

Двеста години еклогити и сто години еклогитова дискусия

Евгения Кожухарова

Геологически институт, БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 24, София 1113

Two hundred years eclogites and one hundred years of eclogite discussion

Evgenia Kozhoukharova

Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev str., bl. 24, 1113 Sofia, Bulgaria;

E-mail: ekozhoukharova@abv.bg

Abstract. The first significant publication on eclogites (Escola, 1921) marked the start of the longest-discussed problem in petrology – the genesis and the place of eclogite formation and eclogite facies on the Earth. The mineral paragenesis of garnet, omphacite, rutile with rare inclusion of microdiamond in garnet requires conditions of $T=800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $P=0\text{--}60\text{ kbar}$. According to the geothermal gradient and lithostatic pressure calculations, such conditions should exist at a depth of 60–250 km. The dominant nowadays “subduction-exhumation” hypothesis does not offer a satisfactory explanation of the idea of deep subcrustal crystallization and the actual finding of eclogites in the middle parts of the Earth’s crust among the amphibolites. Contradictions disappear if it is assumed that they are formed *in situ* in the geotribological zones of friction within the crust, where kinetic energy is generated, providing the necessary high temperature and pressure.

Keywords: eclogites, eclogite facies, geotribological zones, wave action.

Резюме. Първата значителна публикация за еклогитите (Ескола, 1921) поставя началото на най-дълго коментирания проблем в петрологията – генезиса и мястото на образуване на еклогитите и еклогитовия фациес. Минералната парагенеза от гранат, омфациит, рутил с рядко участие на микродиаманти, изисква условия $T=800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P=20\text{--}60\text{ kbar}$, каквито според изчисленията по геотермичния градиент и литостатичното налягане би трябвало да съществуват на дълбочина 60–250 km. Доминиращата днес „субдукционно-ексхумационна“ хипотеза не предлага удовлетворително решение за идеята за дълбочинна подкорова кристализация и реалното намиране на еклогитите в средните отдели на Земната кора сред амфиболити. Противоречията изчезват, ако се приеме, че те се образуват *in situ* в геотрибологични зони на триене в пределите на кората, където се генерира енергия, осигуряваща необходимите високи температура и налягане.

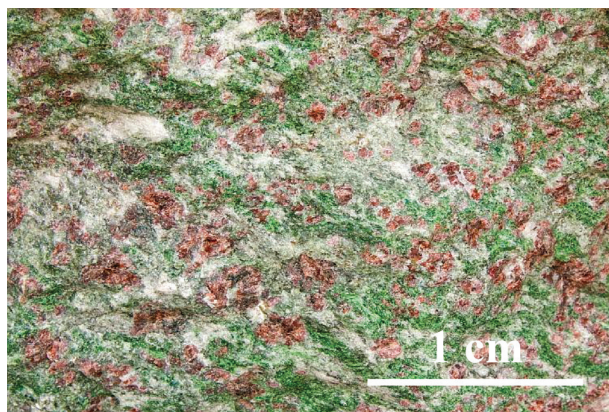
Ключови думи: еклогити, еклогитов фациес, геотрибологични зони, вълново въздействие.

Увод

През 1921 г. забележителният финландски петролог професор Пенти Елиас Ескола публикува статията “On the eclogites of Norway” (Eskola, 1921) и с това слага началото на един от най-оживено дискутираните проблеми в областта на метаморфната петрология, нестихващ и до днес – генезиса на еклогитите и мястото на еклогитовия фациес в земната кора. Това дава повод да се припомнят основните черти и противоречивите пунктове в проблема, които пречат той да намери удовлетворително решение.

