

Вътрешен строеж на планетата Земя

Иван Лалов, Невена Кожухарова

Човекът проявява вечно любопитство за Вселената и за своето място в света. Намира ли се Земята в центъра на видимия свят или е само една от планетите на Слънчевата система, която от своя страна е част от Галактиката? Какво е началото на Вселената, как са образувани планетите и кога?

Като търсим отговори на тези въпроси, насочваме нашите погледи към далечни светове, към звездите и планетите. Но познанията за планетата, на която живеем – Земята, макар

и много важни за науката, остават на заден план в курсовете по физика, астрономия, география. А геофизиката като наука е много съществена за търсенето на минерали, нефт, полезни изкопаеми и за изучаването на земетресенията. Тя е също изключително интересна като наука за вътрешния строеж на Земята, в чиито недра материалите се намират в екстремални условия, сравнени с условията на земната кора.

Кондензираните среди са основната форма на веществото на твърдата земя – до нейния център. По принцип те не се отличават по основните си характеристики от останалите кондензирани среди, които съставят неживата природа. Те показват диелектрични и полупроводникови свойства – в мантията, или свойства на течни или твърди метали – в земното

ядро. Основните различия произтичат от особените условия, които съществуват в недра на Земята, по-специално много високите налягания, които в центъра на Земята достигат до

3,5 милиона атмосфери, и високите температури, които в земното ядро достигат температурата на слънчевата повърхност (около 6000 K, а според някои модели и повече).

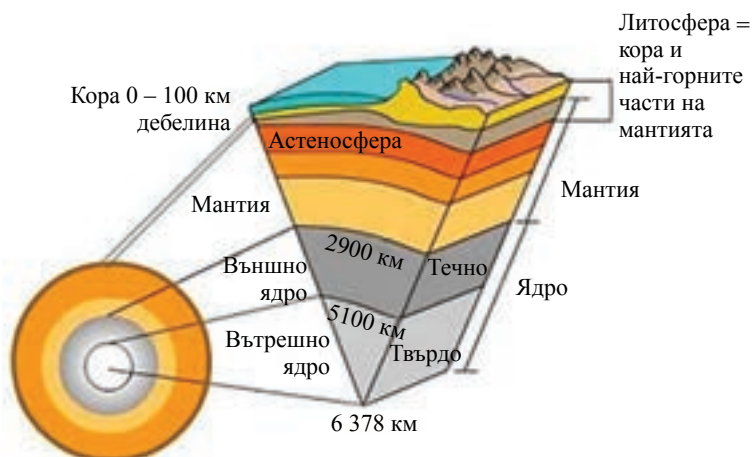
Основните методи за изследване на строежа на Земята са свързани с:

а) изследване разпространението на сеизмичните вълни, които имат различни скорости и характер на различна дълбочина;

б) изследване на магнитното поле на Земята в съвременността и в гревни геологични епохи (палеомагнетизъм);

в) изследване поведението на веществата със същия състав, както и мантията и ядрото на Земята, при високи налягания (специално при взривове);

г) широко използвани методи са свързани с изучаването – теоретично и експеримен-



Секторен разрез на Земята в дълбочина

тално – на модели на явленията и процесите в отделните части на Земята.

