_m - ^{10}\text{Be}_{est} = \Delta^{10}\text{Be}$ представлява сигнала, отразяващ модулацията в продукцията на изотопите на ^{10}Be в резултат на изменението в интензитета на земното магнитно поле (Zhou et al., 2014).

Вариациите на $\Delta^{10}\text{Be}$ за профил „Каолиново“ са представени на времевата скала, съгласно конструирания времеви модел (Фиг. 6.16), заедно с кривите на вариациите на интензитета на земното магнитно поле за последните 500 хил.г. (SINT800 от работата на Guyodo and Valet (1999)), реконструкцията на глобалния запис на продукцията на ^{10}Be за

последните 350 хил. г. (Simon et al., 2018), както и записа на праховия поток (dust flux) в ледената ядка от Антарктида EPICA Dome C (Lambert et al., 2012).



Фиг. 6.16. Сравнение на компонентата от $^{10}\text{Be}_{\text{meteoric}}$, отразяваща вариациите в интензитета на геомагнитното поле ($\Delta^{10}\text{Be}$): а) записа на глобалната продукция на ^{10}Be за последните 300ky (Simon et al., 2016); с) синтетичния запис на вариациите в интензитета на ЗМП - SINT800 (Guyodo and Vallet, 1999), и d) запис на скоростта на отлагането на прах в ледената ядка EPICA Dome C (Lambert et al., 2012). Върху вариациите в количеството отложена прах е насложена схемата с изчислените скорости на седиментация за профил „Каолиново“.

Вариациите на $\Delta^{10}\text{Be}$ се характеризират с наличието на четири добре изразени максимума – около 190 хил.г., 290 хил.г., 330 хил.г. и 450 хил.г. Положителните аномалии на кривата на $\Delta^{10}\text{Be}$ корелират добре с ниския интензитет на геомагнитното поле по време на екскурзиите на полето Lashamp (41 ky), Iceland Basin (190 ky) и Emperor (450 ky) (Channel et al., 2020), както и с вариациите в продукцията на ^{10}Be , която се модулира от интензитета на ЗМП. Идентифицирането на екскурзията *Iceland basin* в нивото на слаборазвитата почва над педокомплекса на S_2 позволява да се реши дискуссионния въпрос относно времето ѝ на формиране и корелацията с изотопно – кислородната крива на изменение на глобалния климат. Съгласно получения резултат, недоразвитата почва е резултат от почвообразуване по време на интерстадиал в рамките на глациала MIS 6.

Кремъчна находка от ранния палеолит в профил „Каолиново“ 1

При теренните работи за събиране на проби от профил „Каолиново“ (2011 г.) е намерена кремъчна находка в близост до профил 1, вметена в глинестия хоризонт на третата погребана почва (S_3) (Фиг. 6.17.).

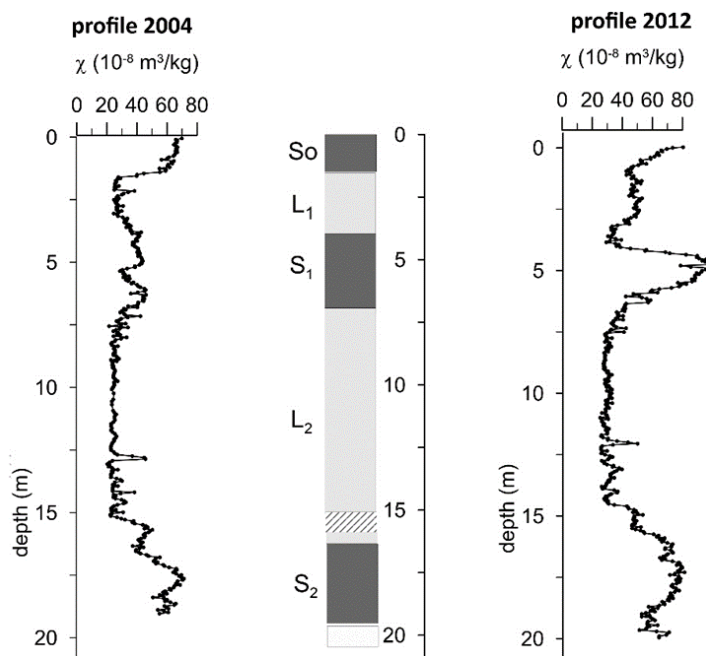


Фиг. 6.17. Фотографии на кремъка, намерен в дъното на третата погребана почва от профил „Каолиново“.

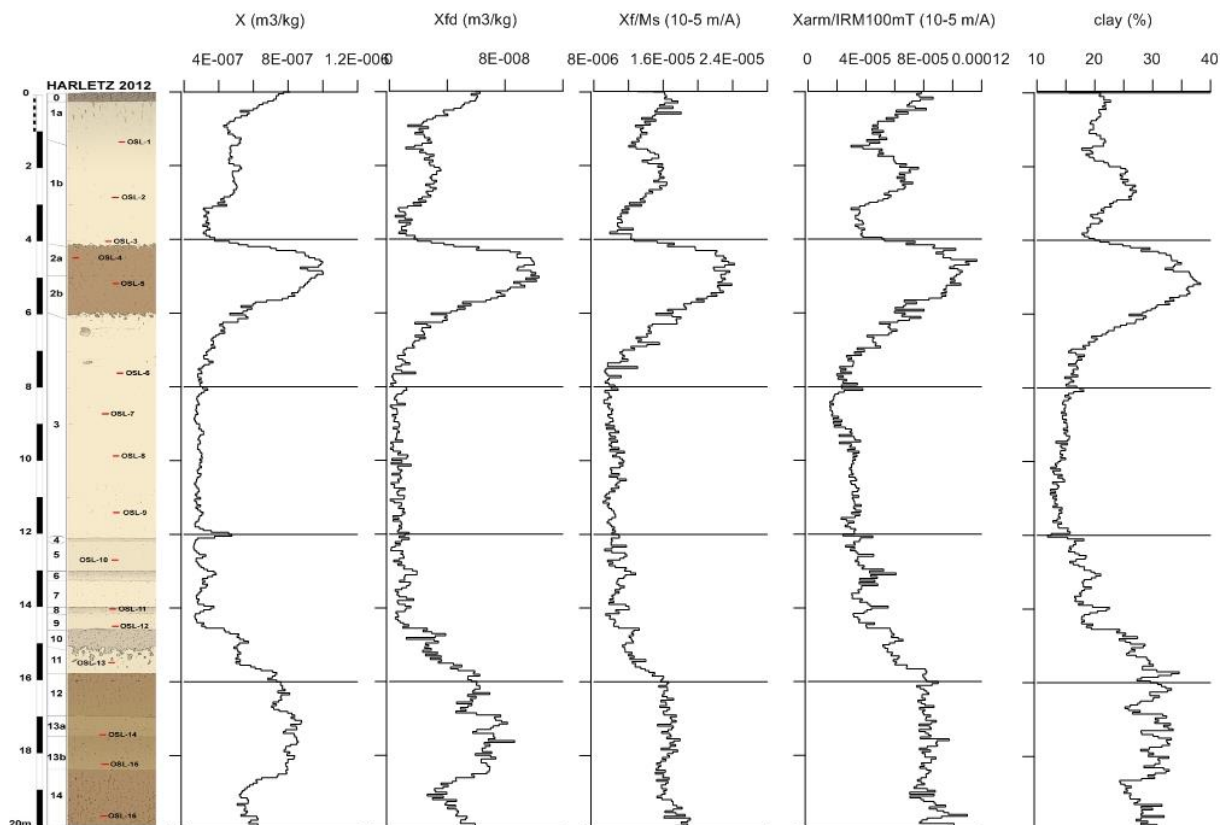
Кремъкът има ясни следи от обработка (ретуш) (проф. Н. Сираков, устна консултация). Находката е единична, но самата локация се намира в район, известен като източник на кремъци (тип Лудогорие) от района на СИ България (Andreeva et al., 2014;

Gurova et al., 2022). Използвайки възприетия модел за възрастта на нивата от профила (Фиг. 6.14), възрастта на нивото на третата палеопочва, съответстващо на стратиграфската позиция на кремъка е оценена на 360 хил г. Това съответства на интергласиалния период MIS 11, за който са изказани хипотези за нарастване на човешката популация и по-гъсто населени територии в Европа (Szymanek and Julien, 2018). В подкрепа на настоящата хипотеза е и наличието на кремъчни сечива с възраст 300 – 400 хил.г., датирани чрез термолуминисценция на вместиците седименти, от територията на Румъния, археологическият обект Деалул Гуран (Iovita et al., 2012, 2014; Dobos and Iovita, 2016).

В Глава 7 „Магнитни свойства и характеристики на лъсово-почвените профили от Северозападна България“ са представени резултатите от магнитните изследвания на три профила: „Гомотарци“, „Орсоа“ и „Хърлец“. Характерна особеност за всички тях е наличието на засилена ерозия на холоценската и/или първата погребана почви. Това се наблюдава особено добре при с. Хърлец, където са изследвани два разреза, разположени на около 500 м разстояние. При първия профил, опробван през 2004 г. първата погребана почва е представена от тънък хоризонт със слабо магнитно обогатяване. За разлика от този случай, първата погребана почва във втория опробван разрез е представена с пълен профил, дебелина от 1.5 м и висока магнитна възприемчивост (Фиг. 4.10.).



Фиг. 4.10. Литостратиграфска колонка на профил „Хърлец“ и вариации на магнитната възприемчивост в дълбочина по двата опробвани разреза.

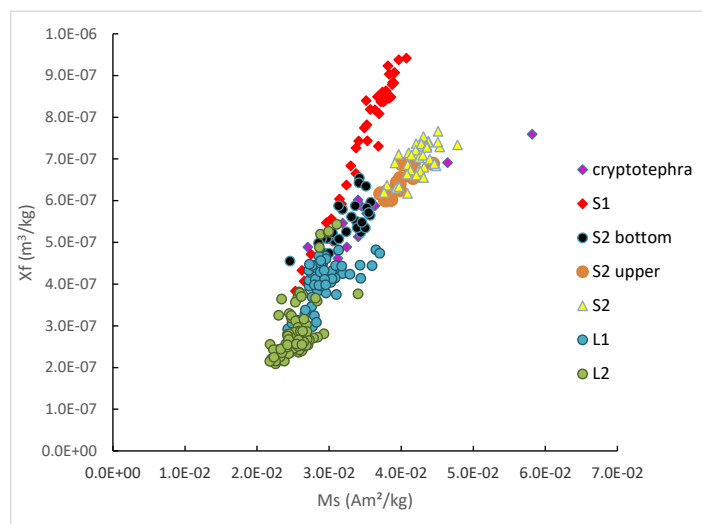


Фигура 7.6. Вариации в дълбочина по профил „Хърлец“ на магнитните характеристики, отразяващи измененията в ефективния размер на феримагнитните частици и съдържанието на глина.

Представителен разрез за района на западната част на Дунавската равнина е профил „Хърлец“. Вариациите на магнитната възприемчивост (χ) и на честотно - зависимата магнитна възприемчивост (χ_{fd}) (Фиг. 7.6) показват, че изследваният профил представлява подробен и високо разделителен запис на палеоклиматичните условия в Северна България за последните 100 хил. години. Палеопочвите S_1 и S_2 се характеризират с ясно изразено магнитно обогатяване с наночастици от педогенни железни окиси, за които са получени максимални стойности на честотно зависимата магнитна възприемчивост (χ_{fd}). Слаборазвитата палеопочва в L_1 ясно се очертава от относителното нарастване на концентрацията на суперпарамагнитни частици (SP), отразено в повишените стойности на честотно-зависимата магнитна възприемчивост (χ_{fd}) и (χ/M_s), както и отношението χ_{ARM}/IRM_{300mT} , индикиращо нарастване на фракцията стабилни еднодоменни до дребни псевдоеднодоменни частици (SSD-PSD).

Друг основен проблем, свързан с реконструкциите на палеоклиматичните условия по време на формирането на отделните хоризонти, е дали има промяна в свойствата на първичния ситнозем. Това от своя страна би било индикация за промяна в източника на материал или силата на вятъра по време на льосонатрупването. За целта е изследвана зависимостта на намагнитеността на насищане M_s от магнитната възприемчивост (Фиг.

7.8). Наблюдава се оформянето на трендове с различен наклон дори и за образците от непроменените льосови хоризонти, което вероятно отразява изменения в ефективния размер на детритната фракция. Педогенно модифицираните хоризонти следват тези три очертани тренда.



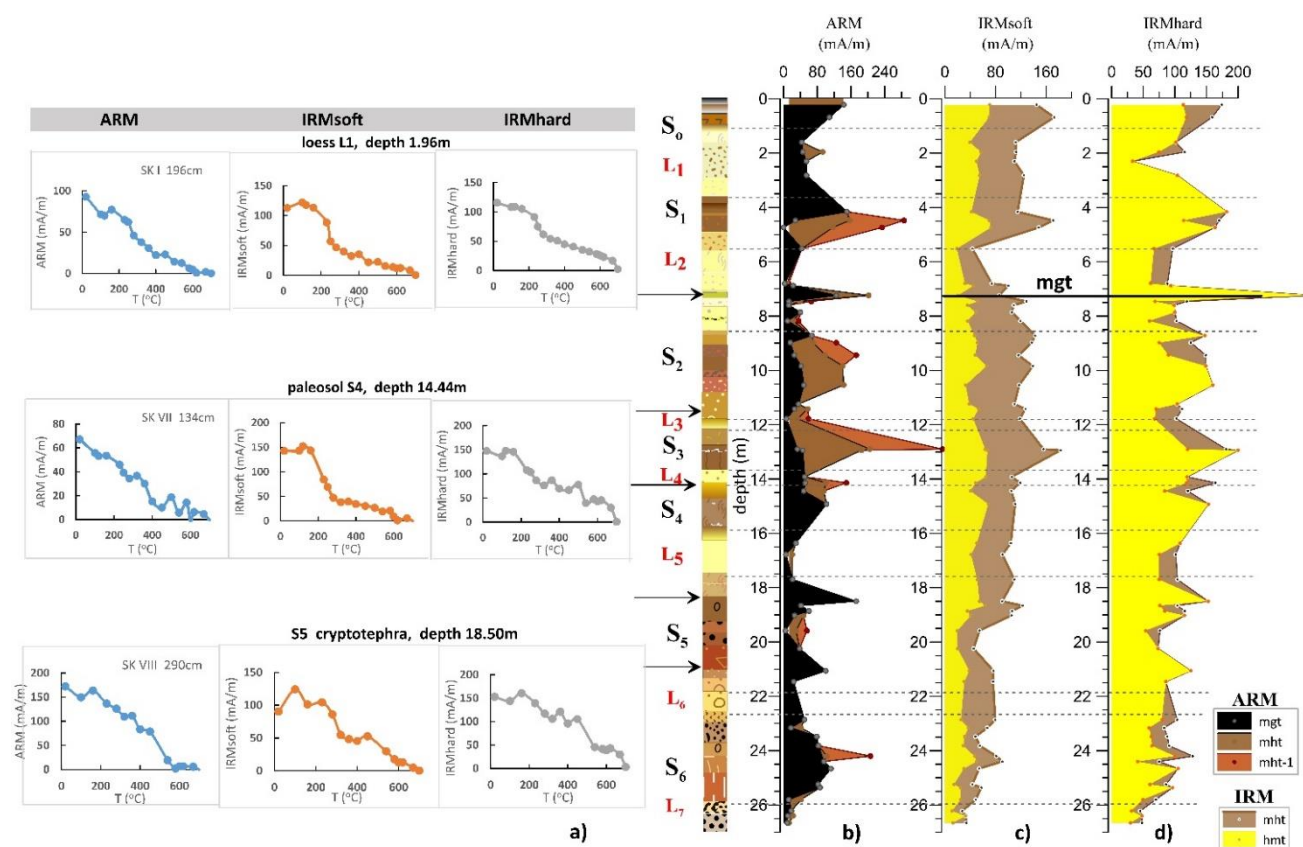
Фигура 7.8. Зависимост между магнитната възприемчивост (χ) и намагнитеността на насищане M_s . Различните символи отговарят на различни хоризонти от профила.

На базата на получените характеристики на слабо развитите почвени хоризонти в разреза при с. Хърлец може да се направи извода, че те отразяват епизоди с продължителност няколко стотици години, по време на които динамиката на ветровете е силно намалена. Това позволява развитието на тревиста (степна) растителност в условията на малко по-влажен климат. Цикличното редуване на льосонатрупване и все по-слабо почвообразуване в по-старата част на втория льосов хоризонт (под нивото с криптотефра) говори за стъпаловидна еволюция към все по-аридни и напълно глациални условия. Такава еволюция вероятно отразява комплексен преход към плени - глациални условия, подобно на наблюдаваните в други Европейски льосови разреза от началото на последната глациална епоха (Haesaerts and Metsdagh, 2000; Antoine et al., 2016, 2000, Schirmer, 2016).

В Глава 8 „Магнитни свойства и характеристики на льосово - почвените профили от Централна Северна България („Сухия кладенец“, „Любеново“) са компилирани данните за магнитната минералогия и вариациите на набор от магнитни характеристики за два от най-дългите и детайлно изследвани льосово – почвени профили от Северна България. Този район е особено интересен от гледна точка на разположението му като пресечна точка на двата основни ветрови потока: от запад – в западната част на Дунавската равнина, и другият – от изток – североизток в Североизточна България. Следователно, льосово – почвените разреза от този район ще интегрират в записите си не само ефектите от промените в климата, но също така и евентуалните промени в източника на материал по време на льосонатрупването през глациалните епохи на плейстоцена.

Като представителен профил за Централна Северна България считаме разреза „Сухия кладенец“, който е опробван с висока резолюция и се характеризира с наличието на няколко нива с криптотефра, освен видимия слой вулканска пепел в средата на втория льосов хоризонт. Детайлните магнито – минералогични изследвания за многобройни нива от профила дават важна информация както за интензивността и типа почвообразуване по време на интергласиалните епохи, така и за вариациите в свойствата на льосовите хоризонти.

За установяване на носителите на остатъчна намагнитеност е проведено стъпково температурно размагнитване на съставна намагнитеност (IRM_{2T} по оста +z, $IRM_{0.2T}$ по оста +y, и ARM_{100mT} по оста (+x)) от стайна температура до $700^{\circ}C$. Избрани примери от проведеното размагнитване са показани на Фиг. 8.1. Компонентата с безхистерезисната намагнитеност ARM е със значителна големина в общата намагнитеност и показва постепенно намаляване до достигане на пълно разблокиране с T_6 в интервала $580-600^{\circ}C$ за образците от палеопочвите S_1 , S_2 , S_3 (Фиг. 8.1a).

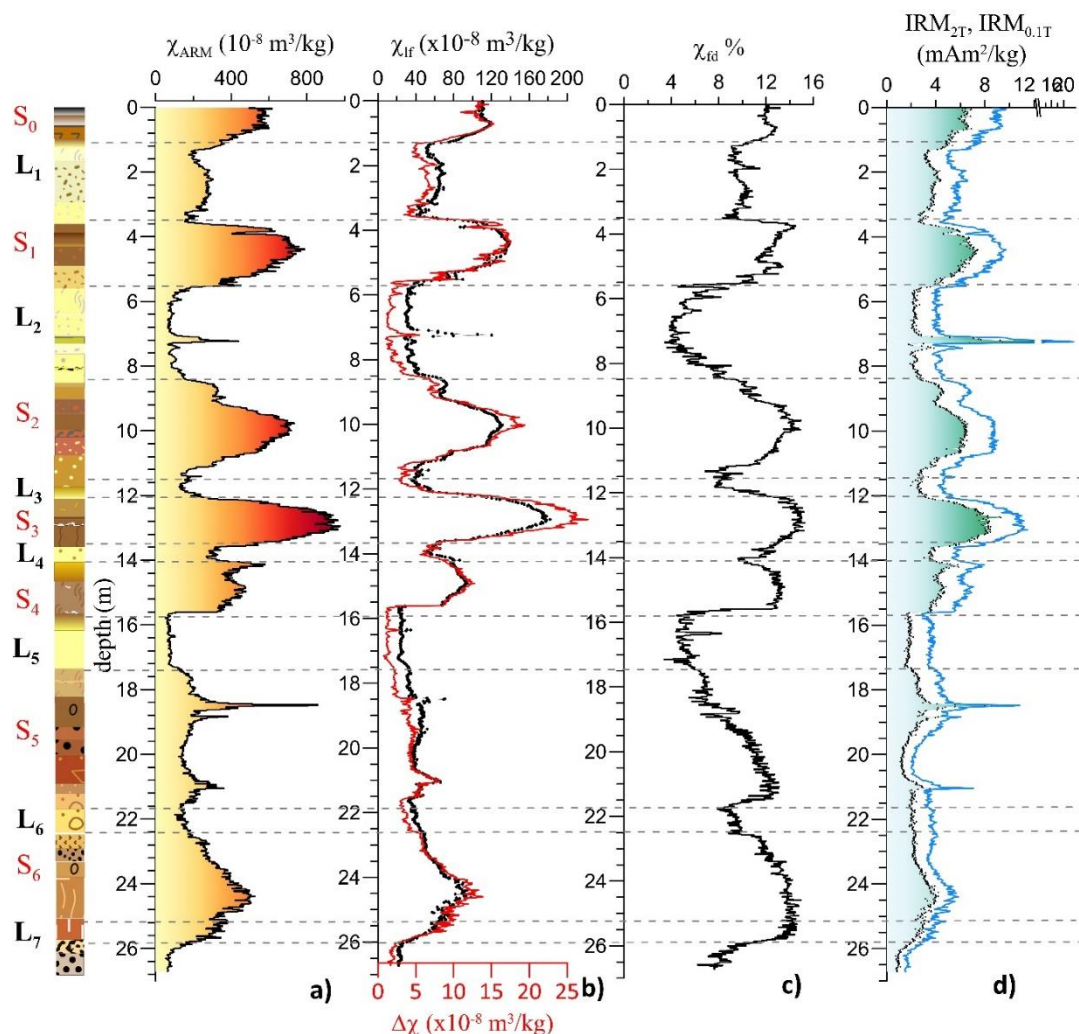


Фигура 8.1. а) Примери от температурното стъпково размагнитване на съставна остатъчна намагнитеност (ARM , IRM_{soft} , IRM_{hard}) за образци от льос, палеопочва и от ниво с крипто-тефра от петата палеопочва; б) Вариации в дълбочина на интензитета на отделените магнитни фази в трите компоненти – ARM (b), IRM_{soft} (c) IRM_{hard} (d). На легендата са указани магнитните фази, идентифицирани в кривите на размагнитване на ARM и IRM (mgt – магнетит; mht – магхемит; mht-1 – температурно стабилен магхемит, hmt – хематит).

