



## КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

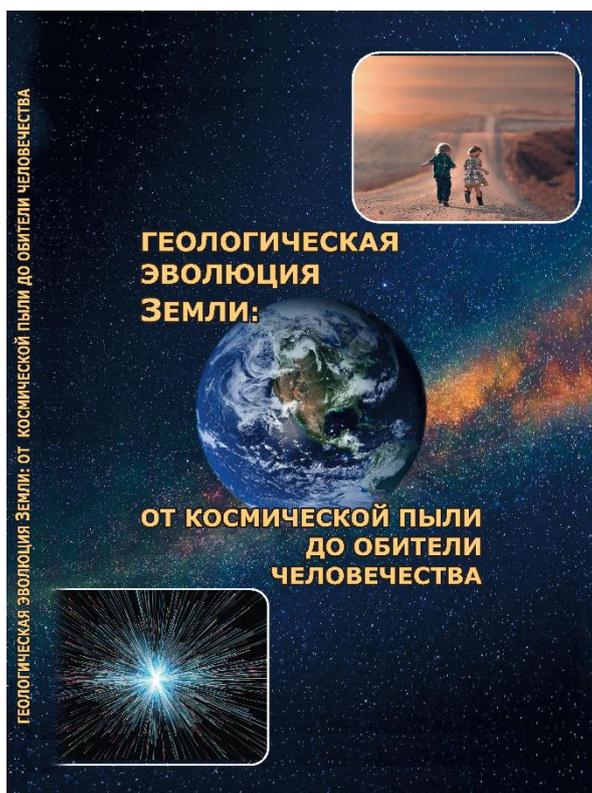
### Геологическая история Земли – от зарождения до наших дней

В октябре 2021 года вышла в свет монография М. И. Кузьмина, В. В. Ярмолюка, Д. П. Гладкочуба, Н. А. Горячева, А. П. Деревянко, А. Н. Диденко, Т. В. Донской, В. А. Кравчинского, А. Р. Оганова, С. А. Писаревского «Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обители человечества» под редакцией академика Российской академии наук М. И. Кузьмина и академика Российской академии наук В. В. Ярмолюка. В монографии рассмотрена геологическая история Земли от ее зарождения до настоящего времени.

## BRIEF INFORMATION ABOUT NEW PUBLICATIONS

### Geological history of the Earth – from its formation to the present day

In October 2021, a monograph “Geological evolution of the Earth: from space dust to the home of mankind” by M. I. Kuzmin, V. V. Yarmolyuk, D. P. Gladkochub, N. A. Goryachev, A. P. Derevyanko, A. N. Didenko, T. V. Donskoy, V. A. Kravchinsky, A. R. Oganov, S. A. Pisarevsky edited by the Academician of the Russian Academy of Sciences M. I. Kuzmin and the Academician of the Russian Academy of Sciences V. V. Yarmolyuk was published. The monograph discusses the geological history of the Earth from its formation to the present day.



В октябре 2021 года издательством «ГЕО» была выпущена монография М. И. Кузьмина, В. В. Ярмолюка, Д. П. Гладкочуба, Н. А. Горячева, А. П. Деревянко, А. Н. Диденко, Т. В. Донской, В. А. Кравчинского, А. Р. Оганова, С. А. Писаревского «Геологическая эволюция

Земли: от космической пыли до обители человечества»<sup>1</sup>. В представленном материале мы хотели бы кратко осветить основные проблемы, поднятые в монографии, в последовательности их рассмотрения.

<sup>1</sup> Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Гладкочуб Д. П., Горячев Н. А., Деревянко А. П., Диденко А. Н., Донская Т. В., Кравчинский В. А., Оганов А. Р., Писаревский С. А. Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обители человечества. Новосибирск: ГЕО, 2021. 325 с.



1. Планеты типа Земли не могли появиться в ранней Вселенной. Ведь после Большого взрыва, породившего Вселенную 13,8 млрд лет назад, последняя содержала только водород и гелий. В ядрах звезд эти два элемента участвовали в термоядерных реакциях, порождавших другие химические элементы. При взрыве сверхновых звезд новообразованные элементы рассеивались в межзвездном пространстве, постепенно обогащая его материалом, необходимым для появления планет, подобных Земле.