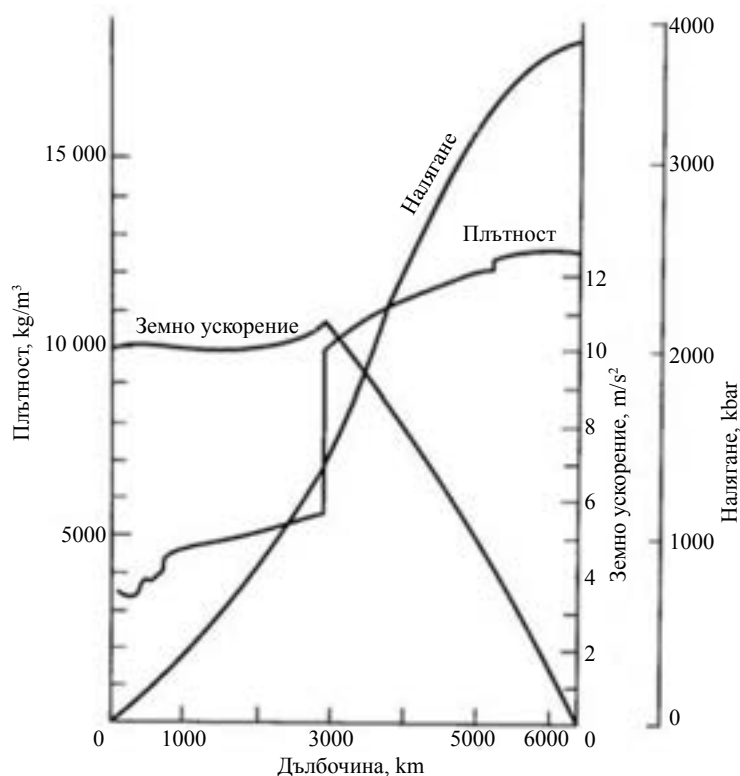
Под земната кора с дебелина няколко десетки километри (земната кора има различна дебелина, като континенталната кора е с дебелина 25 – 70 km, а океанската е значително по-тънка 5 – 10 – 20 km) се намират трите слоя на мантията. Границата между земната кора и мантията е наречена граница на Мохоровович по името на хърватския сеизмолог, който я въвежда в геофизиката през 1909 г. Мантията представлява твърда субстанция, а химическият ѝ състав е от силикати. Под мантията на дълбочина от 2900 до 5100 km от повърхността на Земята се намира външното ядро на Земята, което се състои от желязо с определено количество сяра. Външното ядро представлява течен метал със значителна проводимост, а конвекционните токове в него са причина за земния магнетизъм. Вътрешното ядро е твърда метална сплав от желязо с определен процент от никел.

Докато налягането монотонно расте с дълбочината (до споменатите около 3,6 милиона бара (1 бар $\approx$ 1 атмосфера), то плътността рязко нараства на границата между мантията и ядрото, а в самото ядро плътността е почти постоянна. Поради постоянната плътност земното ускорение

в ядрото е почти линейна функция от разстоянието до нула в центъра на Земята.

Мантията заема около 84 % от обема на земното кълбо и 69 % от неговата маса. Тя се състои от скални породи и се подразделя на три основни зони – горна мантия, преходна зона и долна мантия. Широко прието е схващането, че химичният състав на мантията не е съществено различен в тези три части, но минералите, които съществуват и определят свойствата на отделните части, са различни. Химичният състав е подобен на състава на минерала лерцолит, който на земната повърхност съдържа 60 % оливин (Mg_2SiO_4), 30 % пироксен ($MgSiO_3$) и 10 % полски шпат ($NaAlSi_3O_8$).

В горните 30 km на мантията, където тя контактува с континенталната и океанската кора, температурата нараства бързо (с няколко десетки K/km) и материалът частично е в състояние на стопилка. Твърдият слой от земната кора, наречен литосфера, образува плочи, които могат да се движат върху стопилката. Онези части от граничния слой между мантията и земната кора, които са в твърдо състояние, при съответната температура и налягане изпитват пластични деформации и могат да протичат, да се разпъзват. Това също създава условия за движение на континен-



Схематично представяне на зависимостта на налягането, плътността и земното ускорение от дълбочината (в модела на Андерсон и Харт от 1976 г.)

талните и океанските плочи. Движението на тези плочи е причина за дрейф на континентите, издигането на някои части и потъването на други, а също е съпътствано със силни земетресения. Дебелината на полутечния или протичащ слой, наречен астеносфера, разположен под литосферата, е от сто до няколкостотин километра.

