

А

**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА**

Основан в январе 1960	Периодичность 12 раз в год	Том 56, № 7	Июль 2015
--------------------------	-------------------------------	-------------	--------------

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

- Глуховский М.З., Кузьмин М.И.** Внеземные факторы и их роль в тектонической эволюции Земли в раннем докембрии 1225
- Добрецов Н.Л., Туркина О.М.** Раннедокембрийская история Земли: роль плейт- и плюм-тектоники и космического фактора 1250
- Емельянов Е.М.** Донные осадки и придонные течения в Юго-Западной Атлантике 1275

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

- Шацкий В.С., Скузоватов С.Ю., Рагозин А.Л., Соболев Н.В.** Подвижность элементов в зоне континентальной субдукции (*на примере метаморфического комплекса сверхвысоких давлений Кокчетавского массива*) 1298
- Леснов Ф.П., Хлестов В.В., Гальверсен В.Г., Сергеев С.А.** Полигенное формирование офиолитовых мафит-ультрамафитовых комплексов: изотопно-геохронологические и геохимические свидетельства по цирконам из пород Березовского массива (*о. Сахалин*) 1322

ГЕОХИМИЯ НЕФТИ И ГАЗА

- Савельев В.В., Камьянов В.Ф., Головкин А.К.** Реликты биолипидов в керогене кембрийского горючего сланца Сибирской платформы 1347

ГЕОФИЗИКА

- Бобров П.П., Миронов В.Л., Репин А.В.** Спектры диэлектрической проницаемости нефтеводонасыщенных песчано-глинистых пород различного минералогического состава и релаксационные свойства воды в этих породах 1359
- Кочкин Б.Т., Петров В.А.** Долгосрочный прогноз сейсмической опасности в связи с проблемой изоляции радиоактивных отходов 1369
- Плоткин В.В., Губин Д.И.** Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально-слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании 1381
- Сибирияков Б.П., Сибирияков Е.Б.** Области локального понижения давлений как вероятные аккумуляторы флюидов в геологических структурах 1391

SIBERIAN BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
SCIENTIFIC JOURNAL
GEOLOGIYA I GEOFIZIKA

Founded in January 1960	Monthly	Vol. 56, № 7	July 2015
----------------------------	---------	--------------	--------------

CONTENTS

TECTONICS AND GEODYNAMICS

- Glukhovskii M.Z. and Kuz'min M.I.** Extraterrestrial factors and their role in the Earth's tectonic evolution in the Early Precambrian 1225
- Dobretsov N.L. and Turkina O.M.** Early Precambrian Earth history: plate and plume tectonics and extraterrestrial controls..... 1250
- Emelyanov E.M.** Bottom sediments and near-bottom currents in the Southwestern Atlantic..... 1275

PETROLOGY, GEOCHEMISTRY, AND MINERALOGY

- Shatsky V.S., Skuzovatov S.Yu., Ragozin A.L., and Sobolev N.V.** Mobility of elements in continental subduction zone: evidence from the UHP metamorphic complex of the Kokchetav massif..... 1298
- Lesnov F.P., Khlestov V.V., Gal'versen V.G., and Sergeev S.A.** Polygenesis of mafic-ultramafic complexes: isotope-geochronological and geochemical evidence from zircons of the Berezovka massif rocks (*Sakhalin Island*)..... 1322

OIL AND GAS GEOCHEMISTRY

- Savel'ev V.V., Kam'yanov V.F., and Golovko A.K.** Relics of biolipids in kerogen of Cambrian Siberian Platform oil shale 1347

GEOPHYSICS

- Bobrov P.P., Mironov V.L., and Repin A.V.** Dielectric-permittivity spectra of oil-water-saturated sand-clayey rocks of different mineralogical compositions and relaxation properties of water in these rocks..... 1359
- Kochkin B.T. and Petrov V.A.** Longterm prediction for seismic hazard for radioactive waste disposal..... 1369
- Plotkin V.V. and Gubin D.I.** Accounting for near-surface inhomogeneities over a horizontally layered section in magnetotelluric sounding 1381
- Sibiryakov B.P. and Sibiryakov E.B.** Local pressure lows as possible sinks of fluids in geologic structures..... 1391

SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
NOVOSIBIRSK

© Сибирское отделение РАН, 2015
© ИГМ СО РАН, 2015
© ИНГГ СО РАН, 2015

ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 523.681-424:523.81-468:521.14/7:551.24

**ВНЕЗЕМНЫЕ ФАКТОРЫ И ИХ РОЛЬ В ТЕКТЕНИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ
В РАННЕМ ДОКЕМБРИИ**

М.З. Глуховский, М.И. Кузьмин*

Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

** Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

Рассматривается фундаментальная проблема влияния внеземных факторов на процессы геолого-тектонической эволюции Земли. Внеземные факторы были определяющими в процессах зарождения Земли, образования первой гаденской континентальной коры и начала архейской эры. Существенное влияние их продолжалось и позднее. Даже в фанерозое внеземные факторы могли оказывать существенное влияние на окружающую среду. Процессы образования сиалических ядер протоконтинентальной коры (4.4—3.9 млрд лет) с зеленокаменными областями первой генерации (3.8—3.2 млрд лет) и мировой системы гранит-зеленокаменных поясов (3.1—2.7 млрд лет) осуществлялись в ротационно-плюмовом режиме, главным образом в субэкваториальном «горячем поясе» Земли. Формирование этих глобальных структур Земли происходило во многом под влиянием астероидных ударов, вызывающих импакт-триггерное зарождение мантийных плюмов.

Большие перемены в последующей геологической истории Земли начались в период 2.7—2.0 млрд лет, которые завершились в 2.0 млрд лет назад переходом Луны на орбиту, близкую к современной (50 ± 3 радиуса Земли), сопровождающимся резким замедлением скорости осевого вращения Земли, окончательным формированием переходного между ядром и мантией слоя D" и началом современного стиля тектоники плит, сопровождающейся тектоникой плюмов.

Ранняя Земля, лунно-земные связи, импактные события, тектоническая эволюция.

**EXTRATERRESTRIAL FACTORS AND THEIR ROLE IN THE EARTH'S TECTONIC EVOLUTION
IN THE EARLY PRECAMBRIAN**

M.Z. Glukhovskii and M.I. Kuz'min

The paper is focused on the fundamental problem of influence of extraterrestrial factors on the Earth's geologic and tectonic evolution. Extraterrestrial factors played a decisive role in the Earth's genesis, the formation of the first Hadean continental crust, and the beginning of the Archean era. Their significant influence persisted in the later epochs: Even in the Phanerozoic, extraterrestrial factors might have had a considerable influence on the environment. The sialic cores of protocontinental crust (4.4–3.9 Ga) with first-generation greenstone zones (3.8–3.2 Ga) and the global system of granite–greenstone belts (3.1–2.7 Ga) formed in the rotation–plume regime, mainly in the subequatorial hot belt. The formation of these global structures was, to a large extent, influenced by asteroid impacts, which caused the impact-triggered genesis of mantle plumes.

Dramatic changes in the subsequent geologic history began at 2.7–2.0 Ga; at 2.0 Ga they terminated with the Moon's transition to an orbit similar to the present-day one (50 ± 3 Earth's radii), accompanied by the abrupt slowdown of the Earth's axial rotation, the termination of formation of the layer D", and the start of recent plate tectonics, which is accompanied by the plume tectonics.