Името еклогит, в смисъл „избран“, е дадено още през 1822 г. от абата-минералог Рене-Жюс

Хаюи (1743–1822), член на Френската академия на науките, който описва впечатленията си от тяхната красота и необикновен състав. Първи единични находки от Алпите обаче са съобщени четири десетилетия преди това от Хорас-Бенедикт де Сосюр (1740–1799). Двамата изследователи оставят ценни петрографски колекции, които се пазят и досега. Еклогитите наистина заслужават дълготрайното внимание на геолозите. Те са редки и живописни скали, съставени от яркочервени едри гранати, изумруденозелени омфациити, обхванати от снежнобели кварц-фелдшпатови нишки (фиг. 1). Необикновеното при тях, обаче, е асоциацията с по-нискостепенни метаморфни скали – най-често амфиболити



Фиг. 1. Еклогит

и по-рядко шисти и гнайси, което кара изследователите от XX век да ги смятат за образувани в по-дълбоки нива, при по-високи температури и налягане и извлечени оттам по тектонски път. Godar (2001), в един подробен исторически преглед върху изследванията на еклогитите, представя различните интерпретации за произхода им през последните двеста години, които се развиват успоредно с господстващата за своето време парадигма.

Еклогитовият проблем е важен и заслужава по-широко обсъждане, защото засяга не само петрографската характеристика на въпросните скали, но и термодинамичното състояние на Земната кора и влиянието на различни фактори върху него. Целта на статията е да обърне внимание на най-съществените противоречия в днешната хипотеза относно мястото на еклогитизацията и присъствието на еклогитите в метаморфните комплекси.

Генезис на еклогитите

Първите описания на еклогитите са върху основния им минерален състав от гранат и пироксен, последният наричан диалаг. Химичните анализи показват пълно сходство между еклогитите, габрата и базалтите. Прогрес в познанията за скалите внася използването на поляризационния микроскоп от средата на XIX век, благодарение на който се установяват характерните симплектитови структури на разпадане около пироксена и диафоритните келифитови обвивки, заместващи граната. Докато петрографските и минераложките изследвания напредват бързо, с появяването на многобройни публикации, произходът на еклогитите остава енигма. Първият дебатиран въпрос е: еклогитите метаморфни скали ли са или магмени, попаднали сред метаморфни. В спора взема участие и патриархът

на българската геоложка наука Ами Буе, поддържащо енергично метаморфния им произход, докато повечето от колегите му от немско-австрийската и френската петрографска школа ги приемат за магмени, а феноскандинавската – за метаморфни. Между „магматистите“ в началото е и самият Пенти Ескола, който, изучавайки еклогитите в Норвегия, решава, че те са кристализирали от „еклогитова магма при високо налягане“, а фолиацията отдава на „стрес по време на кристализацията“, но впоследствие коригира мнението си. Макар трудно и бавно, метаморфният произход на еклогитите се утвърждава сред изследователите, приемайки метаморфна трансформация на габрови и базалтови протолити, особено след като това бива доказано и експериментално (Green, Ringwood, 1972). Независимо от това, както отбелязва Godar (2001), някои автори и до днес вярват, че в мантията се образуват еклогити направо от магма.

Петрографските изследвания, отразени в стотици публикации и монографии, описват в подробности минералния и химичния състав на скалите, специфичното за тях посткристализационно разпадане на еклогитовата парагенеза и постепенното ѝ заместване от микросимплектити от диопсид, албит-олигоклаз и кварц, а в крайния етап – от амфибол и плагиоклаз. Следващият въпрос, върху който се съсредоточава мисленето, е: по каква причина минералният състав на габрата и еклогитите е толкова различен, след като скалите имат еднакъв химичен състав. Отбелязва се също, че минералите от еклогитовата парагенеза са с по-плътна структура. Отговорът е по-високото налягане. Австроунгарският петролог Фредерик Беке (Becke, 1903) заключава, че еклогитите са високобарични еквиваленти на габрото и това, според Godar (2001), е най-изобретателната идея в петрологията. От този момент нататък сред изследователите е поставен нов основен въпрос: къде съществуват условията за кристализация на еклогитовите минерали. Междувременно находките на еклогити в кристалинните терени стават все по-чести. Еклогитови късове са намерени и в кимберлитовите тръби, което навежда на мисълта, че това са фрагменти от мантията (Fermor, 1914). Предполага се също, че под кората съществува еклогитов слой (Goldschmidt, 1922; Escola, 1921, 1936; Holmes, 1926, Birch, 1952 и други автори), откъдето са изтръгнати еклогитови тела, попаднали по тектонски път в по-високите нива на кората.