Температурното размагнитване на магнитно меката компонента (IRM_{soft}) показва систематично поведение за всички анализирани образци. IRM_{soft} намалява рязко в интервала 250 – 320 °C, а напълно се размагнитва на 700 °C (Фиг. 8.1). Магнитно твърдата компонента (IRM_{hard}) се характеризира с разблокиране при 700 °C, а ниско - температурна T_6 на около 250 °C се наблюдава за образците от льосови хоризонти, както и за тези от палеопочвите S_1 и S_2 (Фиг. 8.1a). Разглеждайки получените T_6 от трите компоненти, съответните магнитни фази са идентифицирани по следния начин: 1) ARM се носи от магнетит с $T_6 = 580 - 600$ °C и от магхемит с T_6 или температура на трансформация в интервала 250 – 400 °C; 2) IRM_{soft} се носи от хематит с $T_6 = 700$ °C и магхемит с горните характеристики; 3) IRM_{hard} се носи от магхемит и от хематит (Dunlop and Özdemir, 2013). На Фиг. 8.1b са показани вариациите в интензитета на всяка от минералните фази в трите компоненти в дълбочина по разреза. Вариациите в дълбочина на интензитета на компонентите на ARM, носени от магнетит и магхемит (Фиг. 8.1b) показва, че магхемитът се проявява основно в горните 13 метра от профила чрез значителен принос в магнитния сигнал по цялата мощност на палеопочвите S_3 и S_2 , както и в долната част на S_1 . Магхемит е идентифициран и като носител на компонентата IRM_{soft} , като интензитетът на тази магхемитова компонента е по-нисък под дълбочина 13 м, подобно на ARM компонентата, която се носи от магхемит (Фиг. 8.1b). Същевременно обаче, разблокиращата температура или тази на трансформация на магхемита в IRM_{soft} са систематично по-ниски (280 – 300 °C) в сравнение с тази в ARM. Разблокиращите температури на магхемита, съдържащ се в компонентата IRM_{hard} са дори още по-ниски – на около 250 °C. Така, интензитетът на намагнитеностите, носени от магхемит (и следователно, неговата концентрация), са най-високи в горните 13 м от разреза. Горната част на L_2 и цялата мощност на L_5 се характеризират със забележимо понижение на интензитета на ARM, което предполага, че тези два льосови хоризонта са най-слабо изветрели в рамките на разреза „Сухия кладенец“. Твърдата компонента в IRM (IRM_{hard}) (Фиг. 8.1d) се носи основно от хематит, който показва рязко разблокиране на $T_6 \sim 700$ °C. Интензитетът на този висококоерцитивен хематит се изменя систематично в дълбочина, като показва максимуми в концентрацията в палеопочвите (Фиг. 8.1 d). Това предполага педогенен произход на висококоерцитивния хематит в профила. Педогенен хематит с по-дребни размери на частиците, които не могат да носят остатъчна намагнитеност и са в суперпарамагнитно състояние, също е често срещан в почвите (Long et al., 2015; Jiang et al., 2018), развити в по-топъл климат (Cornell and Schwertmann, 2003; Long et al., 2015, 2016; Gao et al., 2018). Синхронните вариации в интензитета на магхемитовата компонента в IRM_{soft} и ARM в рамките на палеопочвите S_3 , S_2 и S_1 подкрепят хипотезата, че те представляват една популация с общ педогенен произход. В горните 13 м от разреза се наблюдава по-значителен принос на магхемита към педогенната магнитна компонента, докато магнетитът доминира в долните части на разреза (в палеопочвата S_4 и особено в S_6). Този забележим контраст би могъл да се дължи на т.нар. климатичен преход в средата на епоха Брюнес (mid-Bruhnes climate transition) (Ao et al., 2020; Barth et al., 2018).

Описаните вариации в типа и концентрацията на магнитните минерали, носещи педогенния и седиментния сигнал в разреза определят и контраста между магнитното

обогатяване на палеопочвите, нивата с (крипто)тефра и льосовите хоризонти. Както се вижда от Фиг. 8.2 а, b, холоценската почва S_0 и палеопочвите S_1 , S_2 и S_3 , характеризиращи се с високо съдържание на магхемит (Фиг. 8.1 b, c) показват силно магнитно обогатяване в сравнение със слабо магнитните льосови хоризонти.



Фигура 8.2. Вариации на основните магнитни параметри в дълбочина по профила SK (безхистерезисна възприемчивост (χ_{ARM}), магнитна възприемчивост (χ) и честотно-зависима магнитна възприемчивост ($\Delta\chi$); процент честотно-зависима магнитна възприемчивост ($\chi_{fd}\%$), остатъчна намагнетеност на насищане (IRM_{2T}), остатъчна намагнетеност, получена в слабо поле $0.1T$ ($IRM_{0.1T}$).

Безхистерезисната възприемчивост (χ_{ARM}), която е индикатор за наличие на стабилни еднородни магнетитови частици (Maher, 1988), варира в широки граници в дълбочина по профила (Фиг. 8.2a). Освен високите стойности, характерни за палеопочвите, в χ_{ARM} се наблюдават високи и остри максимуми, съответстващи на дълбочините с наличие на

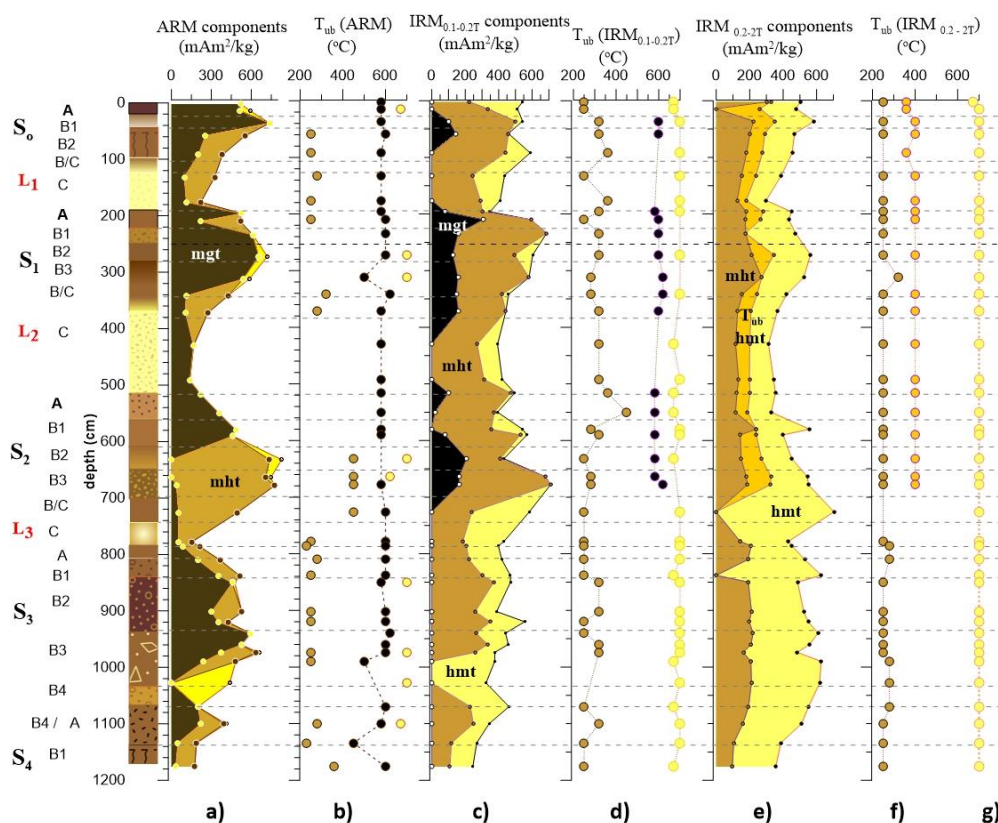
видима тефра (7.20 м), както и в няколко по-дълбоки нива – 14.10 м., 18.48 м., 18.80 м., 21.00 м.

Както се вижда от Фиг. 8.2, всяко ниво с (крипто)тефра се характеризира с аномални стойности на различни магнитни параметри спрямо вместилия материал. Това означава, че вулканските източници на тези пепели или имат различна минералогия, или имат различни ерупционни характеристики. Микроскопските наблюдения и рентгенови анализи на тефрата от L₂ и от фракции от криптотефрите дават допълнителна информация относно морфологията и размерите на пепелните частици в тях. Изследваните частици са с едри размери, типично в интервала 50–100 µm. Тъй като в криптотефрите се наблюдава максимум в сигнала на ARM, такива едри частици едва ли са моно-минерални, а по-скоро съдържат силно магнитни фини включения с нано-размери (т.нар. нанолити), които носят безхистерезисна намагнитеност (ARM). Израстването на такива добре изкристализирани нанолити от магнетит е наблюдавано в експериментално получена базалтова пемза, както и в естествени базалти от Етна (Di Genova et al., 2020, 2018). Авторите на това изследване показват, че нанолити от кристалинен магнетит с размери 10–20 nm до 50 nm съставляват по-малко от 4% от обема на скалата, но играят важна роля за увеличаване на вискозитета на магмата. Този вискозитет съдейства за нейната фрагментация при изстиването и издигането нагоре, което от своя страна определя типа на изригването.

В Глава 9 „Магнитни свойства и характеристики на лъсово - почвените профили от Североизточна България“ са систематизирани резултатите от магнитните изследвания на профилите „Вятово“, „Каолиново“, „Коритен“, „Русе“, „Генерал Тошево“ и „Дуранкулак“.

Най-комплексни и детайлни изследвания са проведени за лъсово – почвените профили от района на гр. Каолиново. Освен високо разделителното опробване с интервал 2 см, важността на получените резултати се допълва и от проведеното термолуминисцентно датиране на проби от лъсовите хоризонти L₁, L₂ и L₃ (Глава 6, Balescu et al., 2020), както и изследванията на изотопите на берилия в представителни проби от разреза, които също допринасят за датиране на нивото от слаборазвитата почва над S₂ (Глава 6). Тук ще представим основните резултати от магнитните и педоложки анализи за разрез „Каолиново“, даващи ценна информация относно еволюцията в палеоекологичните условия, при които е станало формирането на лъсово – почвените наслаги от района.

Изменението в магнитната минералогия в дълбочина по профила е оценено чрез набор от диагностични лабораторни методи. Анализът на резултатите от проведения експеримент, леко модифициращ методиката на Лоури (Lowrie, 1990) позволи да се оцени приносът на различните окиси на желязото към остатъчната намагнитеност (Фиг. 9.9).

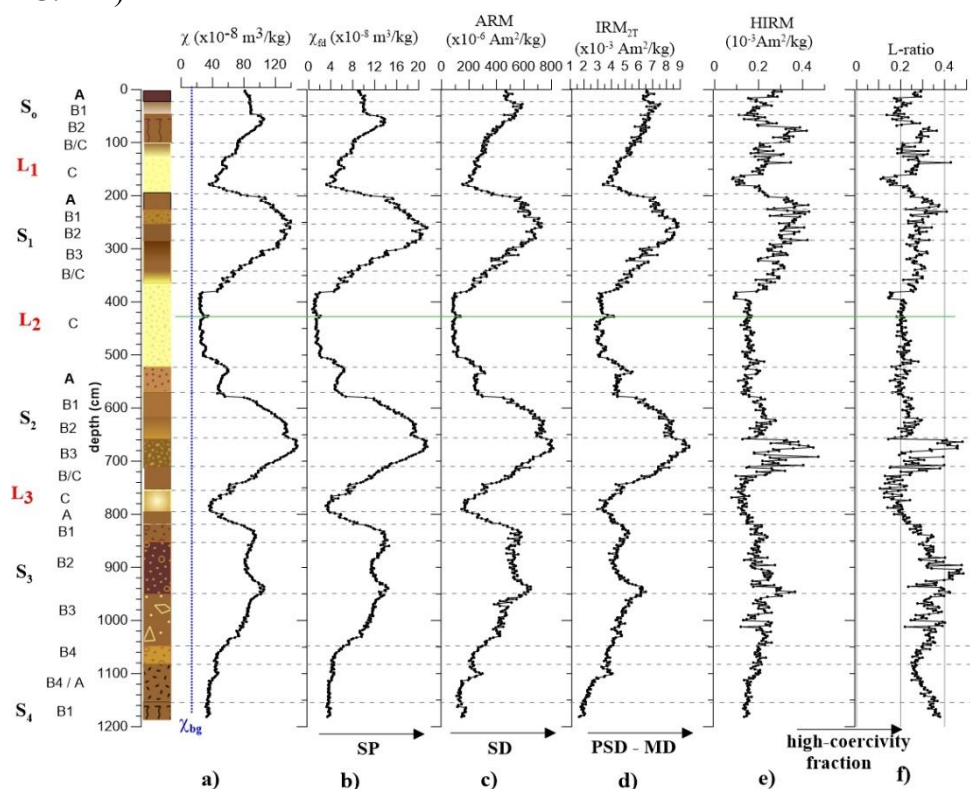


Фигура 9.9. Вариации в дълбочина по профила на интензитета (а, с, е) на трите компоненти от температурното размагнитване на съставната намагнитеност и на определените за всяка компонента разблокиращи температури (b, d, f).

Вариациите в дълбочина на интензитета на намагнитеностите, съответстващи на определена T_b (т.е. различни магнитни минерали) (Фиг. 9.9) показват, че в горните 800 см от профила магнетитът има вариращ принос, който нараства в холоциенската почва и във втората палеопочва (Фиг. 9.9). Това показва, че магнетитът присъства както в еоличната детритна фракция, така и в педогенната, формирана “*in situ*” компонента. Появата на магхемитова фаза в долните части на холоценската почва и първата палеопочва може да се свърже с повърхностно окисление на детритните магнетитови частици по време на почвообразуването. Най-вероятно този окислен слой се състои от магхемит, който е нестабилен спрямо нагряване и се трансформира в хематит (Dunlop and Özdemir, 1997). В най-долната част на профила (дълбочини > 780 см) отново магнетит и магхемит с $T_b = 250^\circ\text{C}$ са носителите на ARM. Магнитният педогенен сигнал за дълбочини под 800 см се носи от смес от магнитни фази в различна пропорция. Преобладаващият принос на хематита се демонстрира и от разблокиращите температури на съставната намагнитеност в по-старите палеопочви. Може да се предположи, че тази хематитова фаза има педогенен произход поради специфичната ѝ ниска коерцитивност и ниски разблокиращи температури. Вариациите на магнитната минералогия в дълбочина по профила (Фиг. 9.9) показват, че по-старите интергласиални епохи се

характеризират с по-топъл климат, както може да се предположи от присъствието на увеличаващо се количество хематит с дълбочина. Сходни вариации в магнитните характеристики са получени в работата на Buggle et al. (2014) за льосово - почвените профили „Стари Сланкамен“ (Сърбия) и „Мирча Вода“ (Румъния). Силно доказателство за рязка смяна в палеоклиматичните условия в района на гр. Каолиново след глациалния стадий MIS 8 (съответстващ на третия льосов хоризонт) е наблюдаваното рязко увеличение на коерцитивността на хематитовата компонента в посока към повърхността. Преобладаващото присъствие на ниско - коерцитивен хематит в долната част на разреза вероятно се дължи на наличието на Al-замествания в структурата на хематита.

Магнитното обогатяване на холоценската почва и палеопочвените хоризонти от профила е ясно изразено (Фиг. 9.11 а-с). Най-силно обогатяване се наблюдава в В₃ хоризонта на втората палеопочва, което е добре изразено във всички параметри - χ , χ_{fd} , ARM и IRM_{2T} до дълбочина 680 cm (Фиг. 9.11 а - d). Различни по характер вариации се наблюдават в параметъра HIRM – в него се забелязват три интервала с повишени стойности, съответстващи на В₂-хоризонта на холоценската почва, всички хоризонти от палеопочвения комплекс S₂ и В₃ хоризонта на S₃. В най-долната част на разреза палеопочвите S₄ не се разграничават, а в тях остатъчната намагнитеност, носена от високо – коерцитивни минерали (HIRM) има сравнително постоянна ниска стойност (Фиг. 9.11 е).

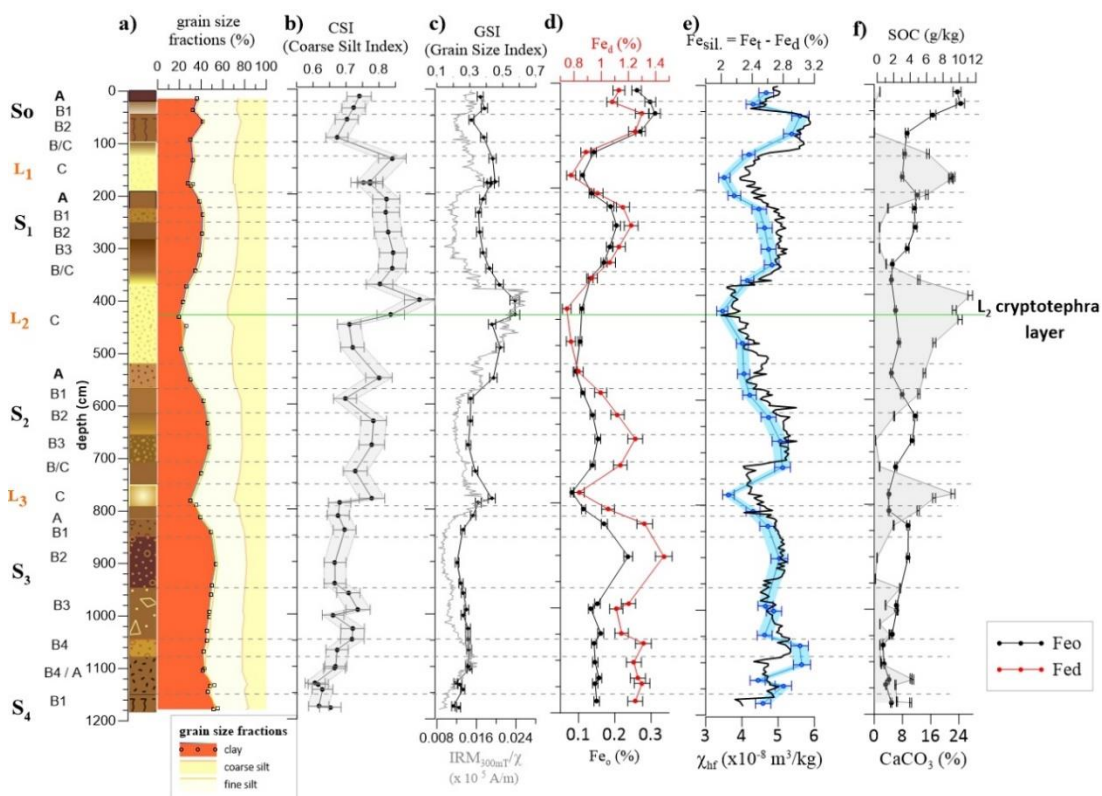


Фигура 9.11. Вариации в дълбочина по профил „Каолиново“ (КАО) на основните магнитни характеристики, зависещи от концентрацията на магнитните минерали.

Синхронните промени в χ , χ_{fd} , ARM и IRM_{2T} (Фиг. 9.11 а-d) показват наличието на широк спектър от размери на частиците на педогенната магнитна фракция (SP – вискозни – SD – PSD) магнетити и магхемити, образувани в процеса на изветряне на

първичните детритни минерали в еоличния прахов материал в присъствието на органика по време на топлите периоди (Maher, 2016).