Температурата на топене на скалните породи, които съставят мантията, нараства с налягането и от около 1100 °C на земната повърхност достига 2000 °C на дълбочина 350 км. При това температурата на топене нараства по-бързо с налягането в дълбочина и самата температура на мантията се оказва по-ниска от температурата на топене, а съответните породи се втвърдяват. Под полутечния слой в астено-

сферата на дълбочина под 250 – 300 км мантията е в твърдо състояние и в нея могат да се разпространяват напречни механични (сеизмични) вълни, каквито в течни кондензирани среди не съществуват. Известната ни от изригванията на вулканите магма се образува в горната част на мантията на дълбочина около 60 – 70 км, най-често на границата на плочите.

На дълбочина около 400 км и повече в резултат от фазови преходи (при повишените налягания) се извършва промяна в кристалографската структура, при което се повишава плътността. Долната мантия се състои от комплексите MgAl_2O_4 и MgSiO_3 , а също – калциев ферит (CaFeO_4).

Силикатите, които съставят мантията, при стайна температура са диелектрици,

но с повишаването на температурата се превръщат в полупроводници.

Основният тип проводимост в горните слоеве на мантията е примесна проводимост, която при 1000 °C има стойност $10^{-2} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ (при медта $\approx 10^8 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$). Порогите на мантията са лоши проводници на електричния ток и на топлината. Обаче при по-високи температури започва да се проявява електронна (собствена) проводимост, която в преходната зона и в долната мантия достига $100 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$.

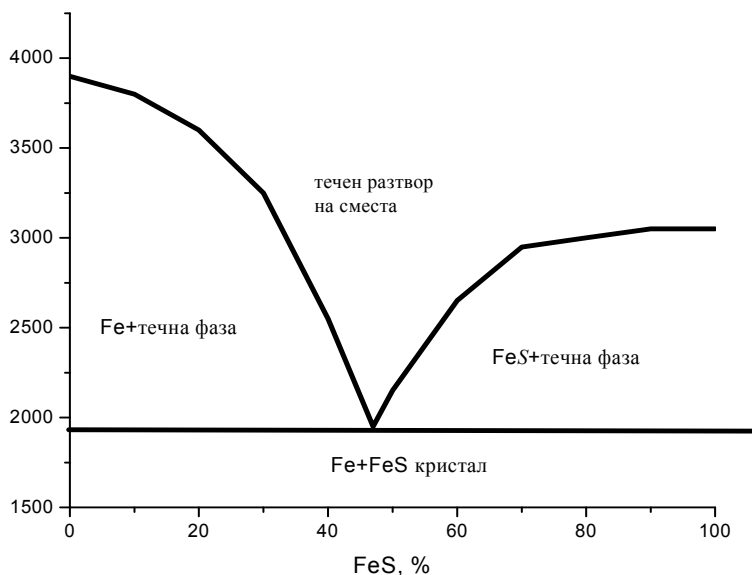
По оценки на хода на температурата в дълбочина, направени по електропроводимостта, за горната и долната част на преходната зона се получават стойности съответно 2000 K и 3000 K, а на границата мантия – ядро – около 4500 K. Тези стойности показват по-скоро завишени горни граници на температури.

Както вече споменахме, ядрото на Земята има радиус около 3470 km и се състои от тежки метали, от които голям процент е желязото. Ядрото заема около 16 % от обема на Земята, а неговата маса е