Early Earth, lunar-terrestrial interaction, impact events, tectonic evolution

ВВЕДЕНИЕ

Внеземные факторы включают энергию лунных приливов и масштабные импактные события, которые были доминирующими на ранней стадии развития планеты, когда об ее поверхность могло ударяться до 900 и более астероидов [Марков, Федоровский, 1986; Хаин, Короновский, 2007]. Внеземные

факторы имели различное значение на разных этапах развития нашей планеты. Они являлись определяющими в ранние этапы образования Земли, формирования земного ядра [Allegre et al., 2008], а также рождения нашего спутника — Луны. Этот период в истории Земли получил название Хаотичный эон [Goldblatt et al., 2010]. В следующий Гаденский эон (4.5—4.0 млрд лет) появилась первая континентальная кора, которая была полностью переработана, сохранился от этой коры лишь единственный минерал — циркон [Nebel et al., 2014b]. Именно в это время определяющую роль в создании и начальной эволюции Земли имели бомбардировки планеты метеоритами и астероидами. В Хаотичный эон произошло формирование ядра и образование Луны, в Гаденский эон (4.5—4.0 млрд лет) бомбардировки способствовали образованию первой континентальной коры, а также крупных бассейнов на Луне.

Некоторые авторы считают, что это были два этапа одного события, связанные с выбросом из метеоритно-астероидного пояса большого количества метеоритов, так как его орбита пересеклась с орбитой крупной планеты [Bottke et al., 2012].

После Гаденского эона формирование континентальной коры продолжилась. Ее фрагменты сохранились до настоящего времени. Масштабные астероидные удары, выделенные как Поздняя Тяжелая Бомбардировка (ПТБ), были первопричиной формирования крупных сиалических ядер (нуклеаров) в эоархее и палеоархее (3.9—3.2 млрд лет) [Глуховский и др., 1994], с которыми связано образование серых гнейсов, сложенных трондьемит-гранодиорит-гранитной ассоциацией пород (ТГТ), представленных практически на кратонах всех континентов [Хаин, 2003]. Следующая мезеоархейская стадия (3.1—2.5 млрд лет) характеризуется образованием эсиалических гранит-зеленокаменных поясов и роев мафических даек. Наконец, палеопроторозойский (2.6—1.7 млрд лет) термотектогенез был во многом обязан ротационному влиянию на ряд тектонических процессов, связанных с резким изменением лунно-земной дистанции.

Внеземные факторы оказывали «более значительное воздействие на геодинамические процессы на Земле, чем это представлялось ранее» [Хаин, Короновский, 2007, с. 224]. Эти воздействия на нашу планету были особенно эффективными на ранних этапах эволюции Земли, когда температура мантии была значительно выше по сравнению с современной [Kogena, 2008], а Луна вращалась на орбите, близкой Земле [Binder, 1982; Жарков, 1983, 2000; Хейзен, 2015], вместе с которой она подвергалась массивным ударам метеоритов, астероидов и комет [Bottke et al., 2012]. Роль внеземных факторов в эволюции Земли рассматривалась во многих работах [Condie, 1981; Морозов, 2007; Грачев, 2005; Хаин, Короновский, 2007; Богатилов и др., 2010; Wood, Holliday, 2010; Wood, 2011; Bottke et al., 2012; и др.]. Важной проблемой для понятия эволюции Земли является причинно-следственная связь между внеземными факторами и изменением стиля тектонических движений во времени. Несомненно, это является важнейшей фундаментальной проблемой наук о Земле.

Действительно, в гаденское и архейское время от 4.5 до 3.4, возможно до 2.7 млрд лет, тектонические движения определялись тектоникой покрывки (Lid Tectonics) или тектоникой мантийного переворота [Griffin et al., 2014]. Этот тип тектоники Земли детально рассматривается в работах [Stern, 2008; Debaille et al., 2013; Nebel et al., 2014a,b; Griffin et al., 2014; и др.]. В этот период спокойная, стагнирующая кора ограничивала общемантийную конвекцию. Астероидные бомбардировки разрушали покрывку, что определяет появление на поверхности больших объемов коматитит-базальтовых расплавов. В период 3.2—2.7—2.0 млрд лет на Земле господствовала тектоника малых плит [Хаин, 2003], а с 2.0 млрд лет по настоящее время на Земле — тектоника плит вместе с тектоникой плюмов. В настоящей статье мы остановимся главным образом на внеземных факторах, их роли в становлении и эволюции ранней Земли. Нам представляется, что самостоятельно эта проблема ранее всесторонне не рассматривалась.