Геохимичните и гранулометричните анализи, проведени за избрани представителни образци от всеки хоризонт от профила, са използвани за характеризиране на промените в условията на отлагане на първичния лъсов материал, степента на изветряне и педогенните изменения. На Фиг. 9.13 са показани вариациите в дълбочина на относителното количество глина clay ($< 2\mu\text{m}$), фина прах (fine silt ($2 - 20\mu\text{m}$)), едра прах (coarse silt ($20-50\mu\text{m}$)) и пясък (sand ($0.2 - 2\text{mm}$)), Grain Size Index (GSI) = coarse silt / (clay + fine silt) (Rousseau et al., 2002) и Coarse Silt Index (CSI) = coarse silt / fine silt (Schirmer, 2016). Глинестата фракция е обогатена във всички (палео)почвени хоризонти с тенденция на увеличаване в по-дълбоките хоризонти. Максималното съдържание на глина се наблюдава на дълбочина 902 см (B_2 хоризонт на S_3), достигайки 53%. Лъсовите хоризонти се характеризират с по-ниско глинесто съдържание (20 – 30%) (Фиг. 9.13 а), но не пренебрежимо. Това завишено съдържание на глинеста фракция в лъсовите хоризонти се дължи на по-южното разположение на разреза спрямо р. Дунав.

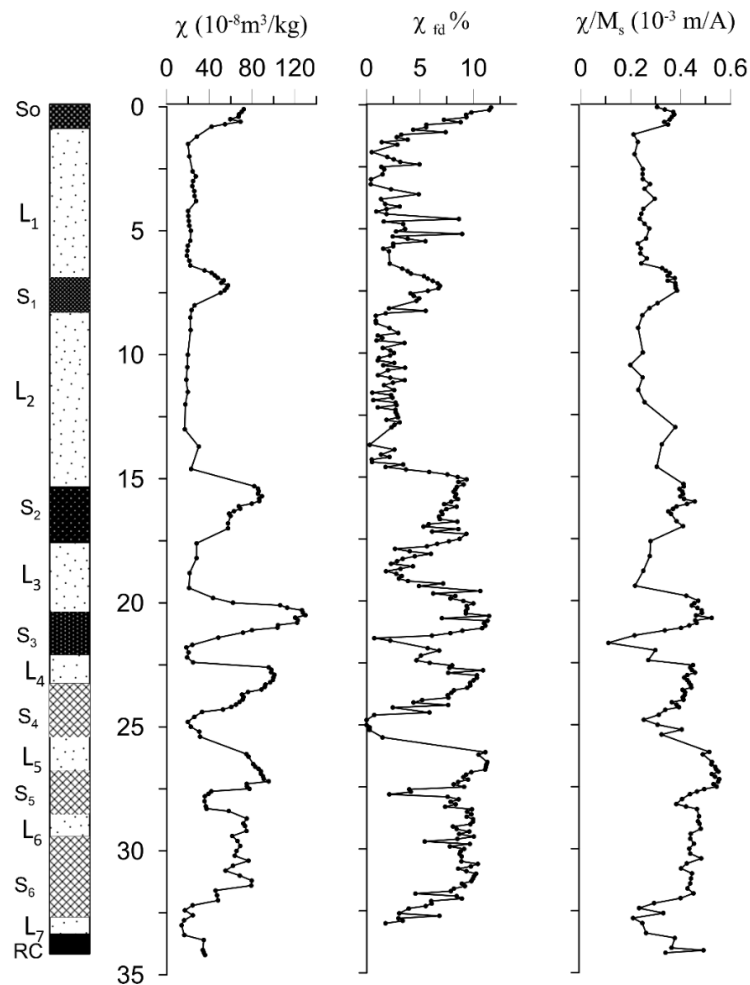


Фигура 9.13. Вариации в дълбочина по профил „Каолиново“ (KAO) на съдържанието на: пясък, прах и глина (а); текстурните индекси CSI (b) и GSI (c) и IRM_{300mT}/χ (c); съдържанието на кристалинно желязо (Fe_d) и аморфно желязо (Fe_o) (d); съдържанието на силикатно желязо (изчислено като разлика между пълното и дитионитно-извлеченото Fe) заедно с измененията в магнитната възприемчивост в силни полета (χ_{hf}) (e); съдържанието на органичен въглерод (SOC) и калциев карбонат (f).

Симетричността във вариациите на GSI и магнитното отношение IRM_{300mT}/χ и максимума, намиращ се точно над нивото с криптотефра, показват, че магнитния сигнал се носи от едрата прахова фракция (Фиг. 9.13 с). Тази хипотеза означава, че окисите на желязото в льосовите хоризонти са тясно свързани с фракцията едра прах и вероятно присъстват под формата на обвивка на кварцовите зърна, както е предложено от Нао et al., (2009). Допълнителна информация за динамиката на еоличната седиментация през последните 450 хил.г. се получава от вариациите в индекса за едра прах (CSI) (Fig. 9.13 b). Третият льосов хоризонт L₃, идентифициран на дълбочина 750 – 790 см, е най - тънкия в разреза (само 40 см мощност) и показва най - силни признаци на вторични промени. Минималната стойност на χ в него е $36.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, регистрирана на 780 см дълбочина, което е по-високо χ от изчислената $\chi_{bg} = 18.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, както и съдържанието на глина, достигащо 30%. Този хоризонт маркира постепенна промяна в доминиращата магнитна минералогия от ниско - коерцитивнен магнитно мек хематит към увеличаващо се количество магхемит в горната палеопочва. Наблюдава се добре изразена тенденция на увеличение в индекса CSI от дъното на профила в посока към L₁ (Фиг. 9.13 b). Стойностите на CSI се увеличават от 0.6 до 0.8 с максимум в В₃-хоризонта на първата палеопочва. Това поведение може да се обясни по два начина – или отразяващо вариации в източника на льосов материал, отложен по време на предпоследното заледряване и впоследствие опочвен през следващата топла епоха; или прахов материал, отлагащ се едновременно с процесите на почвообразуване и асимилиран в почвата. Втората възможност предполага продължаваща седиментация дори по време на топлата епоха. Такъв сценарий изисква наличие на близки източници на прах, които да осигуряват принос на едра прах до изследвания локалитет. В подкрепа на тази възможност са получените повишени съдържания на едра пясъчна фракция в палеопочвите, и особено в първата палеопочва, въпреки ниското абсолютно съдържание. Аналогични резултати са получени за първата палеопочва в разреза при с. Хърлец (Antoine et al., 2019). Ако подобно поведение се потвърди и за други локалитети, това би показвало, че отлагането на едра пясъчна фракция от локални близки източници е типичен процес за льоса в Долнодунавската област. Геоморфоложката обстановка предполага, че такава седиментация би могла да става от сухата долина, простираща се на североизток покрай р. Дунав.

Другият представителен разрез за Североизточна България е профил „Коритен“, разположен в платовидния релеф на Южна Добруджа. Седиментната ядка има обща дължина от 34 м, което е значително повече от дебелината на льосовия комплекс на юг и предполага по-детайлно запазване и разграничаване на последователността от льосови и почвени хоризонти. Съвременният климат в изследваната област се характеризира с типичен континентален температурен режим със средногодишна сума на валежите 556 мм с максимум през май - юли и средногодишна температура 11°C (Велев, 1990). Специфична особеност на климата в района е наличието на силни северни ветрове през цялата година, което е причина за горещите и сравнително сухи летни сезони. Растителността е типично степна, съгласно палинологичните изследвания за холоцена (Bozhilova, 1986). Съгласно резултатите от диагностичните магнито – минералогични анализи, магнитните минерали, които определят поведението

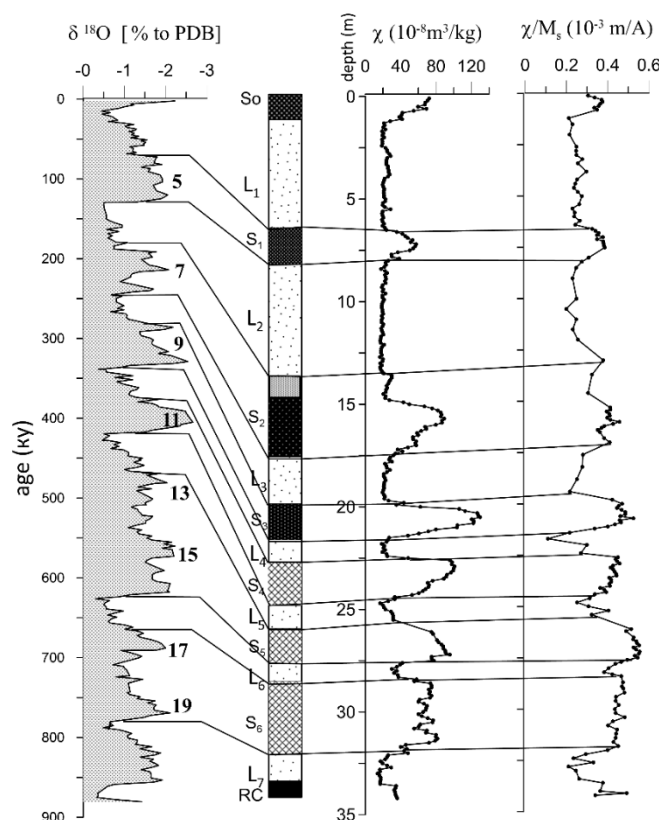
на магнитната възприемчивост са магхемит и повърхностно окислен магнетит. Правилната идентификация на магнитните минерали и протичащите високо-температурни трансформации по време на лабораторните нагрявания имат голямо значение за разбирането и интерпретацията на другите магнитни характеристики и техните вариации в дълбочина по профила. В съвременната почва S_0 се идентифицира гьотит/ферихидрит (съгласно установената разблокираща температура T_{c1} от 120 °C) и магхемит (с $T_{c2} = 350$ °C). Наличието на магхемит в съвременната почва вероятно се дължи на силно оксидационните условия на повърхността, които са довели до пълното окисление на началната магнетитова фаза. Идентифицирането на хидроокиси на желязото върху терромагнитните криви е възпрепятствано, когато магнетитът (или магхемитът) доминират фракцията магнитни минерали. Пробите, в които се идентифицира T_c от 120 °C са от горните нива на палеопочвите, а само палеопочвите S_4 и S_5 се характеризират с присъствие на гьотит с $T_c = 80$ °C в средните или долните части на почвените хоризонти. Такова разпределение на гьотита вероятно е свързано с увеличеното количество органична материя в горните почвени слоеве (Schwertmann 1988). Наблюдаваната T_c от 80 °C в S_4 и S_5 е индикация за суб - тропичен климат, свързан с излишък на източници на Al в резултат на интензивно почвообразуване и изветряне. Едновременно присъствие на магхемит и магнетит в първи льосов хоризонт заедно със значително по-високите коерцитивности, регистрирани в тази част от профила подкрепят хипотезата, че магхемитът вероятно е във формата на обвивка около магнетитово ядро на частиците с фини SD/PSD размери, което от своя страна сочи, че магнитните характеристики са повлияни от структурен стрес в кристалната решетка на магнетита (Knowles 1981; Özdemir & Dunlop 1989; Housden & O'Reilly 1990; Van Velzen & Zijdeveld 1995). За почвените хоризонти е получена висока стойност на честотно - зависимата магнитна възприемчивост $\chi_{fd}\%$ - до 12% (Фиг. 9.18), което съгласно класификацията на Dearing et al. (1997) предполага повече от 75% относителен дял на SP фракция в общия ансамбъл феримагнитни частици (Worm 1998). За льосовите хоризонти $\chi_{fd}\%$ може да се използва като оценка за степента на изветрянето, протекло *in situ*. Относително високите стойности на $\chi_{fd}\%$ в льосовите хоризонти L_3 и L_6 показват значителни вторични изменения на началния прахов материал, което вероятно е свързано и с получените по-ниски стойности на B_c в тези хоризонти. В същото време, магнитната възприемчивост на льосовите хоризонти е по-висока от изчислената „фонова“ магнитна възприемчивост от $12.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ и също потвърждава наличието на вторични изменения.



Фигура 9.18. Вариации в дълбочина по профил „Коритен“ (KOR) на: магнитната възприемчивост (χ), процентът честотно-зависима магнитна възприемчивост ($\chi_{fd}\%$) и отношението χ/M_s .

Един от най-съществените приноси на автора за уточняване на стратиграфската схема за българския льос е предложената корекция във възприетата до момента възраст на първата погребана почва въз основа на резултатите от магнитните изследвания на профил „Коритен“ (Jordanova and Petersen, 1999b). Липсата на абсолютни датировки в рамките на льосовия комплекс ограничават възможностите за надеждно определяне на последната интергляциална почва. В първата работа по палеоклиматична реконструкция на базата на магнитните свойства на льосово - почвените седименти в България, Бъчварова (1993) изследва седиментния комплекс от пет палеопочви и съответните льосови хоризонти на разрез в района на гр. Русе. Бъчварова свързва палеопочвата S_3 със стадий 5 (MIS 5) и S_5 със стадий 9 (MIS9). В резултат на това, при изчисляване на съответните скорости на седиментация, в льосовите и почвените хоризонти от горната част на профила (L_1 , S_1 , L_2 , S_2 , L_3) се получават изключително високи скорости на седиментация и липсва добре изразена корелация между поредицата льос/почва и изотопно - кислородните стадии. От предложената корелативна схема (Бъчварова, 1993) следва, че само двата най - дълбоки хоризонта S_6 и L_6 би трябвало да се привържат към

стадии 10 - 19 от $\delta^{18}\text{O}$ кривата, вземайки предвид, че границата Матуяма/Брюнес се намира в L_7 . Поради липсата на видими ерозионни граници в българските льосови отложения, такава ситуация е малко вероятна. Ако така предложената стратиграфска схема (Евлогиев, 1993; Бъчварова, 1993) се приложи за изследвания профил от района на с. Коритен, изчислените скорости на седиментация са силно нереалистични, тъй като в палеопочвите се получават по-високи скорости, отколкото в льосовите хоризонти. Поради това, в публикацията Jordanova and Petersen (1999 b) е предложена модифицирана схема, основана на корелацията на мас-специфичната магнитна възприемчивост от профила „Коритен“ с астрономически калибрираната крива на вариациите в изотопно-кислородния запис $\delta^{18}\text{O}$ от дълбокоморската ядка ODP core 677 (Shackleton & Hall, 1989; Shackleton al. 1990). Предложената корелация е показана на Фиг. 9.21 и се базира на две основни предположения: 1) границата Матуяма/Брюнес се намира в L_7 и 2) палеопочвата S_5 , характеризираща се с най-високо магнитно обогатяване, е формирана по време на изотопно-кислородните стадии 13 - 15. Последното предположение се подкрепя от наблюденията, сочещи, че S_5 е най-добре развитата палеопочва в българския льосово-почвен комплекс и може да се използва като маркер в стратиграфските корелации.



Фигура 9.21. Корелация на магнитните индикатори за палеоклимата (магнитна възприемчивост χ и отношението χ/M_s) с изотопно - кислородната крива от дълбокоморски седименти от сондаж ODP 677 (Shackleton & Hall, 1989; Shackleton al. 1990).

Друг аргумент в подкрепа на това предположение е полученото максимално обогатяване със суперпарамагнитни частици в S_5 в сравнение с всички останали хоризонти, както е видимо от изследваните магнитни характеристики. Вариациите на магнитната възприемчивост по профила „Коритен“ може да се разглеждат като отражение на глобалния палеоклимат поради ясната връзка между палеопочвените хоризонти и топлите климатични стадии в записа на $\delta^{18}O$ (Фиг. 9.21). Изключение са палеопочвите S_5 и S_6 , които са корелирани със стадиите 13-15 и 17-19. Отчитайки дългата продължителност на тези топли периоди, както и относително слабите кратковременни застудявания между тях, липсата на лъсов хоризонт в рамките на S_5 и S_6 най-вероятно се дължи на пълната трансформация на този лъс в почва поради интензивната педогенеза и/или малката дебелина на лъса. Подобна ситуация се наблюдава в Китай за най-силно обогатената палеопочва S_5 (Heller & Evans 1995; Forster et al. 1996).

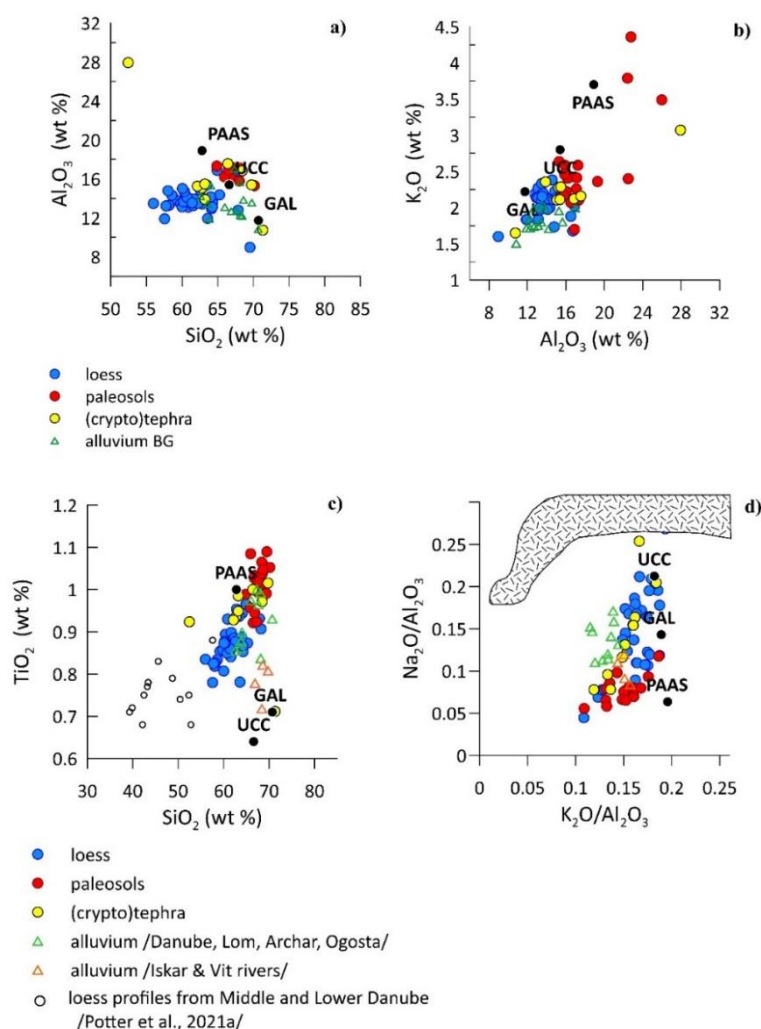
Останалите профили от Североизточна България, разгледани в Глава 9, показват идентични тенденции в поведението на магнитните характеристики. Абсолютните стойности на магнитното обогатяване варират за различните локалитети, което е предизвикано от разликите в локалните условия и влиянието на различните климатични фактори върху почвообразуването и формирането на педогенната магнитна фракция.

Глава 10 „Пилотни данни за геохимичния състав на лъсово - почвени седименти от Северна България“ от дисертацията представя за пръв път систематизирана информация за геохимичния състав на проби от представителни нива от девет профила на лъсово – почвени седименти от Северна България и проби от алувия на заливната тераса на р. Дунав и притоците ѝ от СЗ и Централна Северна България с цел получаване на данни за източника на лъсов ситнозем и възможността за локален принос от алувия на притоците на р. Дунав.

Изследваната колекция образци включва 60 образца от лъс и (палео)почви от следните лъсово - почвени профили: „Гомотарци“ (GO), „Хърлец“ (HZ), „Любеново“ (LUB), „Сухият кладенец“ (SK); „Русе“ (R95), „Каолиново“ (КАО), „Генерал Тошево“ (GT), „Коритен“ (KOR) и „Дуранкулак“ (DK). Освен лъсово - почвените проби, са събрани 14 бр. седиментни проби от алувия на заливната тераса на р. Дунав и притоците ѝ от Северозападна и Централна Северна България (реките Арчар, Лом, Огоста, Искър, Вит). Лабораторните анализи включват: рентгено-флуоресцентен (XRF) анализ за определяне съдържанието на главните окиси; LA-ICP-MS анализ за определяне съдържанието на елементите - следи и редкоземните елементи (REE); рентгено - структурен анализ (XRD) за идентифициране на минералните фази; Сканиращ електронен микроскоп (SEM) с точков рентгенов анализ (EDS analysis) за идентифициране и наблюдение на морфологията на единични кварцови частици.