Мястото на формиране на еклогитите е новият активно дебатиран въпрос: еклогити *in situ* vs. екзотични еклогити (Smith, 1988). На много места конкордантните взаимоотношения с вместващите скали показват ясни белези на образуване

на място сред пластове на по-нискобарични гнайси, обяснено с по-високата резистентност на еклогитите спрямо уязвимите на флуиди гнайси (Rubie, 1990 и други). Разбираемо е, че в тези случаи хипотезата за тектонското извличане от дълбочина е напълно неприложима. В геохимичните разработки се акцентира на химичната близост между еклогитите и океанските плочи и рифтовите магматити (Montigny, Allègre, 1974 и други). Еклогитовите въпроси се преплитат с въпроси от офиолитовите асоциации. Произходът на еклогитите се обсъжда много енергично от десетки изследователи в стотици статии. Появяват се класификации, които се опитват да поделят скалите по типове и местоположение. Изказват се различни мнения и противоречиви интерпретации, което кара Колман и сътрудниците му накратко да ги обобщят в „Еклогити и еклогити – различия и сходства“ (Coleman et al., 1965), с което обаче дискусиите не стихват.

Мнозина от съвременните изследователи продължават да вярват в подкоровия генезис на еклогитите под 60 km, а при наличие и на микродиаманти – до 150–250 km т. е. в мантийни дълбочини (Chopin, 2003; Pilchin, 2005; Mposkos, Kostopoulos, 2001; Dobrizhenitskaya, 2012 и др.) и съсредоточават вниманието си главно върху механизма на потъване и издигане на еклогитовия протолит. С развитието на плейт-тектониката широка популярност доби т. н. субдукционно-ексхумационна хипотеза, според която клинове от базична/ултрабазична океанска кора субдуцират под континенталната и на някаква дълбочина, достигнали необходимите високи температури и налягане, прекристализират в еклогити, тела от които по-късно чрез „ексхумация“ се озовават в по-горните нива на кората. На тази неясна представа се осланят мнозина петрографи, но дори и сред най-твърдите поддръжници отделни изследователи (Pilchin, 2005) отбелязват, че докато субдукцията е реален и доказан процес, то обратният път от тези предполагаеми дълбочини до високите нива на Земната кора е неубедителен и оспорван. Съвременните автори търсят по-приемливи версии за ексхумацията. Hacker & Gerya (2013) рисуват пет различни предполагаеми варианта на потъване на протолита по дълбочинна зона и връщането му като еклогитизиран оттам. Dilek & Yang (2018) виждат изход в изнасянето на еклогитови микродиамант-съдържащи ксенолити посредством топилки. Същевременно отбелязват, че еклогитови минерализации са установени в различни епохи и геоложки обстановки.

Теоретично е напълно приемливо да се предположи, че на някаква дълбочина в субдукционната зона, потъващата базична/ултрабазична

океанска кора търпи еклогитизация, а на други места, според специфичните условия, и стопяване. Но докато топилките проявяват съществуването си чрез субдукционния магматизъм, то предполагаемите еклогити остават дълбоко на мястото на образуването си. Хипотетичната вяра в ексхумацията не дава логичен отговор на най-главния въпрос: как, противно на всички физични закони, тежките еклогитови тела биха се издигнали и преминали през гнайсите на метаморфните комплекси до мястото, където ги намираме сега – средните нива на Земната кора, в зоната на амфиболитовия фацис точно сред самите амфиболити и то в конкордантни взаимоотношения с техните пластове.