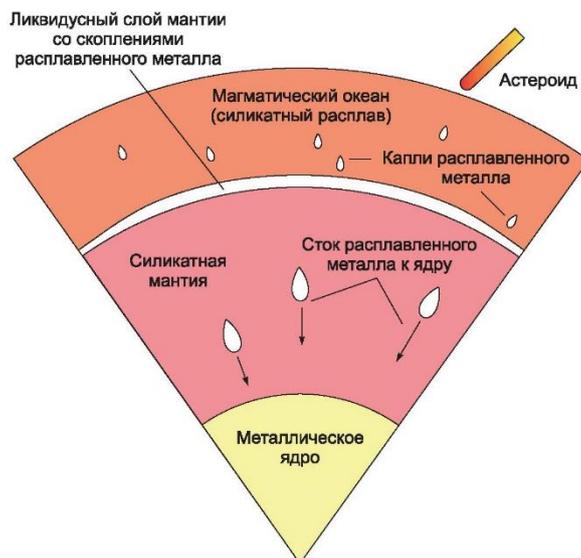
2. Солнечная система возникла спустя 9 млрд лет после зарождения Вселенной, когда в ней накопились в достаточном количестве различные химические элементы. Она образовалась в 27 тыс. световых лет от центра галактики Млечный Путь в зоне (между 23 и 30 тыс. световых лет), которая считается наиболее благоприятной для появления «жизни» на планетах звездной системы.

3. В начальный (или хаотичный) эон развития Солнечной системы на ее периферии, обогащенной водой и газами, сформировались крупные планеты Юпитер и Сатурн. Их

перемещение в пределах протопланетного облака способствовало перераспределению вещества и поступлению во внутренние участки системы «строительного» (метеориты) материала, послужившего основой для образования каменных планет – Меркурия, Венеры, Земли и Марса.

4. Хаотичный эон в истории Земли охватил интервал времени от 4,567–4,5 млрд лет назад. В это время в недрах планеты сформировались жидкое железо-никелевое ядро и мантия (рис. 1). В строении последней вследствие фазовых преобразований минералов обособились верхняя (до глубины 670 км) и нижняя (более глубокая) мантия.

5. Около 4,51 млрд лет назад произошло одно из важнейших событий в истории Земли – столкновение с планетоидом Тейя, которое привело к образованию Луны и изменило наклон земной орбиты. Ядра планет слились, а их каменные оболочки были частично рассеяны и послужили основой для образования Луны и каменных астероидов, которые на протяжении гадейского периода бомбардировали планеты земной группы.



**Рис. 1. Формирование мантии и ядра на фоне бомбардировок Протоземли астероидно-метеоритными телами**

Энергия соударения астероидов с Землей приводила к формированию больших магматических бассейнов глубиной до 400–700 км. Капли сидерофильных элементов образовывались при плавлении железокремнистого вещества астероидов (метеоритов) и погружались до дна магматического бассейна, где формировали скопления расплавленного металла, которые погружались через нижнюю мантию, наращивая ядро

**Fig. 1. Formation of mantle and core in the midst of Proto-Earth bombardment by asteroid-meteorite bodies**

The collision energy of asteroids and the Earth led to the formation of large magmatic basins up to 400–700 km deep. Drops of siderophilic elements were formed under the melting of iron-stone matter of asteroids (meteorites) and sank to the bottom of the magma basin, where they formed accumulations of molten metal. The latter sank through the lower mantle increasing the core



6. Геологическая история Земли началась с гадейского зона (4,5–4 млрд лет назад), в течение которого планета подвергалась постоянным метеоритным бомбардировкам. Они стимулировали крупнообъемные излияния ультраосновных – основных магм. Дифференциация этих магм вела к появлению кислых расплавов, от которых сохранились лишь цирконы возрастом 4,4–4 млрд лет. Первичная кора гадейского зона была практически полностью уничтожена непрерывавшимися метеоритными бомбардировками. Дошедшие до нас гадейские цирконы сохранились при рециклинге и полной переработке гадейской коры.