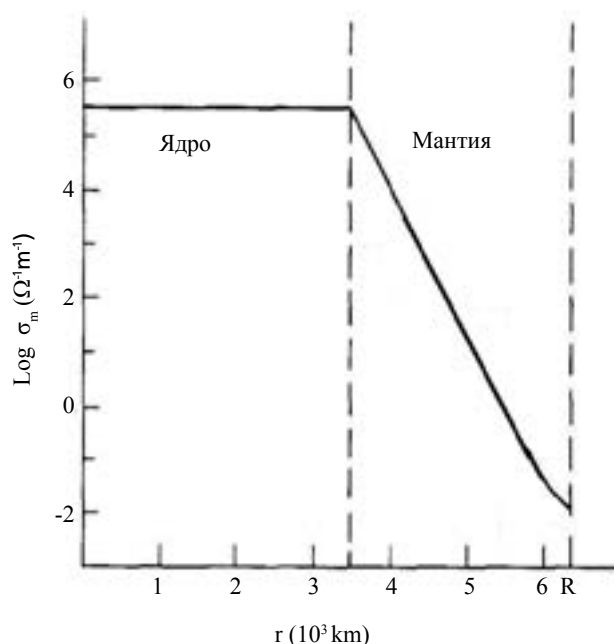
35 % от масата на Земята. Вътрешното ядро е твърдо с радиус 1250 km и освен желязо то съдържа 10 – 20 % никел. Външното ядро представлява течен слой с дебелина над 2000 km, като неговата граница с мантията лежи на дълбочина около 2900 km и е определена по данни от времето за разпространението и отражението на сеизмичните вълни от границата на ядрото. Химичният състав на външното ядро е смес от желязо и железен сулфид FeS и около 2 % Ni.

Течното състояние на външното ядро се потвърждава от липсата на т.нар. S вълни в него (напречни сеизмични вълни). Причината за течното състояние е, както при горната мантия, конкуренцията между два фактора – температурата, която действа за втечняване, и налягането, което повишава температурата на топене.

Химичният състав на външното ядро го характеризира като евтектична смес Fe-FeS. При всички т.нар. евтектики температурата на топене на сместа е по-ниска от температури на топене на всяка от



Евтектична смес от Fe +S при налягане на границата между мантията и ядрото



Изменение на проводимостта като функция от разстоянието до центъра на Земята

компонентите. При налягане на границата мантия – ядро (около $1,4 \cdot 10^6$ бара) тази температура за евтектиката е приблизително 2000°C и е по-ниска от действителната температура на външното ядро; затова то е течно. Наличието на евтектика Fe-FeS е една от причините да се приеме същата като съставен елемент на външното ядро, а не Si, който не създава евтектична смес с желязото.

Течното състояние на външното ядро е фактор за конвекционни токове в него, които, от своя страна, пораждат земния магнетизъм. Електричната проводимост на ядрото има метален характер (колективизирани валентни електрони) и се оценява като почти постоянна със стойност $\sigma \approx 5 \cdot 10^5 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$.

На границата външно – вътрешно ядро температурата на топене вече е по-висока поради повишените налягания. Реалната температура на сместа Fe-Ni е по-ниска от температурата на топене и централните

слоеве на Земята се намират в твърдо състояние на метална сплав.

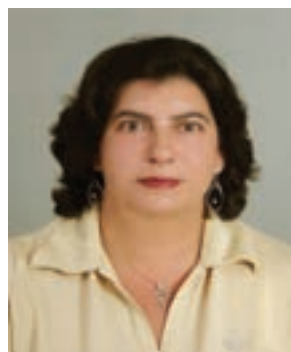
Еволюцията на ядрото остава дискуссионна, но се смята, че първоначално цялото ядро е било в разтопено състояние. Ядрото започва постепенно да изстива при намаляването на източниците на топлина. При това вътрешното ядро кристализира, като образува желязно-никелова сплав, обхваща голяма част от наличния Ni. Поради наличието на по-голям процент желязо във външното ядро, отколкото е общото съдържание на евтектиката Fe-FeS, процесът на кристализация на желязото продължава и сега. Макар да няма единно мнение, смята се, че процесът на нарастване на вътрешното ядро ще продължава до достигане на точното съотношение на компонентите Fe и FeS, характерно за евтектиката при съответното налягане. С по-нататъшното изстиване ще започне кристализация (втвърдяване) на самата евтектична смес.