Трябва да се отбележи обаче, че не всички метаморфисти следват безкритично въпросния хипотетичен модел „субдукция-ексхумация“. Desmond & Smulikowski (2007), в монографията „Metamorphic Rocks. A. Classification and Glossary of Terms“, създадена по препоръка на Субкомисията за класификация на метаморфните скали (SCMR) към Международния съюз на геоложките науки (IUGS), в която участват 22-ма изтъкнати петрографи-метаморфисти от различни страни, дават следното разяснение за високотермобаричния еклогитов фацис: „Откриването на коесит и микродиамант в скали от коров произход показва, че тези скали са били засегнати от налягане, еквивалентно на това, намиращо се в мантията. Това разширява обхвата на метаморфните условия, които са действали върху коровите скали“. Авторите не атакуват пряко хипотезата за подкоровия мантиен генезис на еклогитите, но достатъчно ясно допускат аналогични условия да са действали върху скалите от кората, без да посочват прекия източник на енергия.

Концепцията за метаморфните фациса

Проблемът за генезиса на еклогитите е пряко свързан с концепцията за метаморфните фациса – гениалното творение на Пенти Ескола, идеята за която се появява още в дисертационната му работа от 1915 г. и бива разработвана и усъвършенствана в продължение на 20 години (Eskola, 1920, 1939). Метаморфният фацис се утвърждава като фундаментална идея в петрологията, която по нов принцип систематизира метаморфните скали според техния минерален състав. Тя заменя схемата на Grubermann & Niggli (1924) за поделяне на метаморфните комплекси на епи-, мезо- и катазона, съобразно дълбочината. Кратката формулировка на концепцията е: скали с еднакъв химичен състав,

кристализирали при еднакви условия, имат еднакъв минерален състав. Използва се понятието индекс-минерали, въведено от Barrow (1893) за диагностициращите минерали за всеки фацис. Графичната схема, построена в координатната система температура vs. налягане, очертава полетата на отделните фациса според температурно-баричната устойчивост на съответните индекс-минерали, които са със сравнително ограничено поле на устойчивост.

Ескола отделя осем метаморфни фациса, които нарича по имената на базичните скали, с които той предимно работи: зеленошистен, епидот-амфиболитов, амфиболитов, пироксен-хорнфелзов, санидинов, гранулитов, глаукофанов (синьошистен) и еклогитов. Концепцията бързо придобива популярност и приложение сред петрографите, които виждат в нея един много по-точен метод за характеризиране и класифициране на метаморфните скали. Някои от изследователите прибавят и нови фациса, главно в нискотемпературната част, като пренит-пумпелиитовия и зоолитовия. Съществен принос към концепцията прави Miyashiro (1961), който въвежда в графичната схема нововариантната тройна точка на минералите кианит, андалузит и силиманит и спрямо тях отделя три барични серии: 1) нискобарична андалузит-силиманитова – тип Абакума; 2) среднобарична кианит-силиманитова – тип Баровиан, включваща в последователност фацисите: зеленошистен, епидот-амфиболитов, амфиболитов и гранулитов, и 3) високобарична – синьошистен и еклогитов фацис.

През 2007 г., в споменатата по-горе монография “Metamorphic Rocks. A. Classification and Glossary of Terms”, в раздел 2 са предложени следните 10 фациса (Smulikowski et al., 2007): 1) зоолитов; 2) субзеленошистен; 3) зеленошистен; 4) епидот-амфиболитов; 5) амфиболитов; 6) пироксен-хорнфелзов; 7) санидинов; 8) глаукофанов или синьошистен; 9) еклогитов; 10) гранулитов.

Тъй като отделянето на фацисите се извършва по избрани индекс-минерали, винаги има елемент на условност и повод за дискусии между петрографите за броя на фацисите, засягащ главно нискотемпературните и трансгресивните граници между тях.