С прекращением бомбардировок закончился гадейский эон, и Земля вступила на путь внутренней самоорганизации, которая была связана с потерей тепла, ведущей к дифференциации ее недр.

7. Эпоха раннего – среднего архея (4–3,1 млрд лет назад) характеризовалась зарождением и образованием первой континентальной коры. Островной характер ее формирова-

ния определялся особенностями действовавшей в то время тектоники покрывки (или LID-тектоники). Верхнюю каменную оболочку Земли в это время определяла сплошная мощная кора основного состава, которая наращивалась в результате крупнообъемных излияний основных и ультраосновных расплавов. Основной перенос внутреннего тепла планеты осуществлялся посредством механизма мантийных переворотов, предполагающих апвеллинг перегретых нижнемантийных масс и их перемешивание с остывающей верхней мантией (рис. 2). Располагавшиеся над зонами апвеллинга участки поверхности выделялись наиболее активными вулканическими излияниями и особо мощной корой. Низы такой коры подвергались плавлению под влиянием глубинного тепла, порождая расплавы, которые при дифференциации производили породы тоналит-трондьемит-гранодиоритовой серии, участвовавшие в образовании первой сохранившейся континентальной коры.

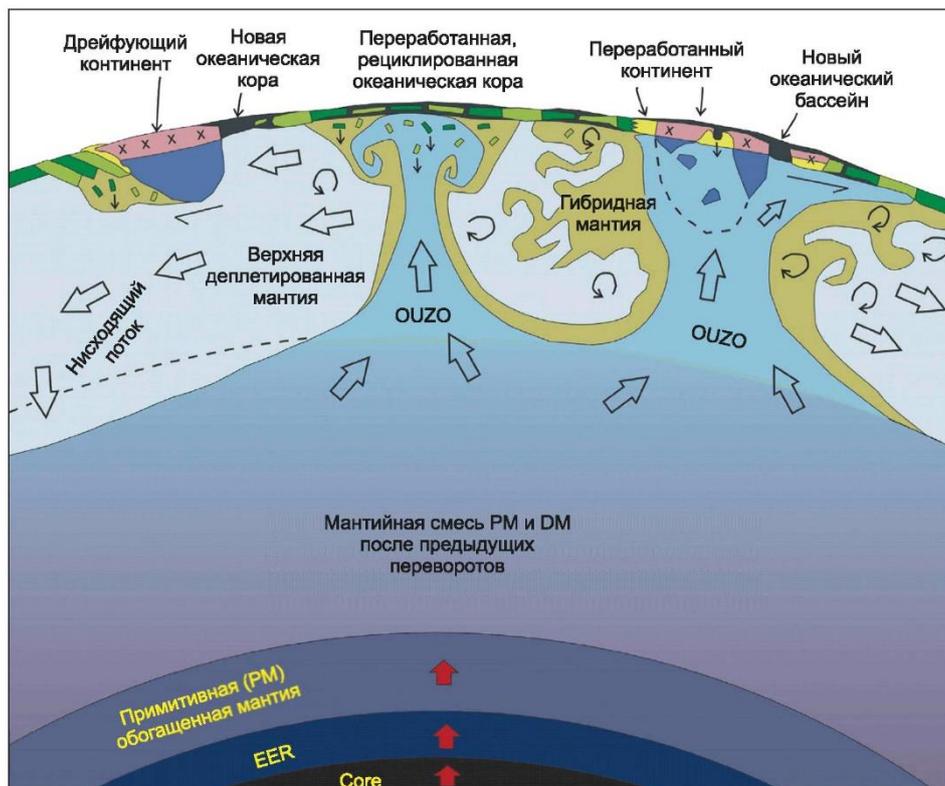


Рис. 2. Модель мантийной динамики в раннем архее (по Bédard, 2018)<sup>2</sup>  
Fig. 2. Model of mantle dynamics in the early Archean (according to Bédard, 2018)<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Bédard J. H. Stagnant lids and mantle overturns: implications for Archean tectonics, magma-genesis, crustal growth, mantle evolution, and the start of plate tectonics // Geoscience Frontiers. 2018. Vol. 9. Iss. 1. P. 19–49. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.01.005>.