Топлинни източници и топлинен баланс

Двата основни източници на енергия в земните недра са радиоактивните процеси и отделянето на гравитационна енергия и скрита топлина при кристализацията на вътрешното ядро. Анализирани са и други възможни източници на енергия, които могат да причинят загряването на Земята при образуването на нашата планета и след това до съвременността. Най-важният източник на енергия на земната повърхност – Слънцето – влияе върху температурата на атмосферата и на недълбок слой от континенталната кора и океанската повърхност. Енергията на Слънцето, достигнала до Земята, се излъчва изцяло обратно в Космоса. Ще споменем другите възможни източници на енергия в мантията и ядрото: а) топлина, отделена при образуването на Земята от превръщането на кинетичната енергия на частиците, които се привличат и падат върху първоначално образуваната планета. Тези частици имат значителна кинетична енергия, но след удара със Земята голяма част от енергията се излъчва в околното пространство, а само малка част – по оценки това са части от процента – се предава чрез възбудените еластични вълни в дълбочина. По-съществен принос за отделянето на топлина може да даде последващото адиабатно свиване (без приток на топлина отвън) на новообразуваните земни слоеве. Тези процеси се отнасят към периода на формиране на Земята и биха могли да увеличат температурата на централното ядро с около 900 °C; б) трансформация на енергия на околоосното въртене на Земята. Поради приливите, които привличането на Луната (и по-слабо на Слънцето) поражда върху водните маси и върху твърдите земни слоеве, въртенето на Земята се забавя. Предполага се, че при формирането на Земята денонощието е било по-късо от 10 часа (а може би дори два до четири часа). Забавянето е свързано с превръщането на кинетичната енергия на въртенето в то-



Проф. Иван Лалов е доктор на физическите науки, преподавател във Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“ (1961 – 2010 г.), професор по физика на електромагнитните явления и оптика.



Невена Кожухарова е преподавател в Техническия университет – София от 2006 г. Завършила е Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“ със специалност „Оптика и спектроскопия“.

плинна, която би могла да повиши температурата на планетните слоеве с около 2000 °C, ако цялата енергия се трансформира в дълбочина. Обаче този ефект би бил значително по-слаб, ако енергията на околоосното въртене се трансформира в топлинна в плитководните морета и океански води, които са най-чувствителни към приливите. Предаването на топлинна енергия от тези водни басейни към дълбоките земни слоеве е много слабо.

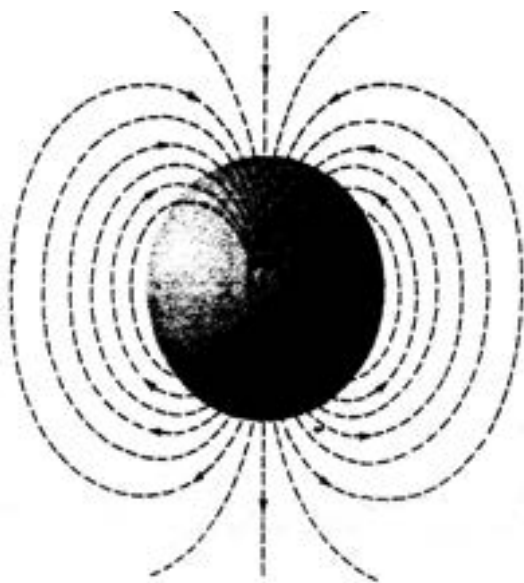
Безспорно най-важното явление, определило развитието на геофизичните процеси, е образуването на земното ядро, при което температурата на вътрешните земни слоеве се е повишила с няколко хиляди градуса. При втвърдяването на сплавта Fe-Ni се отделя скрита топлина, както при фазовия преход вода – лед. Поради лошата топлопроводност на мантията тази топлина се предава слабо на земната кора и в околното пространство. При образуването на земното ядро се наблюдава и т.нар. гравитационна конвекция. По-тежките елементи като Ni се насочват към центъра и намаляват своята гравитационна енергия, която се превръща във вътрешна (топлинна) енергия на течното външно ядро.