Изработването на графичната схема на метаморфните фациса внася нов смисъл и предизвикателство към интерпретацията за мястото на отделните фациса в Земната кора. Схемата е построена в координатната система T vs. P и когато тези параметри се разглеждат само във физичното им значение, тя съответства на вложената в нея първоначална идея да представя

полетата на индекс-минералите и на минералните фациса в зависимост само от температурата, налягането и химичния състав. Когато обаче на параметрите T и P се придаде смисъл съответно на температурен градиент (T_{gr}) и литостатично налягане (confining pressure – P_c), те автоматично се обвързват с дълбочината и мястото на фацисите се определя спрямо тях на съответните нива в кората. Така еклогитовият фацис и мястото на зараждането на еклогитите по изчисленията чрез T_{gr} и P_c започва да се търси на дълбочина между 60 и 150–250 km. И тогава се появява „субдукционно-ексхумационната“ хипотеза като един опит да се намери обяснение за всички онези теоретично и логично неразрешими проблеми за механизма на странстващите надолу-нагоре протолити и еклогитови тела.

Като петролого-минераложки кристализационен процес еклогитизацията засяга не само базичните протолити, а всички скални разновидности. Върху базичен субстрат се развиват еклогити *sensu stricto*, върху серпентинитов – гранатови лерцолити, при метапелити – фенгитови и кианитови шисти и при карбонатни скали – калцифири, последните с характерен състав от високотермобарични минерали: гранати, пироксени, скаполити, шпинели, цоизит, доломит, флогопит и други. При това, самите еклогитизирани скали се явяват най-често като тънки ивици или прослойки с дебелина от порядъка на милиметри до сантиметри, конкордантни на вместващите ги метаморфити, което показва образуване на място и опровергава идеята за извличането им от дълбочина. В такъв случай единственият въпрос, който остава за разрешаване, е източникът на енергия, осигурил необходимите за еклогитовата кристализация високи температури и налягане.

Темата за пряката зависимост между условията на кристализация (T/P), химичен състав и минералната фаза – като структура, кристален хабитус и фазови преходи, е развивана дългогодишно в българската геоложка наука от Иван Костов. Изводите му са илюстрирани с различни примери, един от най-популярните сред които е трансформацията на кварца в многобройни модификации при изменение на условията на кристализация (Kostov, 1993).

Източник на енергия при еклогитизацията в светлината на геотрибологичната хипотеза

Утвърдена традиция в петрологията на метаморфизма е да се търси източникът на топлина и налягане в дълбоките нива на земната кора чрез

изчисленията по геотермичния градиент и литостатичното налягане. Еклогитизацията, като термодинамичен веществен процес, обаче, не се нуждае от дълбочина, а преди всичко от енергия, която да осигури достатъчно висока температура и налягане, необходими за кристализацията. В епохи на тектонско спокойствие земната кора е в състояние на относително термодинамично равновесие, характеризиращо се с хоризонтална изотропност и плавно повишаване на температурата и налягането в дълбочина, контролирано само от геотермичния градиент и литостатичното налягане. При прояви на сеизмотектонски и нагъвателни движения, обаче, се създават множество зони на срязване с междублоково и междуслойно триене, където се генерира огромно количество енергия. В пределите на фрикционните (геотрибологичните) зони и близкото пространство около тях възниква временна и локална НТР/УНТР термодинамична обстановка.

От многогодишната практика и по-късните научни изследвания и експерименти е известно, че феноменът триене в трите му модификации – плъзгане, търкаляне и удар създава голямо количество кинетична енергия, която рязко повишава температурата и налягането и преобразува веществото (Heinicke, 1984). В пространството на тектонската геотрибологична зона скалната материя последователно се деформира, дезинтегрира до молекулярно и атомно ниво и стопява. В кулминационния момент на достигнати пределно високи температура, налягане, енталпия и ентропия, геотрибологичната зона представлява локална, временно изолирана термодинамична система, подобна на автоклав. С приключване на тектонските движения и преустановяване на доставката на енергия, стопената или дезинтегрирана скална материя прекристализира в нова асоциация на високотермобарични минерали (Kozhoukharova, 2016). Процесите на посттектонската статична прекристализация са разглеждани широко в петрографската литература (Spry, 1969 и други), без това да се свързва с еклогитизацията.