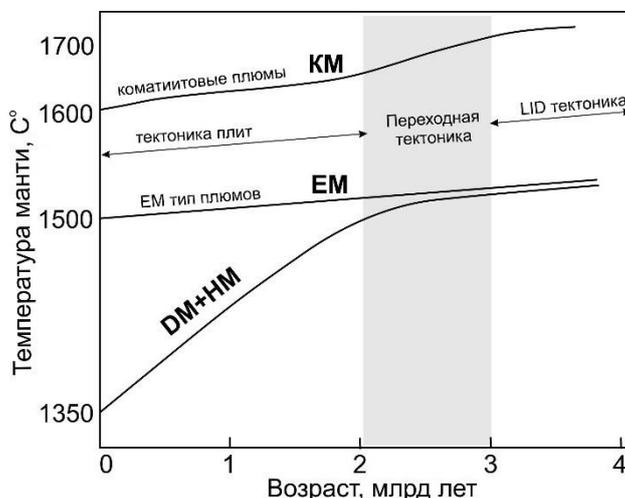


Охлаждение Земли привело к тому, что примерно 3,45 млрд лет назад стало формироваться твердое внутреннее ядро Земли, образующееся при охлаждении жидкого ядра. С этого времени у нашей планеты появилось магнитное поле, защищающее ее поверхность от ионизирующего излучения Солнца. В этот период появились и первые месторождения, в основном месторождения железистых кварцитов, которые формировались в архейских океанах. Позднее стали формироваться первые колчедано-барит-полиметаллические, золоторудные и молибден-порфиновые месторождения.

8. Интервал геологической истории между 3,1 и 2 млрд лет назад выделяется как переходный период в истории Земли. С ним связаны изменения целого ряда важнейших характеристик состояния нашей планеты. В этот период начала действовать тектоника малых плит, в результате которой острова первичной континентальной коры стали сбиваться в первые кратоны, а затем и в суперкратоны. Действие субдукционных процессов привело к тому, что в середине переходного периода (2,7–2,5 млрд лет назад) резко усилились про-

цессы корообразования и в это время сформировалось до 27 % объема современной континентальной коры. Эти процессы сопровождались деплетированием верхней мантии и ее охлаждением (рис. 3), что привело к образованию астеносферы, а также к обогащению коры литофильными элементами. В это время резко расширился спектр составов магматических пород. С этого момента в геологических процессах стали формироваться магматические породы известково-щелочной и щелочной серий, изменились условия их распространения – появились вулканические (магматические) пояса и цепи. Субдуцированные слэбы погружались вниз к основанию нижней мантии, охлаждая ее. Между 2,7–2 млрд лет назад слой D" на границе «ядро – мантия» стал достаточно мощным, чтобы влиять на геодинамические процессы.

Вторая половина переходного периода (2,5–2,1 млрд лет назад) охарактеризовалась резким ослаблением геологических процессов, в это время прекратилось межплитное взаимодействие. В обрамлении ранее образованных кратонов и суперкратонов возникли обширные пассивные окраины.



**Рис. 3. Изменения температуры мантии, рассчитанные по составам основных петрогенных компонентов океанических базальтов (по Condie et al., 2016)<sup>3</sup>**

Мантейные источники: KM – коматиитовый; EM – обогащенный; DM – истощенный; HM – гидратированный.

В конце архея отмечается расхождение температур (термодивергенция)

**Fig. 3. Changes in mantle temperature calculated by the compositions of the main petrogenic components of oceanic basalts (according to Condie et al., 2016)<sup>3</sup>**

Mantle sources: KM – komatiite; EM – enriched; DM – depleted; HM – hydrated.