Резултатите от рентгено – дифракционния анализ показват, че кварцът има доминираща роля в минералогията на общия седимент, като концентрацията му варира между 30 – 60%. Приносът на аморфните фази варира в интервала 17 – 35%, като е най-висок в образца от видима тефра от локалитета SK, палеопочвите и нивата с крипто-тефра. Във всички образци се открива плагиоклаз (албит), който има минимални

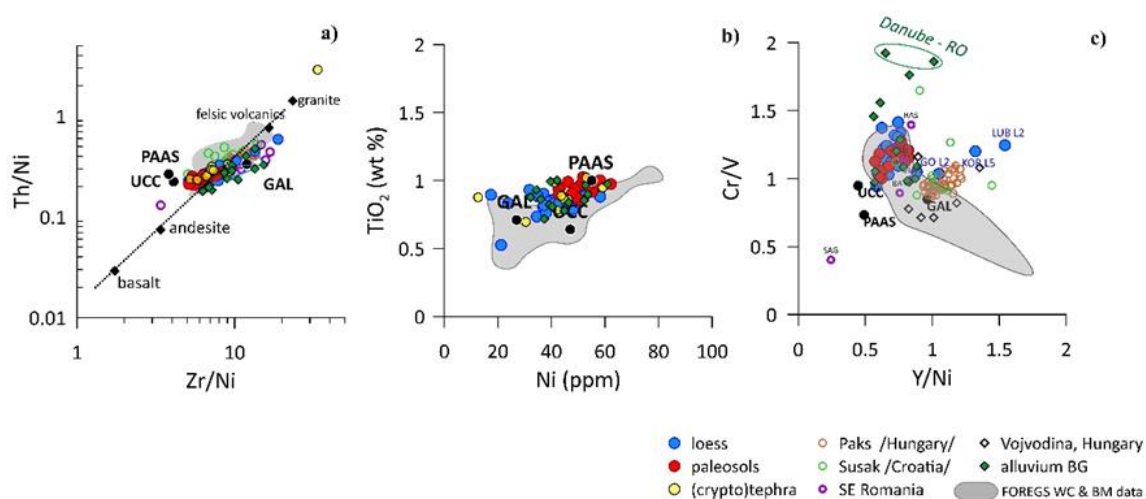
концентрации в палеопочвите и изветрелите лъсови проби (около 7%) и максимални концентрации, достигащи 18% в неизветрелите лъсови образци. Съдържанието на калий се разделя между К-фелдшпати и глинести минерали от групата на мусковита. В лъсовите проби се идентифицират още ортоклаз и санидин, чиито концентрации достигат до 15%. Хлоритът с концентрации между 2 и 10% присъства във всички образци, докато доломит се открива само в някои лъсови проби със съдържание до 8.4%. Съдържанието на карбонати е обогатено в лъсовите хоризонти, като в профила SK са идентифицирани предимно магнезиеви карбонати. Образците от Дунавския алувий и от притоците на р. Дунав на българска територия (реките в СЗ България – Лом, Арчар, Огоста, в Централна България – Искър и Вит) съдържат плагиоклаз (албит) и К-фелдшпати като основни филосиликатни минерали. Албитът присъства в сравнително по-високи концентрации в седиментите от притоците на р. Дунав от Западна България в сравнение с по-източните локалитети.



Фигура 10.4. Зависимости между концентрациите на главните елементи и техните отношения. Съставът на горната континентална кора (UCC) е съгласно Condie (1993); Post Archean Australian Shale (PAAS) съгласно Taylor and McLennan (1985) и Global Average Loess (GAL) съгласно Újvári et al. (2008). Заширикованата област в d) представлява ареала на вариации в състава на магмените скали съгласно Garrels and Mackenzie (1971).

Геохимията на главните окиси в изследваната колекция е сравнително еднородна и не варира значително между отделните локалитети. Както се вижда от Фиг. 10. 4 а, съдържанието на SiO_2 и Al_2O_3 в лъсовите образци попада близо до референтните стойности за горната континентална кора (upper continental crust (UCC)), докато палеопочвите са групирани по-близо до състава на изветрелите скали от пост - архайския австралийски шелф (Post-Archaean Australian Shelf (PAAS)) (Taylor and McLennan, 1985). Върху диаграмата на зависимостта на Al_2O_3 от K_2O (Фиг. 10.4 b), изследваната колекция образци попада в типичните области за глобалните средни стойности за лъоса (global average loess (GAL)), а се забелязва по-голямо отклонение от стойностите за UCC и PAAS. Всички образци се характеризират с относително по-високо съдържание на TiO_2 в сравнение със състава на UCC и на средния състав за лъоса, докато данните за седиментите от р. Искър и р. Вит съвпадат с тези за UCC и GAL (Фиг. 10.4 c). Седиментационният произход на лъоса и палеопочвите се доказва и от отместването на данните встрани от областта, характерна за магмените скали върху диаграмата на зависимостта на $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ от $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Garrels and Mackenzie, 1971) (Фиг. 10. 4 d).

Резултатите за съдържанието на главните елементи в българските лъсово-почвени профили по отношение на средния състав на лъоса (global average loess (GAL)) и UCC, показва, че повечето от образците от лъос са със завишено съдържание на Al_2O_3 в сравнение с това в UCC (Фиг. 10.4 а). Този факт вероятно се дължи на присъствието на по-голямо количество филосиликатни минерали поради издребняването на размерите на частиците в седиментите с увеличаване на разстоянието до източника на материал. Същевременно, не се открива връзка между съдържанието на Al_2O_3 и K_2O (Фиг. 10.4 b), което показва, че калият е разпределен между различни минерални фази с различен потенциал за изветряне.

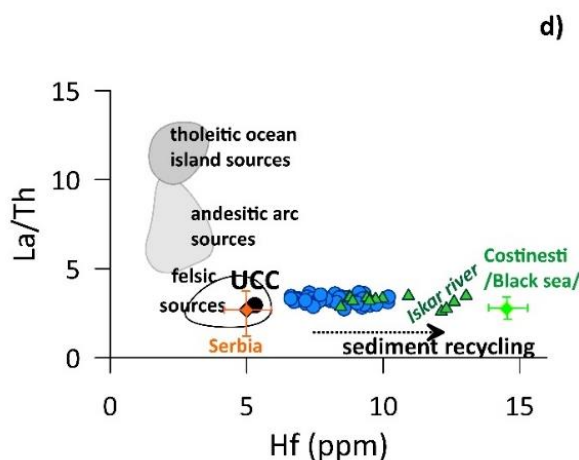


Фигура 10.6. Диаграми на елементите – следи. Данните са съпоставени с публикувани резултати за други лъсово – почвени профили от Европа: Paks (Újvári et al., 2014); Susac (Mikulčić Pavlaković et al., 2011); ЮИ Румъния, Войводина и Унгария (Pötter et al., 2021a). Представени са и данните за алувиалните седименти от западните Карпати ((WC) и Бохемския масив ((BM) съгласно Salminen et al. (2005) със селекцията локалитети съгласно Buggle et al. (2008).

Това предположение се подкрепя от минераложките данни, според които в минералния състав се включват едновременно мусковит/илиит и К-фелдшпати (ортоклаз и санидин). Подчертано по-високо е съдържанието на TiO_2 в сравнение с типичните за UCC и GAL стойности (Újvári et al., 2008) (Фиг. 10.4 c). Отношенията Th/Ni и Zr/Ni широко се използват за изучаване на източника на прахов материал. Както се вижда от Фиг. 10.6 а, за изследваната колекция от български лъсово - почвени профили се наблюдава припокриване с областта, съответстваща на алувиалните седименти от българските реки, както и реките от Западните Карпати и Бохемския масив (FOREGS data base). Данните за втория лъос L₂ от профил „Любеново и L₅ от профил „Коритен“ се разполагат по - близо до точките, съответстващи на алувиалните седименти от р. Дунав, но от румънска територия (Stancuta, проба dan17) и тези от работата на Pötter et al. (2021a) за локалитети от Северна Унгария и Австрия. Върху диаграмата на зависимостта на TiO_2 от Ni (Фиг. 10.6 b) всички образци от лъос попадат близо до глобалните средни стойности за лъоса (Global Average Loess value (GAL)) и са напълно сравними със състава на алувиалните седименти от р. Дунав, притоците на Дунав от българска територия и реките, минаващи през Западните Карпати и Бохемския масив. Високи стойности на Zr/Ni са получени за образците от най - дебелия и най - слабо изветрял лъос L₂ в профилите GO, HZ и LUB. Тези профили са разположени върху речни тераси (GO върху тераса T₄ на р. Дунав; HZ върху тераса T₂ на р. Огоста), а профил LUB е разположен на около 3 км южно от р. Дунав. Ето защо може да се предположи, че по-високите стойности на отношението Zr/Ni отразяват увеличен принос от локални източници на материал. Речният алувий в близост до тези профили е възможен кандидат за такъв източник. Това предположение се потвърждава от припокриването на данните за лъосовите образци и тези от речен алувий на Фиг. 10.6 а. Точките със завишени стойности на Zr/Ni се разполагат близо до средните стойности за профилите Урлуя, Власка и Сагеата (Urluia, Vlasca and Sageata) (Румъния) (Pötter et al., 2021 b), което показва, че ролята на локалните източници на прахов материал в различните части на Долнодунавската лъосова област е значителна. От друга страна, характерните за лъосовите седименти от профилите LUB, KOR и GO по-високи стойности на Y/Ni (Фиг. 10.6c) най-вероятно отразяват по-голям принос от фелзични скали от локални източници. Високи стойности на Cr/V са получени и за две проби от алувиални седименти от р. Дунав на Румънска територия (Фиг. 10.6c), които не съответстват на никоя проба от нашата колекция образци. Това би могло да се дължи на факта, че основният източник на лъосов материал за областта на Добруджа и Черноморското крайбрежие са Украинските глацио-флувиални седименти, тъй като седиментните характеристики на материала от източните Карпати се отличават с по-фелзичен състав (Pötter et al., 2021a).

Ефектите от смесване на седименти от различни източници и преработка върху геохимичните характеристики на лъосовите седименти са изследвани и чрез използване на диаграмата на зависимостта на La/Th от Hf (Floyd and Leveridge, 1987) (Фиг. 10.7d). Нашите данни се разполагат в областта с по-високи съдържания на Hf в сравнение с тези, определени за UCC, което отразява значимият принос на компонента от стари рециклирани седименти. Ясно се отделят алувиалните седименти от р. Искър с тяхното високо съдържание на Hf в сравнение с останалите седименти. Направено е сравнение на

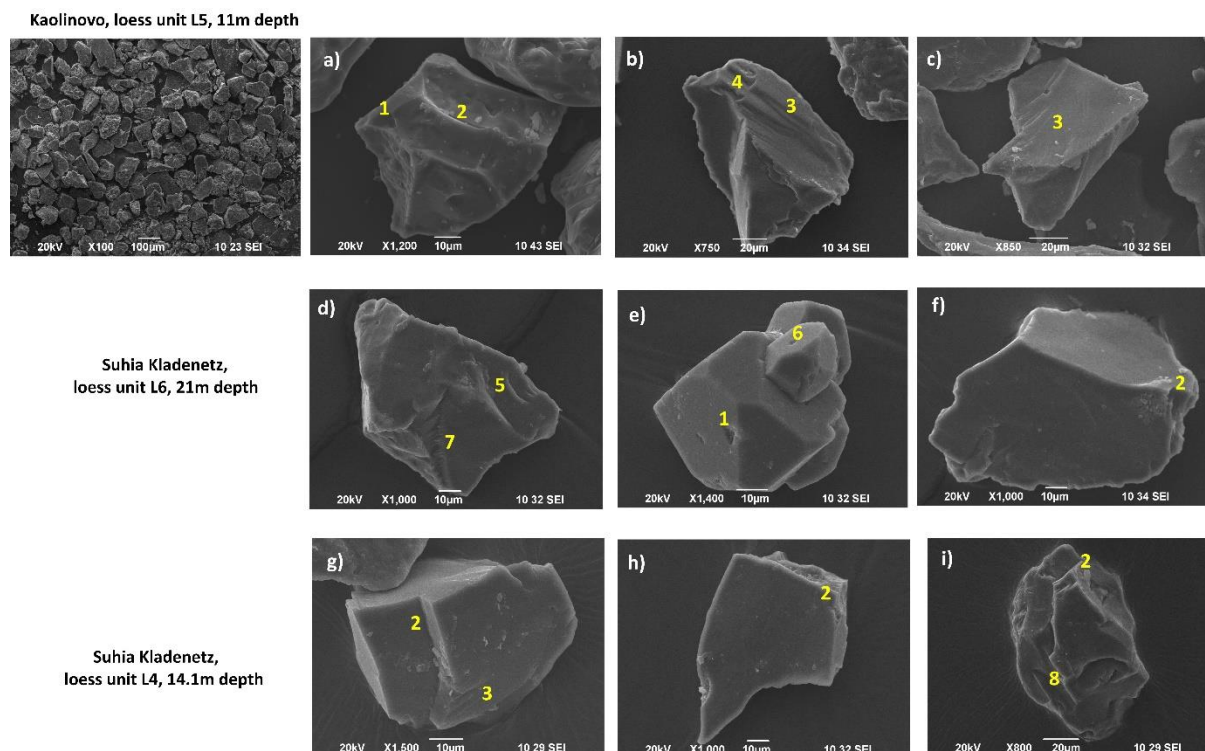
данните за алувия от българските реки с наличните данни за алувия на р. Дунав от сръбския сектор на реката (Culicov et al., 2022) и данните за льосово-почвения разрез Костинести (профил на Черноморския бряг в Румъния) (Tugulan et al., 2016) (Фиг. 10.7d).



Фигура 10.7. d) зависимост между съдържанието на хафний (Hf) и отношението La/Th . Резултатите са съпоставени с данни за седиментите от сръбския сектор на р. Дунав (Culicov et al., 2022) и льосово-почвения профил Костинести в Румъния ((Tugulan et al., 2016)

Както се вижда от диаграмата, в посока от запад на изток льосово-почвените седименти се характеризират с все по-високо съдържание на Hf, дължащо се на увеличаващ се принос на рециклирани седименти.

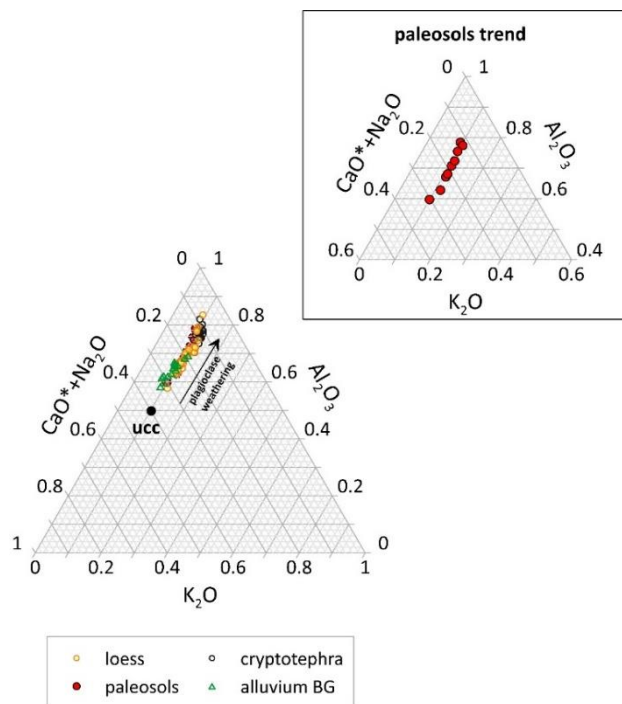
SEM наблюденията, проведени върху материал от льосовите хоризонти L₄, L₅ и L₆ от два льосово - почвени профила (КАО и SK) показват доминиращо флувиалния транспорт от близки източници на прах при отлагането на Долнодунавския льос (Фиг. 10.8). Показани са представителни изображения за морфологията на кварцовите зърна, които демонстрират наличието на текстурни характеристики, типични за флувиалния транспорт: v-образни пукнатини от удар (percussion cracks) (Фиг. 10.8 е), кварцови зърна с конхоидални фрактури, остри ръбове и стъпаловидни форми (Фиг. 10. 8 а–d).



Фигура 10.8. Микрофотографии със сканиращ електронен микроскоп на кварцови частици от лъсови хоризонти на профилите „Каолиново“ и „Сухия кладенец“.

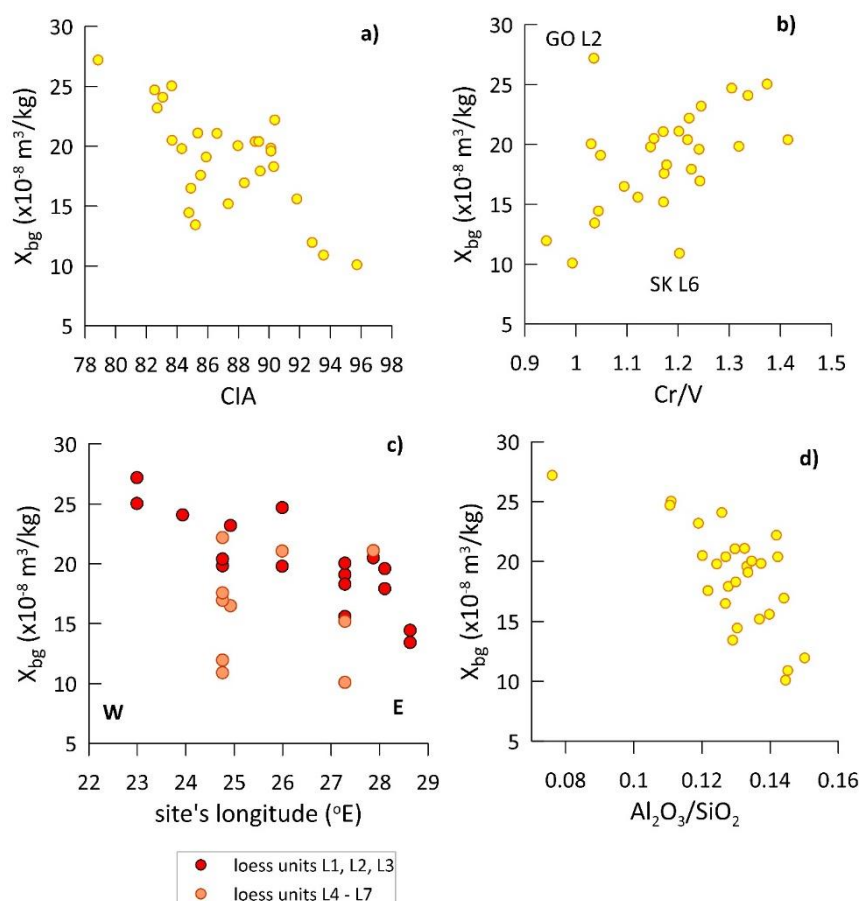
Класическата тройна диаграма А – CN - К (Фиг. 10.10) показва основната роля на изветрянето на плагиоклазите върху минералогията на лъсовите и палеопочвените образци. Припокриването на данните за лъоса с тези за алувиалните седименти от р. Дунав и нейните притоци доказва, че изветрянето на лъоса е свързано главно с изветрянето на компонентата в лъоса, съставена от речен алувий, а не е повлияна в толкова голяма степен от пост - седиментационни климатично - обусловени процеси. Увеличената част на диаграмата, фокусирана върху точките за палеопочвените образци показва фактическото припокриване в областта, заета от пробите от лъос.

За изследваната колекция са изчислени „фоновите“ стойности на магнитната възприемчивост (χ_{bg}) за 24 двойки „палеопочва - изходен лъос“ за профилите от Северна България. Получените χ_{bg} варират в интервала $10 - 27.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, което отразява изменящите се свойства на детритната компонента на първичния лъсов материал.



Фигура 10.10. Тройна $A (Al_2O_3) - CN (CaO^* + Na_2O) - K (K_2O)$ диаграма за лъосово – почвените проби и алувиалните седименти от р. Дунав и притоците ѝ.

Установява се линейна зависимост между коефициента на изветряне CIA и отношението Cr/V от една страна, и χ_{bg} за съответния профил (Фиг. 10.11). На Фиг. 10.11с е показана тенденцията на намаляване на χ_{bg} за локалитетите от изток на запад (геогр. дължини между $23^\circ E$ до $29^\circ E$). Същевременно, образците от лъосовите хоризонти с най-ниско χ_{bg} се характеризират с най-високи стойности на отношението Al_2O_3/SiO_2 , показателно за съдържанието на глина (Фиг. 10. 11d). Както се вижда от Фиг. 10.11 а, зависимостта между χ_{bg} и CIA е отрицателна. Приемайки, че тази връзка не се дължи на вариации в степента на изветряне (допускане, заложено в дефиницията на χ_{bg}), то тогава може да се направи извода, че вариациите в χ_{bg} се дължат на вариации във фелзичната и мафичната компонента в праховия материал. Това се основава на факта, че свежите фелзични скали се характеризират с ниски стойности на индексите на изветряне (CIA, CPA) в сравнение със съответните стойности за свежи мафични скали (Nesbitt and Young, 1982; Rollinson and Pease, 2021).



Фигура 10.11. а) връзка между индекса на изветряне CIA за пробите от лъос и стойностите на „фоновата“ магнитна възприемчивост χ_{bg} за съответния лъосов хоризонт; б) χ_{bg} като функция на отношението Cr/V; в) изменение на χ_{bg} за лъосовите хоризонти като функция от географската дължина на местоположението на профилите; г) зависимост между χ_{bg} и моларното отношение $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, използвано като индикатор за съдържанието на глина.