Дълговременни източници на енергия са радиоактивните изотопи, разпределени неравномерно, особено в горната мантия и в земната кора. Съвременните измервания на общия топлинен поток, излъчван от цялата земна повърхност (без преизлъчвания слънчев поток), показват стойности около 10^{21} джаула (J) за година. Приблизително такъв е притокът на енергия от радиоактивните разпадания. Разбира се, преди няколко милиарда години (ще споменем, че по съвременните схващания възрастта на Земята е около 4,6 млрд. години) радиоактивните процеси са били 8 – 10 пъти по-интензивни. Периодът на полуразпад на дългоживущите изотопи е от един до няколко милиарда години (най-вероятният радиоактивен изотоп ^{40}K има период на полуразпадане 1300 млн. г.). Поради намаляването на количеството разпадащи се материали в съвре-

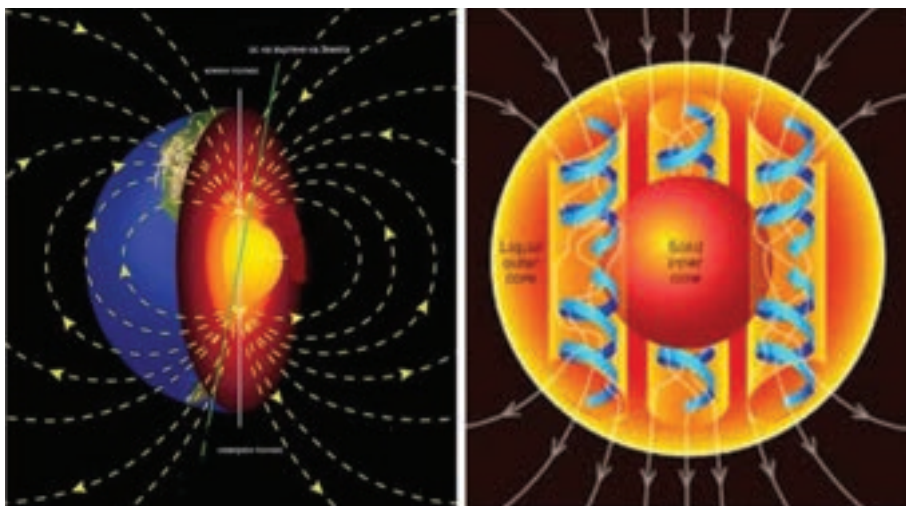
менността техният енергиен принос към затоплянето също намалява. За периода на развитие на Земята поради намаляване на притока на енергия температурата на Земята е спаднала с около 1000 ° – 2000 ° (по различни оценки).

Произход на земния магнетизъм

Магнитното поле на Земята се поражда от конвекционни токове, които представляват движение на течни метални струи по затворени контури във външното ядро. В първо приближение магнитното поле може да се опише като поле на огромен магнитен дипол (още придворният лекар на кралица Елизабет I – Джилберт, през 1600 г. говори в книгата за експерименти по електричество и магнетизъм за „големия магнит – Земята“). Изследванията на палеомагнетизма по състоянието на намагнитеност на различни скални породи в момента на тяхното втвърдяване позволяват да се твърди, че посоката на магнитното поле на Земята претърпява инверсия, т.е. периодично се преобръща. В съвременност-



Земята като постоянен магнитен дипол



Конвекционни токове във външното ядро (в течна фаза) като източник на земното магнитно поле

та този период на преобръщане е около 200 000 ($2 \cdot 10^5$) години, а по-малки периодични промени, без промяната на посоката на магнитното поле, са констатирани с период 8000 години.