The end of the Archean is characterized by a temperature divergence (thermal divergence)

<sup>3</sup>Condie K. C., Aster R. C., van Hunen J. A great thermal divergence in the mantle beginning 2.5 Ga: geochemical constraints from greenstone basalts and komatiites // Geoscience Frontiers. 2016. Vol. 7. Iss. 4. P. 543–553. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.01.006>.



Изменения режимов тектонических процессов в переходном периоде сопровождались также изменениями в верхних оболочках Земли – в атмосфере и гидросфере. К середине переходного периода относится так называемая великая кислородная революция – в атмосфере Земли впервые появился свободный кислород. Этому способствовали разные факторы, прежде всего широкое развитие цианобактерий и активно действовавшие процессы фотолитиза. Очищение атмосферы от парниковых газов (в первую очередь от метана) привело к сильному охлаждению поверхности Земли, вследствие которого планета была вовлечена в глобальное Гуронское оледенение.

Смены механизмов взаимодействия земных оболочек сопровождались согласованными изменениями в характере металлогенической продуктивности геологических процессов. В это время сформировались месторождения преимущественно сидерофильных элементов – меди, никеля, хрома, ванадия, кобальта, молибдена, а также благородных металлов, в том числе такие гиганты, как Витватерсранд и Бушвелд.

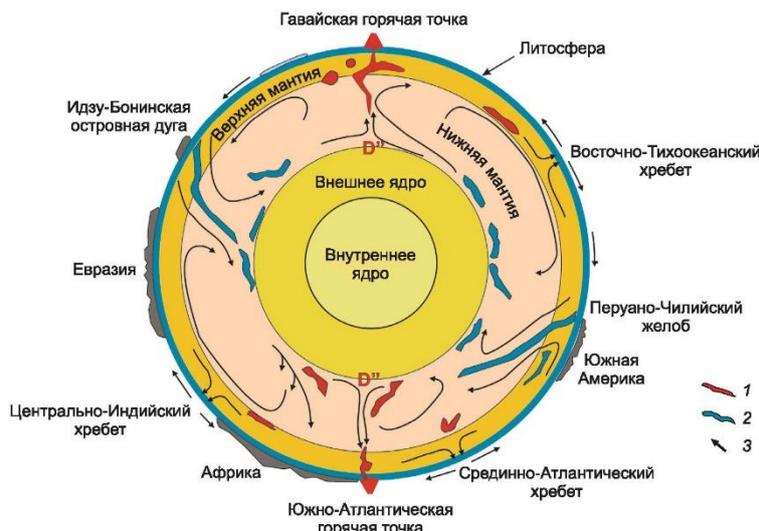
9. Развитие Земли в поздний период ее геологической истории (< 2 млрд лет) контролировалось процессами глобальной тектоники, включавшей тектонику литосферных плит и тектонику мантийных плюмов. Большие литосферные перемещения сопровождались процессами спрединга и субдукции. Благодаря им блоки континентальной коры стали сбиваться в более крупные агломерации, что привело в начале позднего периода к образованию первого суперконтинента Нуна (Колумбия).

Рост континентальной коры происходил за счет аккрецированного материала в зонах столкновения литосферных плит. При субдукции океанические плиты (слэбы) погружались в мантию в силу пониженной плавучести. Они опускались до границы нижней и верхней мантии и в зависимости от угла наклона либо проникали сквозь эту границу, опускаясь в нижнюю мантию, либо изгибались и следовали вдоль нее, образуя так называемые стагнированные слэбы. Их судьба также завершалась погружением в нижнюю мантию после того,

как они достигали критической массы. В нижней мантии слэбы складировались на границе ядра и мантии, наращивая собой слой D". Последний, в свою очередь, служил источником мантийных плюмов, которые поднимались в верхнюю мантию и к основанию литосферы, где не только подпитывали тепловую конвекцию в астеносфере, но и поставляли мантийное вещество на поверхность Земли.