Разглеждайки заедно зависимостите, показани на Фиг. 10.11, може да се предположи, че тенденцията на намаляване на χ_{bg} от запад на изток вероятно отразява не само промени в източника на прахов материал, но също така и ефекта на издребняване на частиците с увеличаване на разстоянието до източника в процеса на еоличен транспорт.

Закljučения

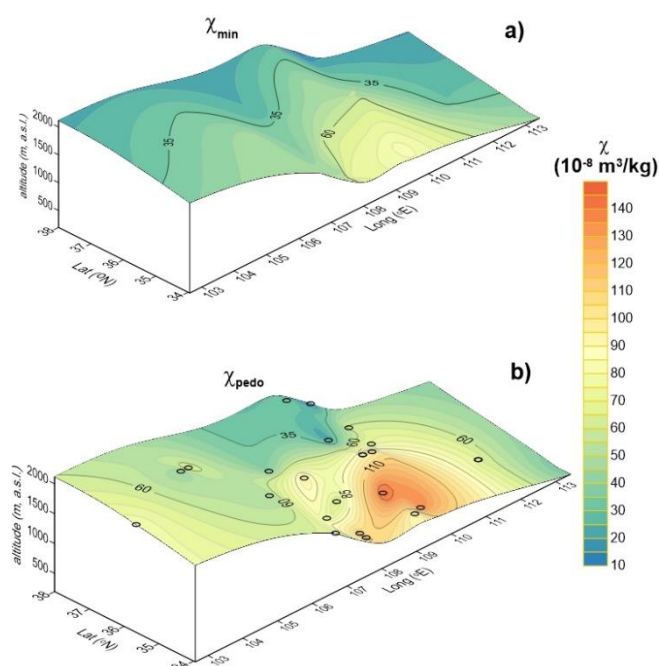
- Геохимичният състав на изследваните лъосово - почвени профили от българската част на Долнодунавската лъосова област се характеризира с относително високо съдържание на TiO_2 в сравнение с локалитетите в Румъния, Сърбия и Централно - Европейския лъос, вероятно свързано с по-интензивни процеси на рециклиране и сортиране на седиментите.

- Съставът на основните елементи за 14 образци от алувиални седименти от заливната тераса на р. Дунав и нейни притоци (р. Арчар, р. Лом и р. Огоста) от СЗ България съответства на състава на лъсовите седименти, докато седиментите от реките Искър и Вит, протичащи през лъсовата област в Централна Северна България, показват по-ниско съдържание на TiO_2 . Това говори за липса на прахова седиментация, идваща от алувия на тези две реки, което е в съгласие с промяната на палеопосоката на ветровете от СЗ – С към С – СИ, както е установено от предишни изследвания.
- Установените зависимости между индексите на изветряне, „фоновете“ магнитни възприемчивости за отделните локалитети и педогенната магнитна възприемчивост показват, че еоличният прахов материал вече е претърпял изветряне преди отлагането му и формирането на лъоса. Такъв сценарий е възможен, вземайки предвид, че алувият на р. Дунав се разглежда като основен източник на материал за лъосообразуването в Дунавската лъосова област (Guo et al., 2018; Fenn et al., 2022). Поради това образуването на палеопочвите е протичало при липса или ограничен привнос на прахов материал по време на интергласиалните периоди.

В Глава 11 „Реконструкция на палеоклиматичните условия в Долнодунавската област през плейстоцена на базата на магнитните изследвания“ са представени резултатите от изследванията по три основни проблема: 1) дефиниране на регионална трансферна функция за оценка на климатичните параметри (средногодишно количество валежи (MAP) и средногодишна температура (MAT)) чрез използване на магнитни параметри; 2) анализ на способността на лъсовите седименти да запазват информация относно вековете (кратко - периодични) вариации в палеоклимата, и 3) възстановяване на промените в палеоклимата за последните 800 хил.г. за Северна България чрез използване на записи на магнитните свойства на лъосово – почвените последователности. Във връзка с първата от тези тематики е проведено детайлно изследване на потенциала на записите на магнитната възприемчивост в холоценски почви за палеоклиматични реконструкции от гледна точка на почвената еволюция, възникването и процесите на формиране на почвените хоризонти. В изследването са включени почвени профили от 21 локалитета в Северна България; публикувани данни за други 20 профила на холоценски почви от Европа и 25 профила на почви от Китай. За всеки профил са дефинирани следните параметри: максимална магнитна възприемчивост (χ_{max}); минимална магнитна възприемчивост (χ_{min}), отчетена в долулежащия лъосов хоризонт; и педогенна магнитна възприемчивост ($\chi_{pedo} = \chi_{max} - \chi_{min}$).

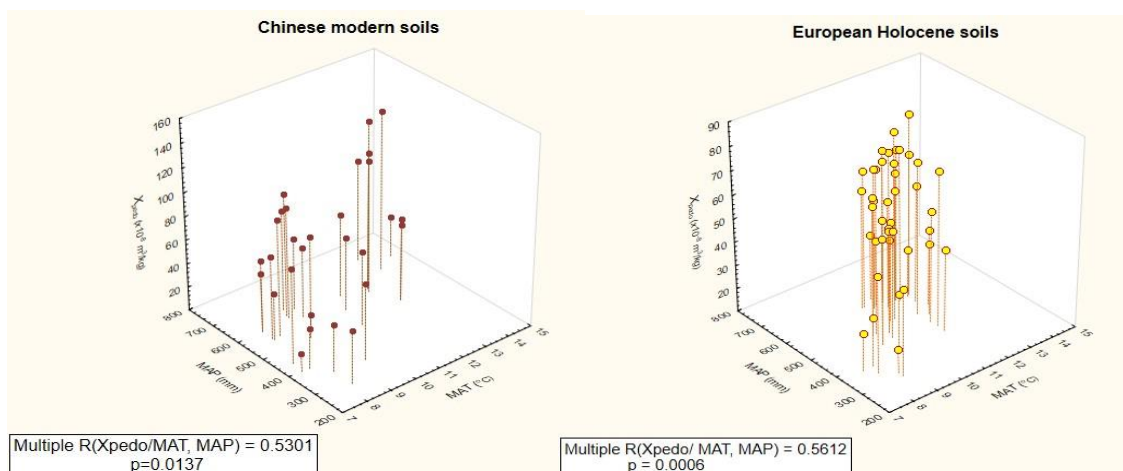
Използвайки данните за χ_{min} за локалитетите от Китай, заедно със съответните географски координати и надморски височини, е конструирана пространствено интерполирана карта на χ_{min} . Използван е методът „Simple kriging“ и софтуерът Surfer 13 (Golden Software Inc.). Получената карта е показана на Фиг. 11.7. а. Както се вижда, налице е основен тренд в посока югоизток - северозапад на намаляващи стойности на

$\chi_{\min}$, заедно с увеличаване на надморската височина. Това предполага, че льосът, натрупан през последната глациална епоха е бил подложен в различна степен на изветряне, диктувано от влиянието на Източно - Азиатските Летни Мусони (East Asian Summer Monsoon (EASM)). Това засилено изветряне в посока югоизток се откроява ясно за последния глациален льос в трите главни климатични режима – ариден, полу - ариден и хумиден – чрез нарастването на $\chi_{\min}$ в локалитетите с все по-южна географска ширина. Подобна картина се наблюдава и за площното разпределение на педогенното магнитно обогатяване χ_{pedo} (Фиг. 11.7 b), което следва добре установената и в предишни работи зависимост от средногодишната сума на валежите (МАР), диктувана от силата и вариациите на мусоните (EASM) (Hao and Guo, 2005; Song et al., 2014).



Фиг. 11.7. Карти на $\chi_{\min}$ (a) и χ_{pedo} (b) като функция на географските координати (latitude, longitude) и надморската височина за локалитетите от Китайското льосово плато.

С цел оценка на влиянието и двете главни климатични характеристики – МАР и МАТ, върху формирането на магнитното почвено обогатяване са построени 3D графики на χ_{pedo} като функция на МАР и МАТ (Фиг. 11.9). Значимите стойности на регресионните коефициенти от множествения регресионен анализ, включващ двете променливи (МАТ и МАР) показват, че χ_{pedo} е комплексен индикатор за промените както в количеството валежи, така и в температурата.

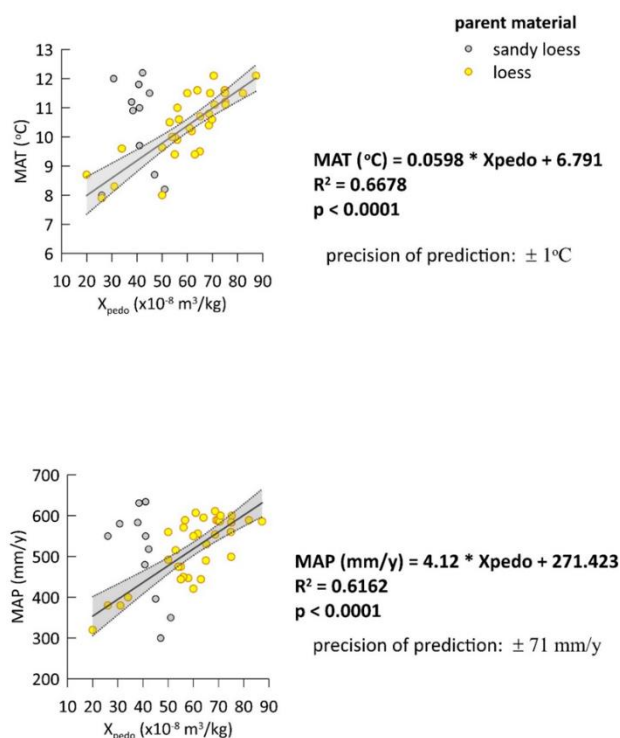


Фиг. 11.9. Педогенна магнитна възприемчивост χ_{pedo} за китайските (a) и европейските (b) локалитети като функция на MAP и MAT. Регресионните коефициенти за двата набора данни са показани под съответните графики.

Същите зависимости са налице и за връзката между χ_{min} и съвременните стойности на MAP и MAT за съответните локалитети. Климатичният контрол върху стойностите на минималната магнитна възприемчивост χ_{min} , установен за Китайското льосово плато (Фиг. 11.7 a) и Европа (Фиг. 11.8 b) е в подкрепа на хипотезата, че в тези райони източниците на еоличен прах по време на последния глациал са били сходни по отношение на геохимичния им състав. Подобни изводи са публикувани и по-рано, на базата на геохимични изследвания на китайски льос и на льос от Централна Европа (Fenn et al., 2017; Schatz et al., 2015; Muhs, 2018; (Bird et al., 2020). Ясното пространствено разпределение на χ_{min} в Китайското льосово плато (КЛП) (Фиг. 11.7 a), което съвпада с интергласиалния му аналог (χ_{pedo}) (Фиг. 11.7 в) е в подкрепа на тезата, че Източно-Азиатските мусони (EASM) диктуват амплитудата на промените в количеството на валежите във вътрешните части на КЛП не само през интергласиалните епохи, но и през гласиалите. Подобни резултати са докладвани и в работата на Hao and Guo (2005), в която χ_{min} в първия льос L_1 също показва тенденция на увеличаване в посока на южните географски ширини. Представените резултати показват, че и температурата, и валежите играят съществена роля във формирането на педогенния магнитен сигнал. Следователно, редица комбинации (MAP, MAT) по време на интергласиалите може да генерират една и съща стойност на χ_{pedo} . Разглеждайки връзката между педогенното обогатяване и климата за локалитетите с различен тип растителна покривка, е установено, че почвообразуването върху льос в условията на степна растителност е силно повлияно от климатичните компоненти (MAP и MAT), които могат да бъдат прецизно

реконструирани от вариациите на магнитната възприемчивост в дълбочина по почвения профил.

За дефиниране на регионални трансферни функции за Долнодунавската лъсцова област, позволяващи реконструкция на MAP и MAT чрез използване на големината на педогенното магнитно обогатяване (χ_{pedo}) е използвана компилация от 21 профила на почви от Северна България (изследвани от автора в колектив) и 25 почвени профила от други локалитети в Европа (публикувани от други автори). Така географското покритие на избраните локалитети дефинира областта на изследване – между географски ширини: 43 – 50 ° N и географски дължини 17 – 28 ° E, с надморски височини между 15 и 350 m (над морското равнище). Интервалът на вариации в съвременните средно годишни стойности на валежите е от 380 до 611 мм, а в съвременните средно годишни стойности на температурата – от 8 до 12 °C. Почвените типове в базата данни включват профили на карбонатни и излужени черноземи, и сиви горски почви.

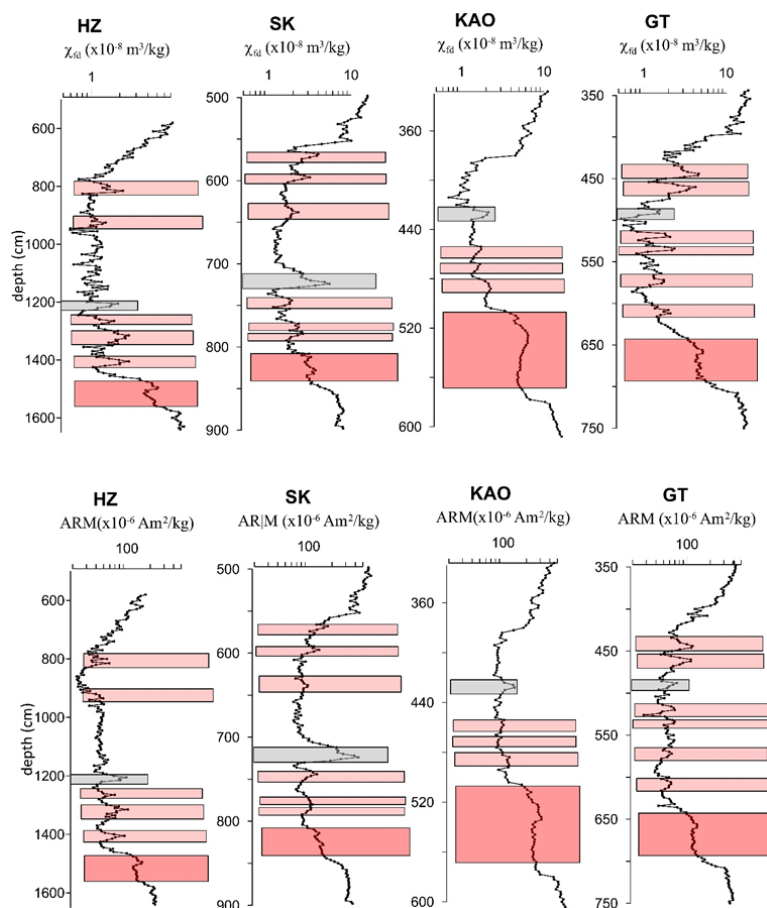


Фиг. 11.14. Връзка между климатичните параметри (MAP и MAT) и педогенното магнитно обогатяване за почвени профили от Европейската лъсцова област.

Установено е, че за почвите, развити върху песъчлив лъос, почвеното обогатяване е систематично по-ниско от това, наблюдавано при почви, развити при сходен климат, но върху типичен лъос. Както се вижда от Фиг. 11.14, данните за тези локалитети не следват линейния тренд, оформен от останалите данни. Поради това резултатите за почвите, развити върху песъчлив лъос, са изключени от пресмятането на линейната

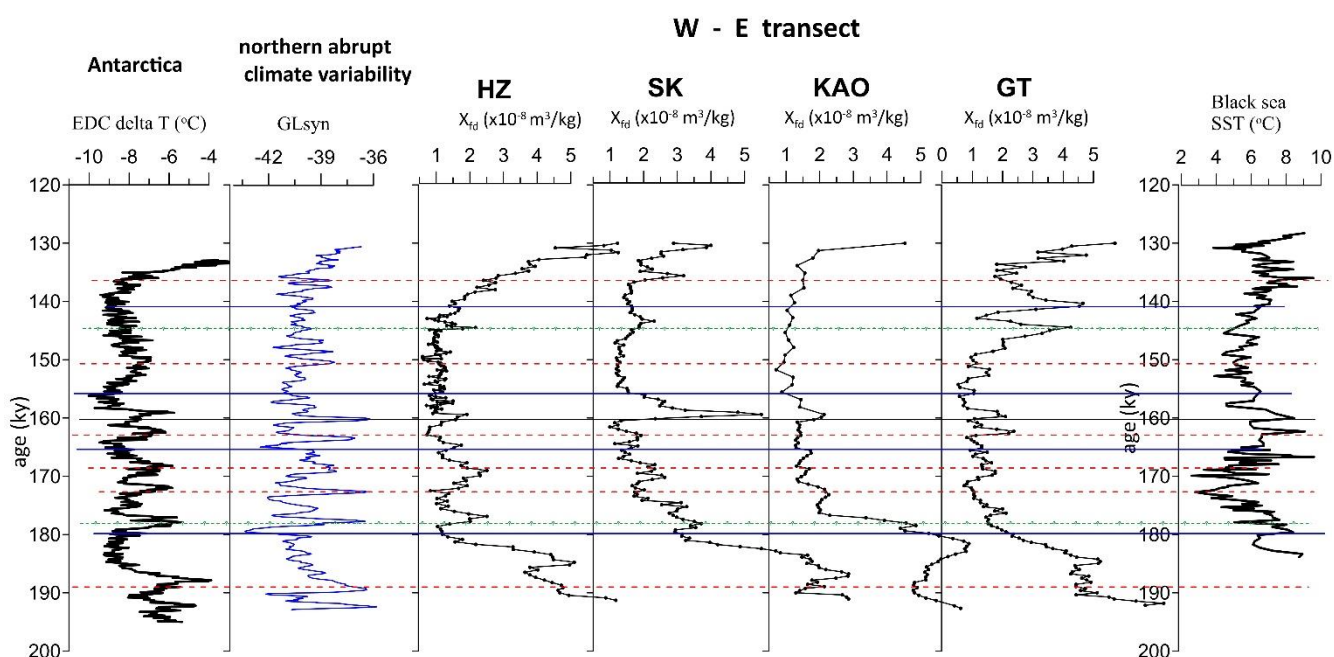
регресия, даваща връзката между климатичните параметри (температура, валежи) и педогенното магнитно обогатяване (χ_{pedo}).

Освен разработването на регионални трансферни функции, позволяващи оценката на палеовалежите и температурата, друг важен въпрос е свързан със способността на льосовите седименти да запазват информация за краткотрайните резки изменения в палеоклимата, известни като Дансгаард – Ойшер събития (DO events), идентифицирани в палеоклиматични записи от Гренландия за последния глациален цикъл (130–12 ka). С цел идентифициране на вековите вариации в палеоклимата по време на формирането на втори льосов хоризонт, т.е. глациала MIS 6, е направен детайлен анализ на вариациите на магнитните параметри в дълбочина за профилите “Хърлец” (HZ), “Сухия кладенец” (SK), “Генерал Тошево” (GT) и “Каолиново” (КАО). Магнитните характеристики, които са използвани като индикатори за интензивността на изветрителните и/или почвообразователни процеси в рамките на глациалната епоха са честотно-зависимата магнитна възприемчивост (χ_{fd}) и безхистерезисната остатъчна намагнитеност (ARM). На Фиг. 11.19 са представени измененията в дълбочина на χ_{fd} и ARM във втория льос (L_2) за четирите избрани профила.



Фиг. 11.19. а) вариации на честотно-зависимата магнитна възприемчивост (χ_{fd}) в рамките на втори льосов хоризонт на профилите „Хърлец“ (HZ), „Сухия кладенец“ (SK), „Каолиново“ (КАО) и „Генерал Тошево“ (GT); в) вариации на безхистерезисната намагнитеност (ARM) в рамките на втори льосов хоризонт на четирите профила.

Дълбочинният интервал, в който е идентифицирано присъствието на (крипто)тефра е маркиран със сив шрих и е изключен от възможните индикатори за наличие на интерстадиални (слабо развити) почви, които да са аналози на Д – О събитията в Гренландските записи. Поради различните скорости на седиментация на еоличния материал по време на глациалната епоха MIS 6, по време на която се отлага вторият льос, броят на ясно изразените и систематично представени в дълбочина локални максимуми на двата параметъра, е различен. Най – много (седем на брой) нива са идентифицирани в записите по профилите „Хърлец“ и „Сухия кладенец“ – четири интервала под нивото на (крипто)тефрата и три – над него (Фиг. 11.19). Амплитудата на наблюдаваните локални максимуми е различна, което отразява локалните ефекти от комбинацията между скоростта на льосонатрупване в конкретното местоположение в reliefa и климатичните характеристики.