Едновременно с това, триенето произвежда обемни механични, т.е. сеизмични вълни извън геотрибологичната зона, които на близки разстояния от нея въздействат върху минералите увеличавайки амплитудата на вибрация на частиците. При някои минерали, например антигорит, това причинява деформация на структурата, скъсване на кристалохимичните връзки в зоните на дилатация, ивичесто стопяване и еклогитова кристализация (Kozhoukharova, 2020).

Връзката между сеизмотектонската кинетична енергия и веществените преобразувания не е била обект на системни изследвания при геоло-

гическите науки, затова подобна непозната идея изглежда на пръв поглед екзотична и шокираща. Едно непредубедено разглеждане на проблема обаче, ще открие логичната връзка между сеизмотектонските събития, вълновите импулси, усложнени от интерференцията и мултиплицирани от stick-slip ефекта, тяхното ударно въздействие върху структурата на минералите, деформацията и дезинтеграцията, резултиращи в крайния етап в структурна трансформация на веществото и еклогитова прекристализация (Kozhoukharova, 2020). Деформационните и високо Т/Р веществените изменения, настъпили в обхвата на геотриболожката зона, означаваме като геотрибометаморфизъм (Kozhoukharova, 2011), специфичен вид, част от динамометаморфизма. Последният е по-широко понятие, включващо промените при всички нагъвателни и разривни тектонски процеси, също от плитките части на кората, включително и хидротермалната диафтореза.

Изолирани данни в литературата засягат косвено отделни страни на изложения проблем: въздействието на удара в дълбочина под фрикционния контакт (Heinicke, 1984), разпадането на минералните структури при сеизмични събития (Enomoto, 2005), експериментални изследвания на въздействието на микросеизмични вълни върху структурата на антигорита (Brantut et al., 2016) и други.

Феноменът триене – мощен генератор на енергия, е предмет на всестранно изучаване в трибологията, която систематизира познанията, формулира принципите и резултатите от неговото действие, като я превръща в теоретична база за много природни науки (Manolov et al., 2005). Геотрибологията, прилагайки принципите на трибологията, разглежда под нов ъгъл геоложките процеси и енергийната връзка между тях, което дава възможност да се осветят неясни и неизследвани страни и намерят нови решения на проблемите (Kozhoukharova, 2008).

Изводи

– Еклогитизацията *sensu lato* е процес на високотермобарична минерализация, който се налага върху скали с различен състав, от магматичен, метаморфен или седиментен произход;

– Еклогитизацията се развива в геотриболожки зони на триене, възникнали в пределите на земната кора при сеизмотектонски събития. Генерираната там кинетична енергия извършва последователно разрушителна и съзидателна работа и осигурява високите температура и налягане, необходими за еклогитовата кристализация;

- Извън фрикционното пространство на геотриболожките зони се разпространяват Р и S сеизмични вълни, предизвикани от триенето, които, в близост до зоните, оказват деформационно, дезинтеграционно и прекристализационно въздействие върху някои минерали със слаби кристалохимични връзки;
- Геотриболожките зони са временна и локална термодинамична система, която създава неравномерно анизотропно разпределение на температурата и налягането в кората в периоди на активна сеизмотектонска дейност;
- Еклогитизационни процеси, развити върху метаморфни скали, могат да се проявяват в различни епохи синхронно или по-късно от регионалния метаморфизъм, в пределите на кората или дълбоко под нея.
- Еклогитизацията в метаморфните комплекси на Родопския масив е протекла също в геотриболожки зони на триене в рамките на кората по време на сеизмотектонска активност. Геоложката обстановка в реално наблюдаваните разкрития показва, че еклогитите са образувани на място, като минерализации в тънки междуслонни и пукнатинни зони (Kozhoukharova, 2021). Предположенията за мантийни и субдукционни еклогитизирани протолити, „ексхумирани“ в погорните нива на кората са без основание;
- Графичната схема към концепцията за метаморфните фацеси, построена в координатната

система геотермичен градиент vs. литостатично налягане, е напълно приложима само в условия на тектонско спокойствие, когато липсват геотриболожки зони.