В пределах Земли зоны нисходящих и восходящих мантийных потоков пространственно разнесены и образуют, соответственно, нисходящие и восходящие ветви общемантийной циркуляции, определяющей основные механизмы теплообмена в пределах нашей планеты (рис. 4). Зоны нисходящих потоков – это конвергентные границы на краях Тихого океана и вдоль Альпийско-Гималайского пояса. Зоны восходящих потоков соотносятся с двумя крупнейшими низкоскоростными мантийными аномалиями: Тихоокеанской, расположенной под южной частью Тихого океана, и Африканской, выделяемой в нижней мантии под Африканской литосферной плитой.

Наличие таких двух центров разнонаправленных движений литосферных и мантийных масс стало причиной того, что перемещение континентов периодически завершалось их объединением в суперконтиненты в той или иной части поверхности Земли. Как правило, эти суперконтиненты появлялись над одним из суперплюмов или вблизи него. Перегрев мантии под такой плотной крышей вызывал мантийный апвеллинг и раскол суперконтинентов, фрагменты которых разбегались в разные стороны и снова сталкивались в другой части поверхности Земли, образуя новые группировки. При этом распад одного суперконтинента обычно растягивался во времени и завершался на фоне роста другого. Подобная череда суперконтинентальных циклов стала характерной чертой позднего этапа земной истории. В частности, в настоящее время, по мнению ряда исследователей, происходит формирование очередного суперконтинента Амазия, который должен объединить Африкано-Евразийскую группировку континентов с континентами Северной и Южной Америки и Австралии.



**Рис. 4. Разрез Земли с основными элементами тектоники литосферных плит и гипотетическими линиями конвективных мантийных течений**

1 – относительно разогретые участки мантии с положительной плавучестью; 2 – относительно холодные участки мантии с отрицательной плавучестью; 3 – направление конвективных потоков (при создании использованы данные электронного ресурса Files.ethz.ch<sup>4</sup>)

**Fig. 4. Section of the Earth with the main elements of lithospheric plate tectonics and hypothetical lines of convective mantle currents**

1 – relatively heated areas of mantle with positive buoyancy; 2 – relatively cold areas of mantle with negative buoyancy; 3 – direction of convective flows (designed based on the data of the electronic resource Files.ethz.ch<sup>4</sup>)

Поздний период геологической истории Земли отличается наиболее высокой металлогенической продуктивностью. На активных границах литосферных плит (на континентальных окраинах и в островных дугах, зонах коллизии и на трансформных границах литосферных плит), которые выделяются разнообразным магматизмом, формировались и весьма разнообразные месторождения: вулканические сульфидные месторождения (месторождения типа VHMS (англ.: volcanic-hosted massive sulfide)), медно-молибденовые порфиоровые, месторождения золота (орогенные, карлин), золото-серебряные и серебряные эпитермальные, олово-вольфрам-литиевые месторождения и пр. Последовательность их образования отвечала смене типов оруденения от океанических колчеданных и вулканогенных колчеданных месторождений в ассоциации с медно-молибден-порфиоровыми и эпитермальными к метаморфогенно-плутоногенным, собственно орогенным, золотым и олово-редкометалльным. Источники рудного вещества в этот период стали суще-

ственно разнообразнее. Они включали не только деплетированную и субдукционно переработанную мантию, но и чрезвычайно разнообразную по составу континентальную кору. Этим объясняется исключительно широкий спектр рудных месторождений, различающихся как по составу рудного вещества, так и по условиям их формирования.

Месторождения внутренних участков литосферных плит в поздний период геологической истории характеризовались своей металлогенией, которой отвечали крупные стратиформные полиметаллические месторождения (типа SEDEX (англ.: sedimentary exhalative), MVT (англ.: Mississippi Valley-type)) и магматические рифтогенные медно-никелевые месторождения. Во внутриплитных условиях формировались, кроме того, многие месторождения редких металлов и месторождения железоксидных медно-золотых руд (месторождения типа IOCG (англ.: iron oxide-copper-gold)), а также железомарганцевые конкреции океанического дна и осадочные месторождения меди и урана.

<sup>4</sup> Introduction to tectonics // Files.ethz.ch. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.files.ethz.ch/structuralgeology/JPB/files/English/1Introctecto.pdf> (12.11.2021).