Фиг. 11.22. Векови вариации в записите на честотно-зависимата магнитна възприемчивост (χ_{fd}) по време на глациалната епоха MIS 6 (130 – 190 ka) за профилите „Хърлец“ (HZ), „Сухия кладенец“ (SK), „Каолиново“ (КАО) и „Генерал Тошево“ (GT). За сравнение са представени записи от Антарктика (Epica Dome C delta T, Jouzel et al., 2007); синтетичен запис на вариациите в климата в северните ширини GLsyn (Barker et al., 2011) и изменение в повърхностната температура на Черно море (Black sea SST, Wegwerth et al., 2020)

За привързване на дълбочинната скала към времева са използвани наличните абсолютни датировки за анализиранияте профили. Като времеви репер в най-младата част на разрезите е използвана датировката на нивото от профил „Хърлец“ чрез термолуминисцентния метод на дълбочина 7.5м. и възраст 142 ± 13 хил.г. (Lomax et al., 2019). Другият изключително ценен репер е проведената от автора датировка на нивото

с видима тефра от профил „Сухия кладенец“ с голяма точност, даваща възраст от 159 ± 1.6 хил.г. Третият важен геохронологички маркер е идентифицираното стратиграфско положение на геомагнитната екскурзия „Iceland basin“ с датировка от 190 хил.г. в началото на слабо развитата почва в основата на L₂. Така поведението на χ_{fd} във времеви интервал 135 – 195 хил.г. (гласиалът MIS 6) за четирите локалитета е представено на Фиг. 11.22.

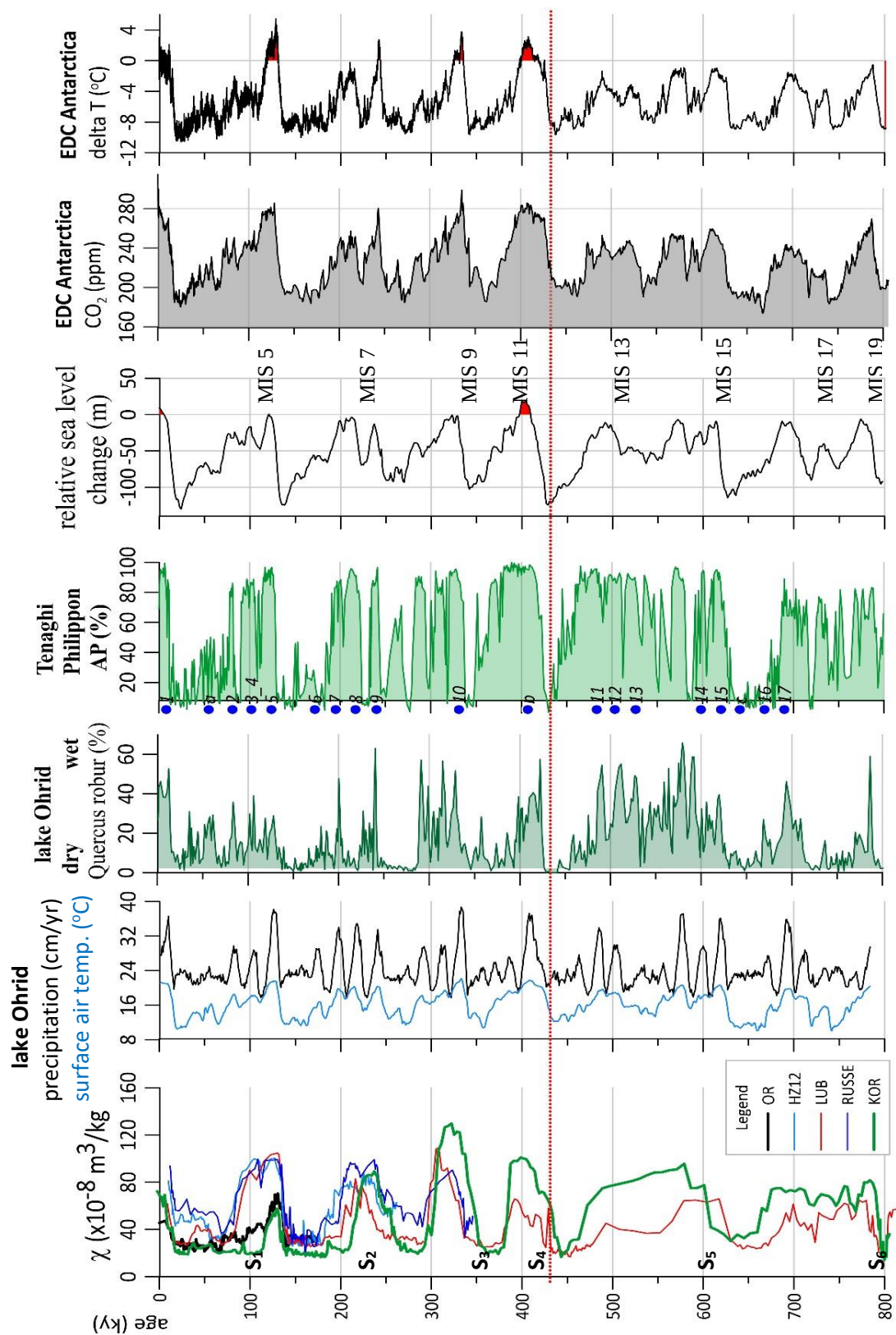
Корелацията на вариациите на χ_{fd} за лъсовите отложения от Северна България с кривите на глобалните записи на вековите резки промени на климата (получени по архиви от Антарктика и синтетичния ред на Barker et al. (2011) по време на гласиалната епоха MIS 6) (Фиг. 11.22) показва както сходства, така и различия. През първата половина на гласиалния период (190 – 160 хил.г.) се наблюдават по-високо амплитудни и ясно изразени интерстадиали, по време на които в лъсовите седименти от Долнодунавската област се формират три добре изразени чрез усиления магнитен сигнал слабо развити почви. Най-старата (около 190 хил.г.) е с най-силно магнитно обогатяване, което съответства и на краткотрайната екскурзия до високи температури на глобалните записи. По-умерените гласиални условия през първата половина на MIS 6 са следствие от максимума в слънчевата инсолация през този времеви интервал. Сходна еволюция в палеоклиматичните условия е установена и по палеоклиматичните реконструкции за седиментни ядки от Черно море (Wegwerth et al., 2019, 2020). През втората половина на гласиалния цикъл (160 – 135 хил.г.) се наблюдават по-слабо изразени вариации в поведението на кривите на χ_{fd} , което говори за засилена аридност на климата, характеризираща периода на най-сурови гласиални условия.

Анализът на високо честотните компоненти в записите на измененията на климата през гласиалния плейстоцен, запечатани в различни параметри - индикатори от лъсови наслаги, седименти от северния Атлантис и ледени ядки от полярните области показва, че вековите вариации на резките промени в климата са постоянни и сравними в рамките на различните гласиални епохи. В същото време, амплитудата на тези явления е много различна в различните записи, което показва, че динамиката на процесите е различна в зависимост от комбинацията на граничните условия по време на различните гласиални и интергласиални епохи (Sun et al., 2021).

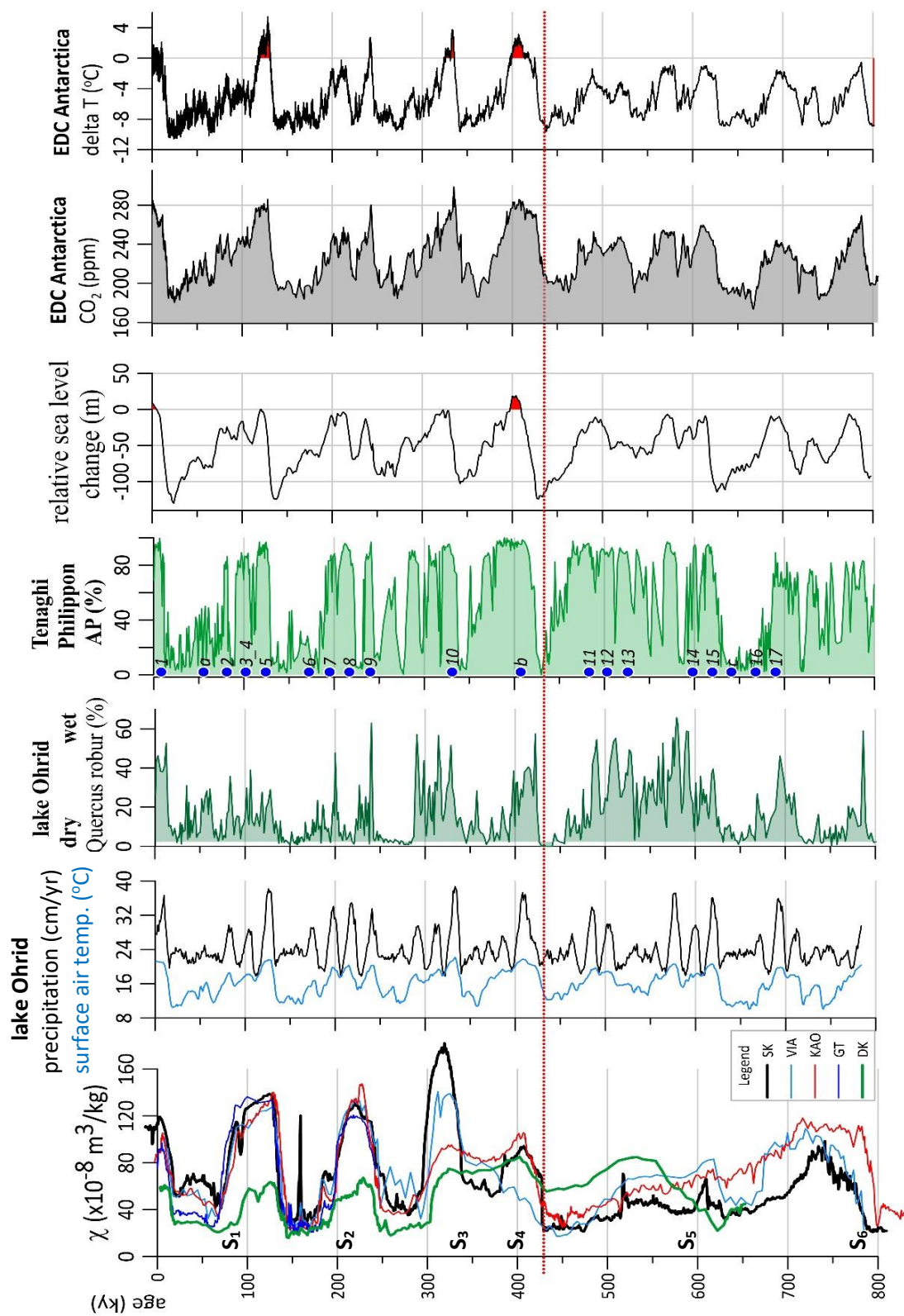
Реконструкция на палеоклимата за последните 800 хил. г. чрез използване на магнитния запис в лъсово – почвените седименти

За съставяне на времеви модел за всеки от изследваните лъсово – почвени профили и привързването им към скалата на времето е използван корелативния метод, при който кривите на магнитната възприемчивост са сравнени с глобалния палеоклиматичен запис на изотопите на кислорода по дълбокоморски фораминифери (LR04 stack на Lisiecki and Raymo, 2005).

На Фигури 11.27. и 11.28. са представени вариациите на магнитната възприемчивост по изследваните лъсово – почвени профили във времето заедно със записите на палеоклиматичните изменения за последните 800 хил.г. в глобален и регионален мащаб. Изследваните профили от Северна България са разделени на две групи в зависимост от разположението на локалитета спрямо основния източник на прахов материал – алувия на р. Дунав.



Фиг. 11.27.

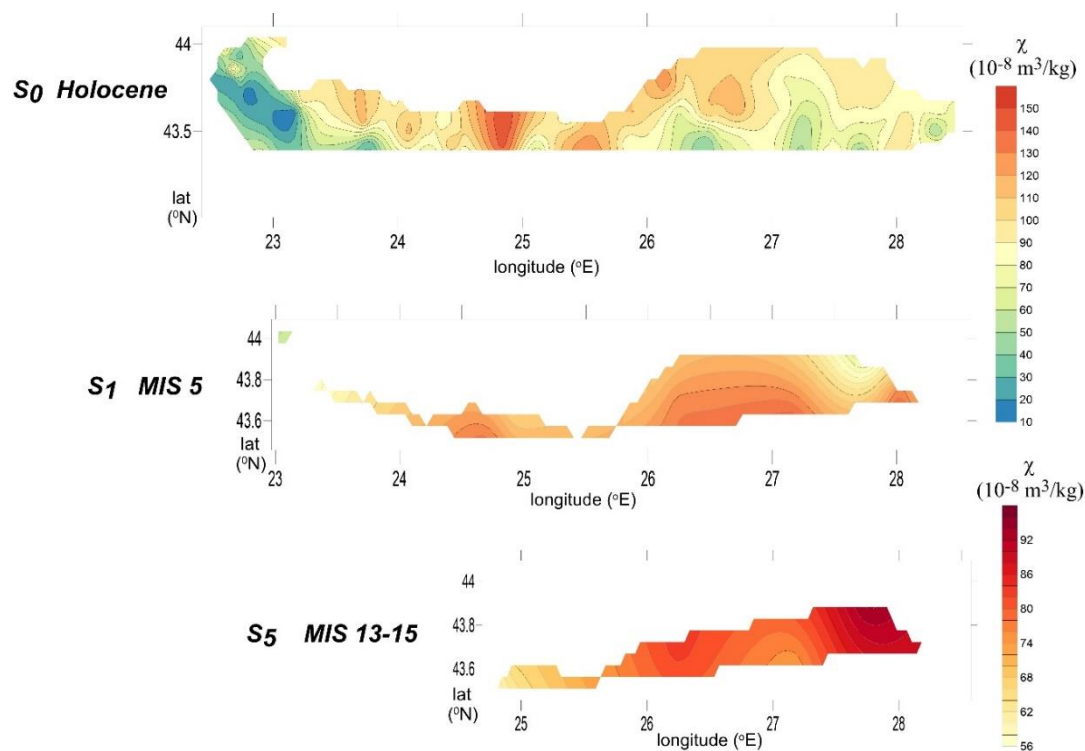


Фиг. 11.28.

Както се вижда от вариациите на χ , най - рязка промяна в интензивността на магнитния сигнал през интергласиалните епохи (т.е. степента на магнитно обогатяване на палеопочвите) се наблюдава за профилите „Любеново“ (LUB), „Коритен“ (KOR) и „Сухия кладенец“ (SK). За тези локалитети е налице систематично по-висок магнитен сигнал в младите палеопочви ($S_1 - S_4$) (с изключение на S_1 за профил „Коритен“), което кореспондира много добре с глобалните записи на MBT от Антарктика и световния океан. Тези глобални индикатори показват доминацията на 100 – хиляди годишните цикли с преминаването към интергласиали с максимално затопляне след 430 хил.г. (Фиг. 11.27). Съществена особеност на записите от най-южните локалитети – „Каолиново“ (КАО) и „Вятово“ (VIA) е значително по-късният преход към палеопочви с максимално магнитно обогатяване. В тези два профила преходът става не с настъпването на MIS 11 (430 хил.г.) а по време на MIS 9 за „Вятово“ и чак през MIS 7 – за „Каолиново“ (Фиг. 11.28). Изключение от правилото за систематично по-силно магнитно обогатяване на най-младите палеопочви в сравнение с по-старите, е профил „Дуранкулак“ (DK) (Фиг. 11.27), за който като цяло магнитното обогатяване на палеопочвите S_1 и S_2 е значително по-слабо в сравнение с останалите профили. Наблюдаваната рязка смяна в палеоклиматичните условия на територията на Северна България след около 430 хил.г., запечатана в кривите на магнитната възприемчивост, потвърждава глобалния характер на MBT и потенциалът на магнитните свойства на льосово – почвените седименти като чувствителни индикатори на измененията в палеоклимата. Съгласно получените синхронизирани във времето записи от изследваните профили (Фиг. 11.27. и 11.28), MBT в Долнодунавската льосова област се характеризира с еднократно рязко изменение на палеоклиматичните условия за разлика от някои записи от Китайското льосово плато (Ao et al., 2020; Xu et al., 2020), съгласно които MBT в азиатския регион настъпва чрез две отделни фази: първата - по време на интергласиала MIS 13 и след това втората фаза - през MIS 11, когато MBT се регистрира във всички глобални палеоклиматични записи.

Максималното магнитно обогатяване на третата палеопочва в профилите „Коритен“, „Любеново“, „Сухия кладенец“ и „Вятово“ (Фиг. 11.27, 11.28) е отражение на регионалните особености в палеоклимата през различните интергласиални епохи, които показват, че по време на интерстадиала MIS 9 е налице относително най-продължителен период с по-висока влажност, за който се съди по поленовата крива за разпространението на обикновения дъб от Охридското езеро. Ниското магнитно обогатяване на S_4 за двете най-южно разположени профила („Каолиново“ и „Вятово“), сравнено с това в палеопочвите преди MBT (Фиг. 11.28) би могло да се дължи на запазване на по-силно изразен средиземноморски характер на климата в тези най-южно разположени локалитети и в по-късните интергласиални епохи (включително MIS 7) в резултат на локалните палеогеографски условия в хълмистата част на Лудогорието. Сходни резултати са публикувани от Obrecht et al. (2016) относно еволюцията на палеоклиматичните условия, получени за льосово – почвения профил при Сталач (разположен също в най-южните части на льосовата покривка по поречието на р. Морава в Сърбия).

На Фиг. 11.29. е представено пространственото изменение в големината на максималната магнитна възприемчивост за холоценските почви (Jordanova et al., 2016); първата погребана почва (S_1), формирана през последния интергласиал (MIS 5) и петата погребана почва S_5 , която е маркиращ хоризонт в лъсовия комплекс от Северна България (Евлогиѐв, 2006). Тя е формирана в продължение на две интергласиални периода: MIS 13 и MIS 15, което представлява дълъг период от около 150 хил.г.



Фиг. 11.29. Пространствена апроксимация на големината на максималната магнитна възприемчивост в съвременните почви от Северна България (а), в първата палеопочва (S_1) и в петата палеопочва (S_5), представени в записите на изследваните лъсово – почвени профили.

Тъй като големината на максималната магнитна възприемчивост е използвана в регионалната трансферна функция, даваща връзката между магнитното обогатяване и климатичните параметри (температура и валежи), сравнението показва какъв е бил палеоклиматът през съответния интергласиал в сравнение със съвременния. Както се вижда, пространственото изменение на χ за съвременните почви и S_1 е сходно, като абсолютното магнитно обогатяване е систематично по-високо в S_1 . Следователно, климатът през последната интергласиална епоха е бил сходен със съвременния, но с по-високи температури и валежи. Тези изводи съвпадат с оценката съгласно глобалните палеоклиматични криви (Lisiecki and Raymo, 2005). Пространственото изменение на χ за петата палеопочва говори за коренно различна палеоклиматична обстановка по време на интергласиалите преди MBT – наблюдаваният систематичен тренд на нарастване на χ от югозапад на североизток предполага различна картина на атмосферна циркулация и пространствено разпределение на валежите и температурата.

ОСНОВНИ ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИЯТА

НАУЧНИ

1) Прецизирана е хроностратиграфията на лъсово – почвените отложения в Северна България чрез:

- детайлни палеомагнитни изследвания на профил „Вятово“ и идентифицирането на палеомагнитната граница Матуяма – Брюнес в най-стария (седми) лъсов хоризонт;
- нови данни за абсолютната възраст на представителни нива от най-младите три лъсови хоризонта и първата погребана почва за профилите „Хърлец“, „Вятово“ и „Каолиново“ чрез термолуминисцентно датиране;
- тефрохронологско датиране на установеното ниво с вулканска пепел във втори лъсов хоризонт на профил „Сухия кладенец“. Установено е, че геохимичният състав на тефрата съвпада с този на игнимбрите от Таурано от италианската вулканска провинция Кампания с абсолютна възраст 159.3 ± 1.6 хил.г. Така тефрата във втори лъос, която е идентифицирана в редица лъсово – почвени разрези от Централна и Югоизточна Европа, но не е датирана досега, може да служи за прецизен времеви маркер в регионалните стратиграфски корелации на континентални и морски седиментни разрези.

2) Предложен е нов концептуален модел за процесите и закономерностите при формиране на педогенните силно магнитни минерали в дълбочина по почвените профили в зависимост от наличието/липсата на прахова еолична седиментация по време на почвообразуването.

3) Съставени са емпирични регионални трансферни функции за връзката между големината на магнитното педогенно обогатяване на почвите, развити върху лъос и климатичните параметри (валежи и температура). Анализирани са влиянието на локалните фактори на околната среда върху големината на магнитното почвено обогатяване.

4) Получени са детайлни данни за магнитната минералогия и вариациите на набор от магнитни параметри в дълбочина по 11 лъсово – почвени профила, разположени в различни части от лъсовата покривка в Северна България.

5) За пръв път са представени и анализирани данни за геохимичния състав (главни окиси, елементи следи и редкоземни елементи) на представителна колекция от лъсови и палеопочвени проби от изследваните профили от Северна България. На базата на тези данни и съпоставката им с геохимичния състав на седименти от алувия на р. Дунав и притоците ѝ, са направени изводи относно източника на праховия материал. Сравнението на геохимичните и магнитните характеристики на колекцията от проби позволи да се направят изводи относно времето и степента на изветряне на лъсовите и палеопочвените проби.