От 40-те години на XX в. за източник на земния магнетизъм се смята т.нар. геомагнитно динамо, което действа в течното ядро. В теорията на динамото се показва, че слабо външно магнитно поле може да индуцира ток в намотка, която се върти в полето. Този ток при определена конфигурация може да усили външното магнитно поле и процесът на самовъзбуждане на динамото може да продължи, разбира се, при наличие на източник на енергия, който поддържа въртенето на намотката. По аналогичен начин движенията на метални струи в течното външно ядро могат да причинят силни индукционни токове, възбуждени например от слабото магнитно поле на Слънцето. Напомняме, че ядрото има значителна проводимост, която улеснява процесът на самовъзбуждането на геомагнитното динамо.

Тези токове усилват магнитното поле, което е причинило началната електромагнитна индукция, и този процес на вза-

имно възбуждане на индукционни токове и магнитно поле продължава. Естествено възниква въпросът за енергията, която „захранва“ динамото. Очевидно, задачата изисква съвместно разглеждане на уравненията за електромагнитното поле и хидродинамиката.

Във всеки случай в течното ядро съществуват взаимно свързани токови контури, които взаимодействат помежду си. По тези контури протичат индукционни токове, генериращи земното магнитно поле. Контурите са свързани, по всяка вероятност, с въртенето на Земята. Така можем да обясним близостта на оста на въртене на Земята и оста на земното магнитно поле.

Пресметнато е, че мощността, необходима за генериране на земното магнитно поле, е от 10^9 до 10^{11} W, като по-вероятна изглежда по-високата стойност.

Основен механизъм на предаване на енергия на геомагнитното динамо е гравитационната конвекция, спомената в предишната точка. Чрез нея се създават потоци от движещи се маси вещества (по-тежки към твърдото ядро, а по-леки слоеве към горната граница на външното ядро). КПД

на такива процеси е много висок (≈ 1). Отделянето на скрита топлина при кристализацията на границата на вътрешното ядро може да причини топлинна конвекция и също да поддържа, макар и по-неефективно, работата на геомагнитното динамо.

Усложнените физични условия във вътрешността на Земята – повишаваща се температура и налягане с приближаване към нейния център – не изменят основните характеристики на веществата, които съставят нашата планета. Земята е съставена от различни форми на кондензирани среди с характер на диелектрици в мантията и проводници в земното ядро. В това отношение земните недра и земната кора имат единна структура и, като кондензирана материя, са сравнително редки обекти във Вселената, в която около 99 % от веществото е във форма на плазма. Високите налягания в ядрото променят междоатомните разстояния, които могат да намаляват с около 23 %. Те могат да променят частично и електронния строеж, като електрони могат да преминат от по-външна към вътрешна орбитала, ако има свободни места за електрони. Но нито атомите, нито кондензираните среди, които те съставят, не променят екзотично своя строеж, както би било при екстремални условия на други обекти във Вселената, например при неутронните звезди.

Забележителните факти за свойствата на кондензираните среди, които съставят земната мантия и ядро, представляват важен дял от геофизиката. Ще споменем накратко някои съществени данни:

1. Противно на установените популярни схващания за преобладаваща стопилка на слоевете под земната кора, голям обем от

мантията и цялото централно ядро на Земята са твърди. В разтопено (течно) състояние е определен слой от горната мантия и външното ядро, което представлява евтектична смес Fe-FeS.

2. Земното кълбо се намира в относително стабилно състояние, определено от баланса между постъпващата и излъчванa енергия. Нивото на температурите в различните земни слоеве се поддържа от относителната топлинна инертност на земната мантия с нейната слаба топлопроводност, определена от молекулни (а не електронни) механизми на пренос на енергия в диелектрици.

3. Макар да представлява дискуссионен проблем, вероятно формирането на вътрешното твърдо ядро продължава. Интересна е цялата история на развитието на твърдата земя като геоложка и минералогична структура.

4. Много интересно като физика е описанието на земното магнитно поле и обяснението на неговото възбуждане и поддържане чрез геомагнитното динамо. Бъдещото поведение на земното магнитно поле в близък или по-далечен период представлява важен фактор за живота на Земята поради защитното действие на земното магнитно поле от йонизиращи лъчения от заредени частици със слънчев или космически произход.