10. Уникальность нашей планеты связана с наличием у нее биосферы, являющейся одной из внешних оболочек планеты и сыгравшей важную роль в ее геологическом развитии. Первые микробные сообщества на Земле появились около 4 млрд лет назад. Вначале они имели ограниченное распространение. К концу архея в этих сообществах появились ацидобактерии, которые продуцировали кислород и сыграли решающую роль в изменении кислотно-основной обстановки на планете. С появлением кислорода Земля лишилась своего метанового «покрывала» и была ввергнута в период глобального Гуронского оледенения (2,4–2,2 млрд лет назад). Кислородная революция имела еще одно важное геологическое последствие – изменились условия минералообразования на Земле. Считается, что без нее было бы невозможно образование не менее двух третей известных видов минералов.

После Гуронского оледенения биологический мир обогатился эукариотами, но затем на протяжении около 1,5 млрд лет разнообразие органического мира менялось незначительно. Около 740 млн лет назад наша планета была ввергнута в жесточайшее оледенение более чем на 150 млн лет. Жизнь в это время сохранилась лишь в отдельных оазисах около выходов глубинного тепла, но после окончания оледенения она быстро распространилась по всей Земле. Экологические ниши были захвачены новыми популяциями организмов, среди которых важную роль стали играть многоклеточные. Наибольшее разнообразие органический мир получил в кембрии, когда заложились тренды в развитии основных групп живых организмов. С этого времени эволюция жизни пошла более быстрыми темпами. На нее влияли меняющиеся условия, к которым организмам приходилось активно приспосабливаться.

Важную роль в эволюционных скачках биосферы сыграли геологические катастрофы, которые вызывали радикальные изменения во внешних оболочках Земли (уничтожение озонового слоя, кислотные дожди, «ядерные» зимы, закисление вод океанов и т. д.), связанные с вулканизмом крупных изверженных провинций или астероидными ударами. В органи-

ческом мире эти катастрофы вели к глобальным вымираниям, которые завершались исчезновением больших групп организмов. Восстановление органического мира после таких катастроф растягивалось на десятки миллионов лет и сопровождалось сменой лидирующих групп организмов и появлением их представителей, более приспособленных к меняющимся условиям. После позднемеловой катастрофы исчезли динозавры, их место заняли млекопитающие, эволюция которых привела к появлению приматов и их венца – человека.

Особо следует сказать о человеке и его роли в земной истории. Как действующее лицо этой истории человек появился по геологическим меркам совсем недавно. Родиной рода *Ното* была Африка, откуда около 2 млн лет назад он распространился на территории Европы и Азии, освоив различные экологические ниши, что привело к его усилившемуся внутривидовому разнообразию. Человек современного типа сформировался около 30–40 тыс. лет назад. Человеческое общество быстро прогрессировало и к настоящему времени превратилось в реальную геологическую силу, воздействующую на природную среду и климат, а также на процессы, протекающие в земной коре.

Появление цивилизации негативно отразилось на состоянии окружающего мира. Создание определенных типов промышленности (горнодобывающей, химической, металлургической и т. д.) оказало катастрофическое воздействие на среду обитания. Человечество стало геологически активной средой (ноосферой, согласно В. И. Вернадскому), поэтому очень важно, чтобы оно как разумное составляющее геологической истории Земли взяло на себя миссию по сохранению всего живого на нашей планете.

В монографии авторы подняли вопросы геологического развития Земли и показали, что в настоящее время геологическая эволюция нашей планеты сделала все возможное, чтобы человечество могло решать вопросы естественного комфортного существования всего органического мира Земли. Книга, несомненно, будет интересна широкому кругу читателей и в первую очередь вузовским преподавателям, которые знакомят студентов с



проблемами современного естествознания и геологических наук, и, разумеется, самим студентам геологических специальностей, которым основные положения монографии и современный альтернативный взгляд на исто-

рию развития нашей планеты позволит существенно расширить кругозор и углубить понимание геологических процессов в их глобальной совокупности.

*Материал подготовили  
М. И. Кузьмин, В. В. Ярмолюк*