Историята на еклогитовия генезис е дълга научна незавършена сага, която илюстрира красноречиво трудните лъкатушни стъпки в прогреса на знанието. Еклогитизацията не е само петроложки въпрос, а широк интердисциплинарен геоложки проблем, който засяга състоянието и динамиката на Земната кора. Познанията, които ни дават отделните геоложки науки: геофизика, тектоника, геотрибология, петрология, минералогия, геохимия, допълнени с данни от физиката на твърдото тяло и неорганичната химия, разкриват обща картина, в която може да се проследи енергийната връзка между последователните геоложки събития и процеси в единен цикъл.

Метаморфният комплекс в Родопския масив предлага изключително инструктивни разкрития на еклогитизация върху серпентинити, амфиболити, слюдени шисти и калкошисти при сравнително добре изяснена обща геоложка обстановка. Изследванията по еклогитизацията, започнали у нас преди 40 години, се нуждаят от актуализиране и преосмисляне на интерпретацията им, което ще даде и нови насоки за решения на старите проблеми, свързани с генезиса и мястото на еклогитите в Земната кора.

Литература References

- Barrow, G. 1893. On an intrusion of muscovite-biotite gneiss in the S. E. Highlands of Scotland. – *Quarterly J. Geol. Soc. London*, 49, 330–356.
- Becke, F. 1903. Über Mineralabstand und Struktur der kristallinischen Schiefer. – *Akad. Wiss. Vienna Denkschr., Math. Natv. Kl.*, 75, 1–53.
- Birch, F. 1952. Elasticity and constitution of the Earth's interior. – *J. Geophys. Research*, 57, 227–286.
- Brantut, N., F. X. Passelegue, D. Deldicque, J.-N. Ranzand, A. Schubnel. 2016. Dynamic weakening and amorphization in serpentinite during laboratory earthquakes. – *Geology*, 44, 8, 607–610.
- Chopin, C. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the antle. – *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 212, 1–14.
- Coleman, R. G., D. E. Lee, L. B. Beatty, W. W. Brannock. 1965. Eclogites and eclogites: their difference and similarities. – *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76, 483–508.
- Desmond, J., W. Smulikowski. 2007. High P/T metamorphic rocks. – In: Fettes, D., J. Desmond (Eds). *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendation of the International Union of Geological Sciences (IUGS), Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks*. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 32–35.
- Dilek, Y., J. Yang. 2018. Ophiolites, diamond and ultrahigh-pressure minerals: New discoveries and concept on upper mantle petrogenesis. – *Lithosphere*, 10, 1, 3–13.
- Dobrizhenitskaya, L. 2012. Frontier of ultrahigh-pressure metamorphism. A review. – *Gondwana Research*, 21, 207–228.
- Enomoto, Y. 2005. Geotribology of Earthquakes. – *Japan. J. of Tribology*, 50, 5, 513–521.
- Eskola, P. 1920. The mineral facies of rocks. – *Nor. Geol. Tidsskr.*, 6, 143–194.
- Eskola, P. 1921. On the eclogites of Norway. – *Vidensk.-Selsk. Skr. I. Mat. Naturv. Kl.*, 8, 1–118.
- Eskola, P. 1936. Wie ist die Anordnung der äusseren Erdsphären nach der Dichte zustande gekommen? – *Geol. Rundschau*, 27, 61–72.
- Eskola, P. 1939. Die Metamorphen Gesteine. – In: Barth, T. F. W., C. W. Correns, P. Eskola (Eds). *Die Entstehung der Gesteine*. Berlin, Springer, 263–407.
- Fermor, L. L. 1914. The relationship of isostasy, earthquakes and vulcanicity to the Earth's infra-plutonic shell. – *Geological Magazine*, 6, 65–67.
- Godar, G. 2001. Eclogites and their geodynamic interpretation: a history. – *J. Geodynamics*, 32, 1–2, 165–203.
- Goldschmidt, V. M. 1922. Über die Massenverteilung im Erdinneren, verglichen mit der Structur gewissen Meteoriten. – *Die Naturwissenschaften*, 10, 42, 918–920.