Специален интерес представляват геофизиката на земната кора (отново като кондензирана материя), вулканичната дейност, земетресенията, взаимодействието между кората и мантията, движението на континенталните плочи и др., които засягат непосредствено нашата околна среда. ■



Непозната сколопендра амфибия!

Сколопендрите са едни от най-едрите представители на многобройния тип на Многоножките (*Myriapoda*). Обитават главно екваториалните и тропическите региони на планетата и малко видове са се приспособили за живот и в умерените страни. Предпочитат сухи и припечни места, където през деня се крият под камъните, пънове на дървета или в почвата и излизат на лов през нощта. Понякога навлизат и в човешките жилища. Някои видове имат внушителни размери – над 20 см, и внушават оправдан страх у всеки, който се докосне до тях. И напълно оправдано, защото много видове между тях имат на долната страна на главата си здрави хитинени челюсти, снабдени с отровни жлези. Сколопендрите смело влизат в битка не само с техните най-чести жертви – насекоми, червеи и др., но нападат и гребни гризачи и птици в гнездото. В България също живее един вид сколопендра с научното име *Scolopendra cingulata*, която се среща по-често в топлите южни райони на страната. Тя също има внушителни размери – до 10 – 15 см дължина, притежава яки хитинени челюсти с отровни жлези и ухапванията от нея са доста болезнени и неприятни за човека. От някои тропически видове, един от които се среща и в Южна Гърция – *Scolopendra morsitans*, ухапванията могат да бъдат понякога смъртоносни и за човека.

Едно от изненадващите зоологически открития през 2016 г., което бе включено от Международния институт за изследване на видовете в списъка на „10-те най-странни биологични вида“ за годината, е откриването и научното описание на една непозната досега сколопендра, която понякога търси спасение и жертви и във водата. Научното име на тази сколопендра амфибия, единствен случай досега от типа на Многоножките, е *Scolopendra cataracta*, а нейното видово име *cataracta* на латински език означава водопад. В действителност тази сколопендра амфибия е наблюдавана за първи път още през 2000 г. в природния резерват Khao Sok National Park в Тайланд от

сътрудника в Британския природонаучен музей в Лондон Джордж Бекалони (George Bescaloni) по време на годишната му отпуска. Той пръв наблюдавал странната сколопендра на сушата и в потоците на резервата, където тя ловко се движела по дъното и леко изпълзвала по камъните на брега. Тъй като Бекалони не бил специалист таксоном, той предал колекционерите от него екземпляри на неговите колеги от Британския музей. След по-подробно проучване на морфологията на животното, както и след ДНК анализи и сравнения с други близки видове сколопендри се оказало, че в случая се касае за неизвестен досега вид, останал незабелязан за науката до 2016 г. По-сетнешни наблюдения и проучвания над новия вид показаха, че той се среща и в Лаос и Виетнам, т.е. е регионален ендемит за Югоизточна Азия.

Според наблюденията на Бекалони и таксономичното описание на откривателите на новия таксон *Scolopendra cataracta* е доста едра и спада в групата на най-едрите представители на многоножките. На дължина достига до 20 см и има дълги здрави крака, с които бяга доста бързо както на сушата, така и във водата. По-късни наблюдения върху биологията и поведението на вида показали, че сколопендрата амфибия умее и да плува доста добре чрез хоризонтални змиевидни движения на тялото, подобно на змиорка. При излизане от водата сколопендрата оставала напълно суха поради хидрофобната кожата обвивка на тялото и крайниците. Липсват данни и изследвания за отровните жлези и отровата на сколопендрите, както и за ефекта от ухапвания на животните на сушата и във водата.

Откритието на странната сколопендра амфибия веднага намери място на страниците на сп. "National Geographic" и няколко английски вестника още през 2016 г. Научното описание на новия вид обаче е публикувано в българското научно списание "ZooKeys" и това е едно скромно признание за българската зоологическа наука.

По National Geographic