6) Използвайки крос – корелационния метод и корелацията на вариациите на мас – специфичната магнитна възприемчивост (χ) в дълбочина по профилите с астрономически калибрираната глобална крива на изменението на нивото на световния океан по данни за изотопите на кислорода в бентосни фораминифери от световния океан (LR04 bentic stack, Lisiecki and Raymo, 2005) са построени времевите модели за всеки от изследваните льосово – почвени профили. Получените записи на χ са съпоставени с глобални, регионални и локални записи на палеоклиматичните изменения през последните 800 хил.г. и са направени заключения относно климатичните изменения на територията на Северна България през плейстоцена.

НАУЧНО – ПРИЛОЖНИ

7) Почвообразуването върху льос в условията на степна растителност е силно повлияно от климатичните компоненти (МАР и МАТ), които могат да бъдат прецизно реконструирани от вариациите на магнитната възприемчивост в дълбочина по почвения профил.

8) Съдържанието на основните елементи за 14 образци от алувиални седименти от заливната тераса на р. Дунав и нейни притоци (р. Арчар, р. Лом и р. Огоста) от СЗ България съответства на състава на льосовите седименти, докато седиментите от реките Искър и Вит, протичащи през льосовата област в Централна Северна България, показват по-ниско съдържание на TiO_2 . Това говори за липса на прахова седиментация, идваща от алувия на тези две реки, което е в съгласие с промяната на палеопосоката на ветровете от СЗ – С към С – СИ, както е установено от предишни изследвания.

9) Взаимовръзката между индексите на изветряне, „фоновите“ магнитни възприемчивости за отделните локалитети и педогенната магнитна възприемчивост показват, че еоличният прахов материал е претърпял изветряне преди отлагането му и формирането на льосовите хоризонти. Такъв сценарий е възможен, вземайки предвид, че алувият на р. Дунав е основен източник на материал за льосообразуването в Дунавската льосова област. Поради това образуването на палеопочвите е протичало при липса или ограничен привнос на прахов материал по време на интергласиалните периоди.

Цитирана литература

- Alekseev, A.O., Shary, P.A., Malyshev, V.V., 2023. Magnetic susceptibility of soils as an ambiguous climate proxy for paleoclimate reconstructions. *Quaternary International*, 661, 10–21.
- Alexandrovskiy, A., 2007. Rates of soil-forming processes in three main models of pedogenesis. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas* 24 (2), 283–292.
- An, Z., Sun, Y., Zhou W., Liu W., Qiang X., Wang X., Xian F., Cheng P., Burr G. , 2014. Chinese Loess and the East Asian Monsoon. In: An, Z. (eds) *Late Cenozoic Climate Change in Asia. Developments in Paleoenvironmental Research*, vol 16., pp. 23-143, Springer, Dordrecht
- Andreeva, P., Stefanova, E., Gurova, M., 2014. Chert raw materials and artefacts from NE Bulgaria: A combined petrographic and LA-ICP-MS study. *Journal of Lithic Studies*, 1 (2), 25–45.
- Antoine, P., Coutard, S., Guerin, G., ... Loch, J.-L., Paris, C., 2016. Upper Pleistocene loess-palaeosol records from Northern France in the European context: Environmental background and dating of the Middle Palaeolithic. *Quaternary International*, , 411, 4–24
- Antoine, P., Lagroix, F., Jordanova, D., Jordanova, N., Lomax, J., Fuchs, M., Debret, M., Rousseau, D.-D., Hatte, C., Gauthier, C., Moine, O., Taylor, S.N., Till, J.L., Coutard, S., 2019. A remarkable late Saalian (MIS 6) loess (dust) accumulation in the lower Danube at Harletz (Bulgaria). *Quat. Sci. Rev.*, 207, 80–100.
- Antoine, P., Rousseau, D.-D., Zöller, L., ... Hatté, C., Fontugne, M., 2001. High-resolution record of the last interglacial-glacial cycle in the Nussloch loess-palaeosol sequences, upper rhine area, Germany. *Quaternary International*, 76-77, 211–229
- Ao, H., Rohling, E.J., Stringer, C., Roberts, A.P., Dekkers, M.J., Dupont-Nivet, G., Yu, J., Liu, Q., Zhang, P., Liu, Z., Ma, X., Zhou, W., Jin, Z., Xiao, G., Wang, H., Sun, Q., Yang, P., Peng, X., Shi, Z., Qiang, X., An, Z., 2020. Two-stage mid-Brunhes climate transition and mid-Pleistocene human diversification. *Earth Sci. Rev.* 210, 103354.
- Archer D., Martin P., Buffett B., Brovkin V., Rahmstorf S., Ganopolski A., 2004. The importance of ocean temperature to global biogeochemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 222, 333 – 348
- Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I., 2023. Magnetostratigraphy of the Pleistocene loess-palaeosol sequences in Ukraine and Moldova: a historical overview and recent developments. *Geological Quarterly*, 67, 35.
- Balescu, S., Jordanova, D., Brisson, L.F., Hardy, F., Huot, S., Lamothe, M. 2020. Luminescence chronology of the northeastern Bulgarian loess-paleosol sequences (Viatovo and Kaolinovo). *Quat. Int.*, 552, 15 – 24.
- Balescu, S., Lamothe, M., Mercier, N., Huot, S., Balteanu, D., Billard, A., Hus, J., 2003. Luminescence chronology of Pleistocene loess deposits from Romania: testing methods of age correction for anomalous fading in alkali feldspars. *Quat. Sci. Rev.* 22, 967–973.
- Balescu, S., Lamothe, M., Panaiotu, C.G., Panaiotu, C.E., 2010. La chronologie IRSL des séquences loessiques de l'Est de la Roumanie. *Quaternaire* 21 (2), 115–126.
- Balsam, W.L., Ellwood, B.B., Ji, J., Williams, E.R., Long, X., El Hassani, A., 2011. Magnetic susceptibility as a proxy for rainfall: worldwide data from tropical and temperate climate. *Quat. Sci. Rev.* 30, 2732–2744.
- Barcellos, D., O'Connell, C.S., Silver, W., Meile, C., Thompson, A., 2018. Hot spots and hot moments of soil moisture explain fluctuations in iron and carbon cycling in a humid tropical forest soil. *Soil Syst.* 2, 59. <https://doi.org/10.3390/soilsystems2040059>.
- Barker, S., Knorr, G., Edwards, R. L., Parrenin, F., Putnam, A. E., Skinner, L. C., Wolff, E., Ziegler, M., 2011. 800,000 Years of Abrupt Climate Variability, *Science*, 334, 347–351.
- Barth, A. M., Clark, P. U., Bill, N. S., He, F., Pisias, N. G., 2018. Climate evolution across the Mid- Brunhes Transition, *Clim. Past*, 14, 2071–2087.
- Baumgartner, J., Bertinetti, L., Widdrat, M., Hirt, A.M., Faivre, D., 2013. Formation of magnetite nanoparticles at low temperature: from superparamagnetic to stable single domain particles. *PLoS ONE* 8 (3), e57070. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057070>.
- Baumgartner, S., Beer, J., Wagner, G., Kubik, P.W., Suter, M., Raisbeck, G.M., Yiou, F., 1997. 10 Be and dust. *Nuclear Instruments and Methods*, B123, 296 – 301.
- Belkin, H.E., Rolandi, G., Jackson, J.C., Cannatelli, C., Doherty, A. L., Petrosino, P., De Vivo, B., 2016. Mineralogy and geochemistry of the older (>40 ka) ignimbrites on the Campanian plain, southern Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, 1–18.
- Bozhilova, E., 1986. Palaeoecological conditions and changes of the vegetation of Eastern and South-western Bulgaria during the last 15 000 years, Doctoral dissertation, Bulg. Acad. Sci., Sofia (in Bulgarian).
- Buggle, B., Glaser, B., Zöller, L., Hambach, U., Markovic, S., Glaser, I., Gerasimenko, N., 2008. Geochemical characterization and origin of Southeastern and eastern European loesses (Serbia, Romania, Ukraine). *Quat. Sci. Rev.* 27, 1058–1075.

- Buggle, B., Hambach, U., Glaser, B., Gerasimenko, N., Markovic, S., Glaser, I., Zoller, L., 2009. Stratigraphy, and spatial and temporal paleoclimatic trends in Southeastern/Eastern European loess–paleosol sequences. *Quaternary International* 196, 86–106
- Cashman, K., Rust, A., 2016. Introduction: part 2: Volcanic Ash: generation and spatial variations. In: *Volcanic Ash: Hazard Observation*. Elsevier, pp. 5–22
- Channell, J.E.T., Singer, B.S., Jicha, B.R., 2020. Timing of Quaternary geomagnetic reversals and excursions in volcanic and sedimentary archives. *Quaternary Science Reviews*, 228, art. 106114
- Condie, K.C., 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, 104, 1–37.
- Constantin, D., Cameniță, A., Panaiotu, C., Necula, C., Codrea, V., Timar-Gabor, A., 2015. Fine and coarse-quartz SAR-OSL dating of last glacial loess in southern Romania. *Quaternary International*, 357, 33–43.
- Constantin, D., Mason, J.A., Veres, D., Hambach, U., Panaiotu, C., Zeeden, C., Zhou, L., Markovic, S.B., Gerasimenko, N., Avram, A., Tecsa, V., Groza-Sacaciu, S.M., del Valle Villalonga, L., Begy, R., Timar-Gabor, A., 2021. OSL-dating of the Pleistocene–Holocene climatic transition in loess from China, Europe and North America, and evidence for accretionary pedogenesis. *Earth-Sci. Rev.* 221, 10376.
- Cornell, R. and Schwertmann, U., 2003. *The Iron Oxides. Structure, properties, reactions, occurrence and uses*. Weinheim, New York.
- Crouvi, O., Sun, J., Rousseau, D.-D., Muhs, D.R., Zárte, M.A., Marx, S., 2024. Loess records. In: *Encyclopedia of Quaternary Science*, 3rd Edition; Editor: Elias, S.A., Elsevier, ISBN: 9780323999311
- Culicov, O.A., Trtić-Petrović, T., Nekhoroshkov, P.S., Zinicovscaia, I., Duliu, O.G., 2022. On the Geochemistry of the Danube River Sediments (Serbian Sector). *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19, 12879.
- Dearing, J., Bird, P., Dann, R. & Benjamin, S., 1997. Secondary ferrimagnetic minerals in Welsh soils: a comparison of mineral magnetic detection methods and implications for mineral formation, *Geophys. J. Int.*, **130**, 727–736
- Di Genova, D., Brooker, R.A., Mader, H.M., Drewitt, J.W.E., Longo, A., Deubener, J., Neuville, D.R., Fanara, S., Shebanova, O., Anzellini, S., Arzilli, F., Bamber, E.C., Hennet, L., La Spina, G., Miyajima, N., 2020. In situ observation of nanolite growth in volcanic melt: A driving force for explosive eruptions. *Sci. Adv.* 6, eabb0413
- Di Genova, D., Caracciolo, A., Kolzenburg, S., 2018. Measuring the degree of “nanotilization” of volcanic glasses: Understanding syn-eruptive processes recorded in melt inclusions. *Lithos* 318–319, 209–218.
- Dixon, J.L., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., 2016. Climate-driven thresholds for chemical weathering in postglacial soils of New Zealand. *J. Geophys. Res., Earth Surf.* 121, 1619–1634. <https://doi.org/10.1002/2016JF003864>
- Dobos, A. and Iovita, R., 2016. The Lower Paleolithic of Romania Revisited: New Evidence from the Site of Dealul Guran. In: Harvati, K. and Roksandic, M. (eds.), *Paleoanthropology of the Balkans and Anatolia, Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology*. Springer Science+Business Media, Dordrecht, DOI 10.1007/978-94-024-0874-4_11
- Dunlop, D., Özdemir, O., 1997. *Rock Magnetism. Fundamentals and Frontiers*. In: Edwards, D. (Ed.), *Cambridge Studies in Magnetism*. Cambridge University Press.
- Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., 2013. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*, 1. Paperback ed. with corr., 2. ed., reprinted. ed. Cambridge studies in magnetism. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Dürig, T., Mele, D., Dellino, P., Zimanowski, B., 2012. Comparative analyses of glass fragments from brittle fracture experiments and volcanic ash particles. *Bull. Volcanol.* 74, 691–704.
- Eger, A., Almond, P.C., Condon, L.M., 2012. Upbuilding pedogenesis under active loess deposition in a super-humid, temperate climate — quantification of de-position rates, soil chemistry and pedogenic thresholds. *Geoderma* 189–190, 491–501.
- Elsasser, W., Ney, E. P., & Winckler, J. R., 1956. Cosmic ray intensity and geomagnetism. *Nature*, 178 (4544), 1226–1227
- Evlogiev, Y., 2007. Evidence for the Aeolian origin of loess in the Danubian Plain. *Geologica Balcanica*, 36/3-4, 31-39
- Floyd, P. A. and Leveridge, B. E., 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society, London*, 144, 531 – 542.
- Forster, T., Heller, F., Evans, M.E., Havlíček, P., 1996. Loess in the Czech Republic: Magnetic properties and paleoclimate. *Stud Geophys Geod* 40, 243–261.
- Forster, Th., Evans, M.E., Heller, F., 1994. The frequency dependence of low field susceptibility in loess sediments, *Geophys. J. Int.*, 118, 636 – 642.
- Ganopolski, A., 2024. Toward generalized Milankovitch theory (GMT). *Clim. Past*, 20, 151–185
- Gao X., Hao Q., Wang L., Oldfield F., Bloemendal J., Deng C., Song Y., Ge J., Wu H., Xu B., Li F., Han L., Fu Y., Guo Z., 2018. The different climatic response of pedogenic hematite and ferrimagnetic minerals: Evidence from particle-sized modern soils over the Chinese Loess Plateau, *Quaternary Science Reviews*, 179, 69-86.
- Garrels, R.M., Mackenzie, F.T., 1971. *Evolution of Sedimentary Rocks*. Norton & Company, New York, p. 397
- Geiss, C.E., Zanner, C.W., 2007. Sediment magnetic signature of climate in modern loessic soils from the Great Plains. *Quat. Int.* 162–163, 97–110

- Giaccio, B., Hajdas, I., Isaia, R., Deino, A., Nomade, S., 2017. High-precision ^{14}C and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Campanian Ignimbrite (Y-5) reconciles the time-scales of climatic-cultural processes at 40 ka. *Sci Rep* 7, 45940
- Graly, J.A., Reusser, L.J., Bierman, P.R., 2011. Short and long-term delivery rates of meteoric ^{10}Be to terrestrial soils. *Earth and Planetary Science Letters* 302, 329–336.
- Gurova, M., Andreeva, P., Stefanova, E., Aladzhov, A., Bonsall, C., 2022. Petrographic and geochemical analyses of flint raw materials from Bulgaria: a reliable combination for provenance studies of archaeological flint. *Quat. Int.*, 615, 18–32
- Guyodo, Y., and J.-P. Valet, 1999. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr, *Nature*, 399, 249–252
- Haase, D., Fink, J., Haase, G., Ruske, R., Pécsi, M., Richter, H., Altermann, M., Jäger, K.-D., 2007. Loess in Europe — its spatial distribution based on a European Loess Map, 1:2 500 000. *Quat. Sci. Rev.*, 26, 1301–1312.
- Haesaerts P., Metsdagh H., 2000. Pedosedimentary evolution of the last interglacial and early glacial sequence in the European loess belt from Belgium to central Russia. *Geol. Mijnb.*, 79 (2–3), 313–324
- Hao, Q., F. Oldfield, J. Bloemendal, J. Torrent, and Z. Guo, 2009. The record of changing hematite and goethite accumulation over the past 22 Myr on the Chinese Loess Plateau from magnetic measurements and diffuse reflectance spectroscopy, *J. Geophys. Res.*, 114, B12101.
- Hao, Q., Guo, Z., 2005. Spatial variations of magnetic susceptibility of Chinese loess for the last 600 kyr: Implications for monsoon evolution. *J. Geophys. Res.* 110, B12101.
- Heikkilä, U., Beer, J., Abreu, J., Steinhilber, F., 2013. On the atmospheric transport and deposition of the cosmogenic radionuclides (^{10}Be): a review. *Space Sci Rev.*, 176, 321–332.
- Heikkilä, U., Beer, J., Feichter, J., 2009. Meridional transport and deposition of atmospheric ^{10}Be , *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 515–527
- Heller, F., Evans, M., 1995. Loess magnetism. *Rev. Geophys.* 33, 211–240.
- Housden, J. & O'Reilly, W., 1990. On the intensity and stability of the natural remanent magnetization of ocean floor basalts, *Phys. Earth planet. Inter.*, 64, 261–279.
- Imbrie, J., E. Boyle, S. Clemens, A. Duffy, W. Howard, G. Kukla, J. Kutzbach, D. Martinson, A. McIntyre, A., Mix, B. Molfino, J. Morley, L. Peterson, N. Pisias, W., Prell, M. Raymo, N. Shackleton and Toggweiler, 1992. On the structure and origin of major glaciation cycles, 1: Linear responses to Milankovitch forcing, *Paleoceanography* 7, 701–738.
- Iovita, R., Doboş, A., Fitzsimmons, K., Probst, M., Hambach, U., Robu, M., Vlaicu, M., Petculescu, A., 2014. Geoarchaeological prospection in the loess steppe: Preliminary results from the Lower Danube Survey for Paleolithic Sites. *Quaternary International*, 351, 98–114.
- Iovita, R., Fitzsimmons, K.E., Dobos, A., Hambach, U., Hilgers, A., Zander, A., 2012. Dealul Guran: evidence for Lower Palaeolithic (MIS 11) occupation of the Lower Danube loess steppe. *Antiquity*, 86, 973–989.
- Jiang, Z., Liu, Q., Roberts, A.P., Barrón, V., Torrent, J., Zhang, Q., 2018. A new model for transformation of ferrihydrite to hematite in soils and sediments. *Geology* 46 (11), 987–990.
- Jipa, D.C., 2014. The conceptual sedimentary model of the Lower Danube loess basin: Sedimentogenetic implications. *Quaternary International*, 351, 14 – 24
- Johnson, D.L., Watson-Stegner, D., 1987. Evolution model of pedogenesis. *Soil Sci.* 143 (5), 349–366.
- Jordanova D. & Petersen, N., 1999b. Palaeoclimatic record from a loesssoil profile in northeast Bulgaria – II. Correlation with global climatic events during the Pleistocene, *Geophys. J. Int.*, **138** (2), 533–540.
- Jordanova, D., Laag, C., Jordanova, N., Lagroix, F., Georgieva, B., Ishlyanski, D., Guyodo, Y., 2022. A detailed magnetic record of Pleistocene climate and distal ash dispersal during the last 800 kyrs -The Suhia Kladenetz quarry loess - paleosol sequence near Pleven (Bulgaria). *Global Planet. Change*, 214, 103840
- Jordanova, N., Jordanova, D., Petrov, P., 2016. Soil magnetic properties in Bulgaria at a national scale—Challenges and benefits. *Global and Planetary Change*, 137, 107–122
- Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, Dreyfus G, Falourd S, Hoffmann G, Minster B, Nouet J, Barnola JM, Chappellaz J, Fischer H, Gallet JC, Johnsen S, Leuenberger M, Loulergue L, Luethi D, Oerter H, Parrenin F, Raisbeck G, Raynaud D, Schilt A, Schwander J, Selmo E, Souchez R, Spahni R, Stauffer B, Steffensen JP, Stenni B, Stocker TF, Tison JL, Werner M, Wolff, EW, 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science*. 317 (5839), 793–6.
- Kirkby, M.J., 2018. A conceptual model for physical and chemical soil profile evolution. *Geoderma* 331, 121–130
- Knowles, J.E., 1981. The properties of acicular particles of $(\text{cFe}_2\text{O}_3)_x (\text{Fe}_3\text{O}_4)_{1-x}$, *J. Magn. Magnetic Mater.*, 22, 262–266.
- Korschinek, G., Bergmaier, A., Faestermann, T., Gerstmann, U., Knie, K., Rugel, G., Wallner, A., Dillmann, I., Dollinger, G., Von Gostomski, C.L., et al., 2010. A new value for the half-life of ^{10}Be by heavy-ion elastic recoil detection and liquid scintillation counting. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. Atoms*, 268, 187 – 191.