- Green, D. H., A. E. Ringwood. 1972. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. – *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 31, 767–833.
- Grubermann, U., P. Niggli. 1924. *Die Gesteinesmetamorphose, vol. 1*. Berlin, Borntraeger, 539 p.
- Hacker, B. R., T. V. Gerya. 2013. Paradigms, new and old for ultrahigh pressure tectonism. – *Tectonophysics*, 603, 426–436.
- Heinicke, G. 1984. *Tribochemistry*. Berlin, Akademie Verlag, 495 p.
- Holmes, A. 1926. The structure of the continents. – *Nature*, 118, 586.
- Kostov, I. 1993. *Mineralogy*. Sofia, Tehnika, 734 p. (in Bulgarian).
- Kozhoukharova, E. 2008. Application of tribo-principles in geology. An example for tribochemical genesis of eclogites. – *Abstracts 6th International Conference on Tribology, Balkantrib '08*, Sozopol, Bulgaria, 82–83.
- Kozhoukharova, E. 2011. The tribometamorphism – a particular kind of geotribological processes in the Earth's crust. – *Proceedings of the Intern. Conference 7th Balkantrib '2011*, 3–5 October, 2011, Thessaloniki, Greece, 359–364.
- Kozhoukharova, E. 2016. Geotribology – a new view on the tectonometamorphism. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 77, 2–3, 49–58 (in Bulgarian with English abstract).
- Kozhoukharova, E. 2020. Impact of the body waves on the serpentine structure. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.* 81, 3, 81–83 (in Bulgarian with English abstract).
- Kozhoukharova, E. 2021. HTP mineralization on the metamorphic complexes in Rhodope Massif. – *Extended Abstracts of 9th Intern. Conf. Mineralogy and Museums*, 22–26 August, 2021 Sofia, Bulgaria, 69–70.
- Manolov, N., E. Assenova, M. Kandeveva. 2005. *Concept for the Development of the Tribology in Bulgaria*. Sofia, St. Ivan Rilski Publ. House, 180 p. (in Bulgarian).
- Miyashiro, A. 1961. Evolution of metamorphic belts. – *J. Petrology*, 2, 277–331.
- Montigny, R., C. J. Allègre. 1974. À la recherche des océans perdus: les éclogites de Vendée, témoins métamorphisés d'une ancienne croûte océanique. – *C. R. hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sci., sér. D (Paris)* 279, 543–545.
- Mposkos, E., D. Kostopoulos. 2001. Diamond, former coesite and supersilicic garnet in metasedimentary rocks from the Greek Rhodope: a new ultrahigh pressure metamorphic province established. – *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 192, 497–506.
- Pilchin, A. 2005. The role of serpentization in exhumation of high – to ultra-high pressure metamorphic rocks. – *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 237, 815–828.
- Rubie, D. C. 1990. Role of kinetics in the formation and preservation of eclogites. – In: Carswell, D. A. (Ed.), *Eclogite Facies Rocks*. Blackie, 111–140.
- Smith, D. C. (Ed.). 1988. *Eclogites and Eclogite-facies Rocks*. Developments in Petrology, 12, Amsterdam, Elsevier, 524 p.
- Smulikowski, W., J. Desmons, D. J. Fettes, B. Harte, F. P. Sassi, R. Schmid. 2007. Types, Grade and Facies of Metamorphism. – In: Fettes, D., J. Desmons (Eds). *Metamorphic Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendation of the International Union of Geological Sciences (IUGS), Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks*. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 16–23.
- Spry, A. 1969. *Metamorphic Textures*. Oxford, Pergamon Press, 350 p.

Постъпила на 24.04.2021 г., приета за печат на 26.10.2021 г.
Отговорен редактор Борис Вълчев