- Laag, C., Hambach, U., Zeeden, C., Lagroix, F., Guyodo, Y., Veres, D., Jovanovic, M., Markovic, S.B., 2021. A detailed paleoclimate proxy record for the middle Danube Basin over the last 430 kyr: a rock magnetic and colorimetric study of the Zemun loess-paleosol sequence. *Frontiers in Earth Science*, 9, 600086.
- Lambert, F., Bigler, M., Steffensen, J.P., Hutterli, M., Fischer, H., 2012. Centennial mineral dust variability in high-resolution ice core data from Dome C, Antarctica. *Clim. Past* 8 (2), 609–623.
- Lehmkuhl, F., Nett, J.J., Potter, S., Schulte, P., Sprafke, T., Jary, Z., Antoine, P., Wacha, L., Wolf, D., Zerboni, A., Hošek, J., Marković, S.B., Obrecht, I., Sümegei, P., Veres, D., Zeeden, C., Boemke, B., Schaubert, V., Viehweger, J., Hambach, U., 2021. Loess landscapes of Europe – Mapping, geomorphology, and zonal differentiation. *Earth-Sci. Rev.* 215, 103496.
- Leicher N, Giaccio B, Zanchetta G, Sulpizio R, Albert PG, Tomlinson EL, Lagos M, Francke A, Wagner B., 2021. Lake Ohrid's tephrochronological dataset reveals 1.36 Ma of Mediterranean explosive volcanic activity. *Scientific Data*, 8 (1), article 231.
- Leicher N., Zanchetta G., Sulpizio R., Giaccio B., Wagner B., Nomade S., Francke A., Del Carlo P., 2016. First tephrostratigraphic results of the DEEP site record from Lake Ohrid (Macedonia and Albania). *Biogeosciences*, 13, 2151–2178.
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography* 20, PA1003.
- Liu, Q., Banerjee, S.K., Jackson, M.J., Chen, F., Pan, Y., Zhu, R., 2004. Determining the climatic boundary between the Chinese loess and palaeosol: evidence from aeolian coarse-grained magnetite. *Geophys. J. Int.* 156, 267–274.
- Liu, Q., J. Torrent, B. A. Maher, Y. Yu, C. Deng, R. Zhu, and X. Zhao, 2005. Quantifying grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess and its significance for pedogenesis, *J. Geophys. Res.*, 110, B11102.
- Lomax, J., Fuchs, M., Antoine, P., Rousseau, D.-D., Lagroix, F., Hatte, C., Taylor, S.N., Till, J. L., Debret, M., Moine, O., Jordanova, D., 2019. A luminescence-based chronology for the Harletz loess sequence, Bulgaria. *Boreas*, 48, 179 – 194.
- Long, L.Q., Hue, T.T.B., Hoan, N.X., Cuong, L.V., Thang, P.D., Hoang, T., Truc, T.T.A., 2016. Growth mechanism and stability of magnetite nanoparticles synthesized by the hydrothermal method. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 16, 7373–7379.
- Long, X.Y., Ji, J.F., Balsam, W., Barron, V., Torrent, J., 2015. Grain growth and transformation of pedogenic magnetic particles in red Ferralsols. *Geophys. Res. Lett.* 42 (14), 5762–5770.
- Lowe, D.J., 2011. Tephrochronology and its application: a review. *Quat. Geochronol.*, 6, 107–153.
- Lowe, D.J., Tonkin, P.J., 2010. Unravelling upbuilding pedogenesis in tephra and loess sequences in New Zealand using tephrochronology. In: Gilkes, R.J., Prakongkep, N. (Eds.), *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science “Soil Solutions for a Changing World”*, Brisbane, pp.34–37.
- Lowrie, W., 1990. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophysical Research Letters*, 17, 159 – 162.
- Maher B.A., Yu H.M., Helen Roberts H.M., Wintle A.G., 2003. Holocene loess accumulation and soil development at the western edge of the Chinese Loess Plateau: implications for magnetic proxies of palaeorainfall. *Quaternary Science Reviews*, 22, 445 – 451.
- Maher, B. & Thompson, R., 1995. Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols, *Quat. Res.*, 44, 383–391.
- Maher, B. A., 1988. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. *Geophys. J.*, 94, 83 – 96.
- Maher, B.A., 2016. Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau. *Quat. Sci. Rev.* 154, 23–84.
- Marković, S.B., Hambach, U., Stevens, T., Kukla, G.J., Heller, F., McCoy, W.D., Oches, E.A., Buggle, B., Zöller, L., 2011. The last million years recorded at the Stari Slankamen (Northern Serbia) loess-palaeosol sequence: revised chronostratigraphy and long-term environmental trends. *Quat. Sci. Rev.*, 30, 1142–1154.
- Marković, S.B., Heller, F., Kukla, G.J., Gaudenyi, T., Jovanovic, M., Miljkovic, Lj., 2003. Magnetostratigrafija lesnog profila Cot u Starom Slankamenu. *Zbornik radova Departmana za geografiju* 32, 20e28 (In Serbian with English summary).
- Marković, S.B., Stevens, T., Kukla, G.J., Hambach, U., Fitzsimmons, K.E., Gibbard, P., Buggle, B., Zech, M., Guo, Z., Hao, Q., Wu, H., O'Hara Dhand, K., Smalley, I.J., Újvári, G., Sümegei, P., Timar-Gabor, A., Veres, D., Sirocko, F., Vasiljević, D.A., Jary, Z., Svensson, A., Jović, V., Lehmkuhl, F., Kovács, J., Svirčev, Z., 2015. Danube loess stratigraphy — towards a pan-European loess stratigraphic model. *Earth-Sci. Rev.*, 148, 228–258.
- Maslin M.A., Brierley C.M., 2015. The role of orbital forcing in the Early Middle Pleistocene Transition. *Quaternary International*, 389, 47 – 55.
- Mason, J.A., 1998. Relative rates of Peoria loess accumulation and pedogenic processes: implications for paleoclimatic inference. *Quat. Int.* 51/52, 169–174.
- Maxbauer D.P., Feinberg J.M., Fox, D.L., 2016. Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth-Science Reviews*, 155, 28–48.

- Milanković, M., 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem Königl. Serb. Akad., p. 633(in German)
- Necula, C., Dimofte, D., Panaiotu, C., 2015. Rock magnetism of a loess-palaeosol sequence from the western Black Sea shore (Romania). *Geophys. J. Int.* 202 (3), 1733–1748.
- Necula, C., Lascu, I., Panaiotu, C., Gheorghe, D., 2024. Resolving the interpretation of magnetic coercivity components from backfield isothermal remanence curves using unmixing of non-linear Preisach maps: Application to loess-palaeosol sequences. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 129, e2024JB029004.
- Necula, C., Panaiotu, C., Heslop, D., Dimofte, D., 2013. Climatic control of magnetic granulometry in the Mircea Vodă loess/palaeosol sequence (Dobrogea, Romania). *Quaternary International*, 293, 5–14.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717.
- Obreht, I., Zeeden, C., Hambach, U., Veres, D., Markovic, S. B., Bosken, J., Svircev, Z., Bacevic, N., Gavrilov, M. B., Lehmkuhl, F., 2016. Tracing the influence of Mediterranean climate on south eastern Europe during the past 350,000 years. *Scientific Reports*, 6, 36334
- Overpeck J.T., Otto-Bliesner B.L., Miller G.H., Muhs D.R., Alley R.B., Kiehl J.T., 2006. Paleoclimatic Evidence for Future Ice-Sheet Instability and Rapid Sea-Level Rise. *Science*, 311, 1747 – 1750.
- Özdemir, O. & Dunlop, D., 1989. Chemico-viscous remanent magnetization in the Fe₃O₄-cFe₂O₃ system, *Science*, 243, 1043–1047.
- Panaiotu, C.G., Panaiotu, E.C., Grama, A., Necula, C., 2001. Paleoclimatic record from loess - paleosol profile in south-eastern Romania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26, (11-12), 893 – 898.
- Pardo, N., Cronin, S.J., N’emeth, K., Brenna, M., Schipper, C.I., Breard, E., White, J.D., Procter, J., Stewart, B., Agustín-Flores, J., Moebis, A., Zernack, A., Kereszturi, G., Lube, G., Auer, A., Neall, V., Wallace, C., 2014. Perils in distinguishing phreatic from hreatomagmatic ash; insights into the eruption mechanisms of the 6 August 2012. Mt. Tongariro eruption, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 286, 397–414.
- Past Interglacials Working Group of PAGES, 2016. Interglacials of the last 800,000 years. *Rev. Geophys.* 54, 162–219. <https://doi.org/10.1002/2015RG000482>.
- Pötter, S., Schmitz, A., Lücke, A., Schulte, P., Obreht, I., Zech, M., et al., 2021b. Middle to Late Pleistocene environments based on stable organic carbon and nitrogen isotopes of loess-palaeosol sequences from the Carpathian Basin. *Boreas*, 50, 184–204
- Pötter, S., Veres D, Baykal, Y., Nett, J., Schulte, P., Hambach, U., Lehmkuhl F., 2021a. Disentangling Sedimentary Pathways for the Pleniglacial Lower Danube Loess Based on Geochemical Signatures. *Front. Earth Sci.*, 9, 600010.
- Radaković, M.G., Gavrilov, M.B., Hambach, U., Schaetzl, R.J., Tošić, I., Ninkov, J., Vasin, J., Marković, S.B., 2019. Quantitative relationships between climate and magnetic susceptibility of soils on the Bačka Loess Plateau (Vojvodina, Serbia). *Quat. Int.* 502, 85–94.
- Radan, S.C., 2012. Towards a synopsis of dating the loess From the Romanian plain and Dobrogea: Authors and methods through time. *Geo-Eco-Marina*, 18, 153 – 172.
- Raisbeck, G. M., Yiou, F., Cattani, O., & Jouzel, J., 2006. 10Be evidence for the Matuyama Brunhes geomagnetic reversal in the EPICA Dome C ice core. *Nature*, 444(7115), 82–84
- Reeves, D., Rothman, D.H., 2013. Age dependence of mineral dissolution and precipitation rates. *Glob. Biogeochem. Cycles* 27, 906–919. <https://doi.org/10.1002/gbc.20082>.
- Ridgwell, A. J., 2002. Dust in the Earth system: the biogeochemical linking of land, air and sea. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 360, 2905–2924.
- Rollinson, H. and Pease, V., 2021. Using Geochemical Data to Understand Geological Processes. 2nd edition. Chapter 3 - Using Major Element Data, pp.49 – 95. Cambridge University Press, Online ISBN: 9781108777834
- Ross, P.S., Dürig, T., Comida, P.P., Lefebvre, N., White, J.D., Andronico, D., Thivet, S., Eycheenne, J., Gurioli, L., 2022. Standardized analysis of juvenile pyroclasts in comparative studies of primary magma fragmentation; 1. Overview and workflow. *Bull. Volcanol.* 84 (1), 1–29.
- Rousseau, D. D., Antoine, P., Hatté, C., Lang, A., Zöller, L., Fontugne, M., Ben Othman, D., Luck, J. M., Moine, O., Labonne, M., Bentaleb, I., Jolly, D., 2002. Abrupt millennial climatic changes from Nussloch (Germany) UpperWeichselian eolian records during the Last Glaciation, *Quaternary Sci. Rev.*, 21, 1577–1582.
- Ruddiman W.F., 2006. Orbital changes and climate. *Quaternary Science Reviews*, 25, 3092–3112.
- Salminen, R., Batista, M.J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., Jordan, G., Klaver, G., Klein, P., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mazreku, A., O’Connor, P.J., Olsson, S.Å., Ottesen, R.-T., Petersell, V., Plant, J.A., Reeder, S., Salpeteur, I., Sandström, H., Siewers, U., Steenfelt, A., Tarvainen, T., 2005. Geochemical Atlas of Europe. Part 1: Background Information, Methodology and Maps., in: FOREGS EuroGeoSurveys Geochemical Baseline Database. Geological Survey of Finland, Espoo.
- Schaetzl, R., Anderson, A., 2009. Soils. Genesis and Geomorphology. Cambridge Univ. Press, UK.
- Schirmer, W., 2016. Late pleistocene loess of the Lower Rhine. *Quat. Int.*, 411, 44–61

- Schwertmann, U., 1988. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments, in *Iron in Soils and Clay Minerals*, Vol.217, pp. 267–308, eds Stucki, J.; Goodman, B. & Schwertmann, U., NATO ASI Series, Series C: Mathematical and Physical Sciences, Reidel Publ. Company, Dordrecht, Holland.
- Shackleton, N., Berger, A. & Peltier, R., 1990. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP site 677, *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, 81, 251–261.
- Shackleton, N. & Hall, M.A., 1989. Stable isotope history of the Pleistocene at ODP site 677, *Proc. Ocean Drilling Prog., Sci. Results*, 111, 295–316.
- Simon, Q., Thouveny, N., Bourles, D. L., Bassinot, F., Savranskaia, T., Valet, J. P., ASTER Team, 2018. Increased production of cosmogenic ^{10}Be recorded in oceanic sediment sequences: Information on the age, duration, and amplitude of the geomagnetic dipole moment minimum over the Matuyama-Brunhes transition. *Earth and Planetary Science Letters*, 489, 191–202.
- Smith, Jr. K.L., Ruhl H. A., Bett B. J., Billett D. S. M., Lampitt R. S., Kaufmann R. S., 2009. Climate, carbon cycling, and deep-ocean ecosystems. *PNAS*, 106, 46, 19211–19218.
- Song, Y., Guo, Z., Marković, S., Hambach, U., Deng, C., Chang, L., Wu, J., Hao, Q., 2018. Magnetic stratigraphy of the Danube loess: a composite Titel-Stari Slankamen loess section over the last one million years in Vojvodina, Serbia. *J. Asian Earth Sci.*, 155, 68–80.
- Song, Y., Hao, Q., Ge, J., Zhao, D., Zhang, Y., Li, Q., Zuo, X., Lü, Y., Wang, P., 2014. Quantitative relationships between magnetic enhancement of modern soils and climatic variables over the Chinese Loess Plateau. *Quat. Int.* 334–335, 119–131
- Spassov, S., Heller, F., Evans, M.E., Yue, L.P., von Dobeneck, T., 2003. A lock-in model for the complex Matuyama-Brunhes boundary record of the loess/palaeosol sequence at Lingtai (Central Chinese Loess Plateau). *Geophys. J. Int.* 155, 350–366.
- Sun, Y.B., Clemens, S.C., Guo, F., Liu, X.X., Wang, Y., Yan, Y., Liang, L.J., 2021. High sedimentation- rate loess records: A new window into understanding orbital- and millennial-scale monsoon variability. *Earth-Sci. Rev.* 220, 103731
- Sun T., Guenther A., Hansson H.C., Kulmala M., Andreae M.O., Arneth A., Artaxo P., Blyth E., Brus M., Ganzeveld L., Kabat P., Noblet-Ducoudré N. de., Reichstein M., Reissell A., Rosenfeld D., Seneviratne S., 2015. The significance of land-atmosphere interactions in the Earth system—iLEAPS achievements and perspectives. *Anthropocene*, 12, 69–84.
- Szymanek, M. and Julien, M.-A., 2018. Early and Middle Pleistocene climate- environment conditions in Central Europe and the hominin settlement record. *Quaternary Science Reviews* 198, 56 - 75
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publications Ltd., p. 312.
- Thompson, A., Chadwick, O.A., Rancourt, D.G., Chorover, J., 2006. Iron-oxide crystallinity increases during soil redox oscillations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70 (7), 1710–1727.
- Thompson, R. and Oldfield, F., 1986. *Environmental Magnetism*. Springer Science+Business Media B.V. , Springer, Dordrecht
- Thompson, R., Maher, B.A., 1995. Age models, sediment fluxes and palaeoclimatic reconstructions for the Chinese loess and palaeosol sequences. *Geophys. J. Int.* 123, 611–622
- Tiedemann R., Sarnthein M., Shackleton N. J., 1994. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic $\delta^{18}\text{O}$ and dust flux records of Ocean Drilling Program Site 659. *Paleoceanography*, 9 (4), 619–638
- Timar, A., Vandenberghe, D., Panaiotu, E., Panaiotu, C., Necula, C., Cosma, C., van den Haute, P., 2010. Optical dating of Romanian loess using fine-grained quartz. *Quaternary Geochronology* 5, 143–148.
- Timar-Gabor, A., Panaiotu, C.G., Veres, D., Necula, C., & Constantin, D., 2017. The Lower Danube Loess, New Age Constraints from Luminescence Dating, Magnetic Proxies and Isochronous Tephra Markers. In: Radoane, M., Vespremeanu-Stroe, A. (eds) *Landform Dynamics and Evolution in Romania*. Springer Geography. Springer, Cham.
- Tugulan, L. C., Duliu, O. G., Bojar, A.-V., Dumitras, D., Zinicovskaia, I., Culicov, O. A., et al., 2016. On the geochemistry of the Late Quaternary loess deposits of Dobrogea (Romania). *Quat. Int.* 399, 100–110.
- Újvári, G., Varga, A., and Balogh-Brunstad, Z., 2008. Origin, weathering, and geochemical composition of loess in southwestern Hungary. *Quat. Res.* 69, 421–437.
- Újvári, G., Varga, A., Raucsik, B., and Kovács, J., 2014. The Paks loess-paleosol sequence: a record of chemical weathering and provenance for the last 800ka in the mid-Carpathian Basin. *Quat. Int.* 319, 22–37.
- van Velzen, A. and Zijdeveld, J., 1995. Effects of weathering on single domain magnetite in Early Pliocene marine marls, *Geophys. J. Int.*, 121, 267–278.
- Wegwerth, A., Dellwig, O., Wulf, S., Plessen, B., Kleinhanns, I.C., Nowaczyk, N.C., Jiabo, L., Arz, H.W., 2019. Major hydrological shifts in the Black Sea “Lake” in response to ice sheet collapses during MIS 6 (130–184 ka BP). *Quat. Sci. Rev.*, 219, 126–144
- Wegwerth, A., Kaiser, J., Dellwig, O., Arz, H. W., 2020. Impact of Eurasian Ice Sheet and North Atlantic climate dynamics on Black Sea temperature variability during the penultimate glacial (MIS 6, 130–184 ka BP). *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35, e2020PA003882.

- Worm, H.-U., 1998. On the superparamagnetic - stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility. *Geophys. J. Int.*, 133, 201-206.
- Worm, H.-U., 1999. The superparamagnetism of Yucca Mountain Tuff. *J. Geophys. Res.*, 104, B II, 25 415 – 25 425,
- Xu, X., Qiang, X., Hu, S., Zhao, H., Fu, C., Zhao, Q., 2020. Records of the Mid-Brunhes Event in Chinese loess-paleosol sequences. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 543, Article 109596
- Yoo, K., Mudd, S.M., 2008. Discrepancy between mineral residence time and soil age: implications for the interpretation of chemical weathering rates. *Geology* 36 (1), 35–38
- Zhou, W.J., Xian, F., Beck, J.W., Jull, A.J.T. , An, Z.S., Wu, Z.K. , Liu, M., Chen, M.B., Priller, A., Kutschera, W., Burr, G.S. , Yu, H.G. , Song, S.H. , Cheng, P., Kong, X.H.. 2010. Reconstruction of 130-kyr relative geomagnetic intensities from 10Be in two Chinese loess sections. *Radiocarbon*, 52 (1), 129–147.
- Zhou, W., Xian, F., Du, Y., Kong, X., Wu, Z., 2014. The last 130 ka precipitation reconstruction from Chinese loess 10Be. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 191–197,
- Zhou, W., Xie, X., Beck, W., Kong, X., Xian, F., Du, Y., Wu, Z., 2015. Recent progress of 10Be tracer studies in Chinese loess. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 361, 548–553.
- Zhou, W.J., Priller, A., Beck, J.W., Wu, Z.K., Chen, M.B., An, Z.S., Kutschera, W., Xian, F., Yu, H.G., Liu, L., 2007. Disentangling geomagnetic and precipitation signals in an 80- kyr Chinese loess record of 10Be. *Radiocarbon*, 49(1), 139–160.
- Zhou, WJ, Beck, JW, Kong, XH, et al., 2014. Timing of the Brunhes-Matuyama magnetic polarity reversal in Chinese loess using 10Be. *J. Geology*, 42(6), 467-470
- Zhu R., Liu Q., Pan Y., Deng C., Sun J., 2006. Identifying the origin of the magnetic directional anomalies recorded in the Datong loess profile, northeastern Chinese loess plateau. *Geophysical Journal International*, 164 (2), 312–318
- Большаков, В., Свиточ, А. А., 1995. Корреляция лёссово-почвенных разрезов северной Болгарии по магнитным и палеомагнитным данным. *Стратигр. Геол. Коррел.*, 3, (5), 104 – 112.
- Бъчварова, В. 1992. Магнитостратиграфия на неоген-кватернерни седименти от Източния и Централния Паратетис. Авт. канд. дис., С., БАН
- Велев, Ст. 1990. Климатът на България. С., Изд. „Народна просвета“.
- Евлогиев, Йордан, 2005. Плейстоценът и холоценът в Дунавската равнина. Дисертация за получаване на научната степен „ доктор на геолого - минералогическите науки“, ГИ – БАН, София.
- Евлогиев, Й., 2019. Кватернерна геология и геоморфология на Дунавската равнина. Изд. ГИ – БАН, София.
- Калчева, В., П. Ножаров, Й. Евлогиев. 1988. Палеомагнитни характеристики на льосовия комплекс в района на гр. Русе. - *Бълг. геоф. сп.*, 14, 4, 66-76