ВНЕЗЕМНЫЕ ФАКТОРЫ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ГЛУБИННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

Астероидные, метеоритные бомбардировки в ранней истории Земли. При высокой скорости осевого вращения Земли угол наклона оси к плоскости эклиптики был значительно круче, чем сегодня (23°). Этим объясняют «широтный эффект» падения астероидов в «горячую» зону экватора, так как пояс астероидов находится в той же плоскости эклиптики, что и Земля [Баренбаум, 2002]. Возможные доказательства существования первого, докембрийского суперконтинента, расположенного на экваторе рассмотрим ниже.

К сожалению, «геологических следов» метеоритных бомбардировок на Земле в интервале 4.6 до 4.0 млрд лет не сохранилось. Свидетельство о них можно найти только благодаря геохимическим данным о составе силикатных пород Луны, мантийных ксенолитов из кимберлитовых трубок или ксенолитов из кайнозойских щелочных базальтов, а также по анализу содержаний изотопов и редких элементов в гаденских цирконах по сравнению с хондритовыми метеоритами.

Рассмотрим ниже, какие следы оставили метеоритно-астероидные удары фазы ПТБ в породах, имеющих возраст 3.90—3.85 млрд лет [Melosh, 1989; Valley et al., 2006; Bottke et al., 2012]. С этим свя-

зывают формирование лунных бассейнов [Koeberl, 2006; Сиротин, 2008; Богатилов и др., 2010]. В этот же период на Землю из-за ее размеров и гравитации упало до 40 астероидов размером 100—2000 км с образованием адекватных им кратеров диаметром 1000—5000 км [Тетерев и др., 2004]. На Земле прямые следы ударов этих фаз не сохранились, поэтому это предположение является гипотетическим. Недавно показатели Земли и Луны были рассмотрены в работе [Bottke et al., 2012], в которой на основании изучения лунных бассейнов делается предположение, что основную роль в их формировании играли астероиды, а начало ПТБ следует соотносить с временем 4.1—4.2 млрд лет.

Перспективным методом фиксирования древних космических бомбардировок является наличие сферулитовых «шарикообразных» прослоев в древних, архей-протерозойских породах [Bottke et al., 2012]. Когда большие метеориты ударяются об Землю, они производят богатые паром выбросы, содержащие большое количество капелек расплавов в виде шариков сферул размером с песчинку, большинство из которых высоко поднимаются в атмосферу. Окончательно остывшие расплавные шарики падают обратно, формируя слои мощностью от миллиметров до нескольких сантиметров.

В настоящее время найдено семь таких прослоев, время образования которых произошло в интервале 3.23—3.47 млрд лет тому назад, четыре имеют возраст между 2.90—2.63 млрд лет, один — между 2.1—1.7 млрд лет. Однако точные размеры ударника (метеорита или астероида) нужно знать, чтобы определить, какое импактное событие сформировало слой с шариками в архейских и протерозойских породах. О размерах астероидов, сформировавших эти слои, можно судить по образованным 65 млн лет тому назад таким слоям в ассоциации с кратером Чиксулуб (Chicxulub), размер которого 180 км в диаметре. 35 млн лет тому назад образовался Попигайский (Popigai) кратер с диаметром 100 км, это второй большой кратер фанерозойского возраста; здесь сформировались дистальные слои с шариками, мощность которых 0.1 мм.

На основании этого метода, а также прямых критериев импактных событий в архейско-протерозойской эпохе истории Земли можно выделить еще несколько фаз метеоритных бомбардировок. О второй фазе палеоархейских бомбардировок свидетельствует гигантское импактное событие возрастом 3.24—3.26 млрд лет. В зеленокаменных структурах Барбертон (Barberton) на юге Африки и Пилбара (Pilbara) в Австралии, в осадочных горизонтах этого возраста выявлены ударные брекчии (эджекиты и сферулиты), а также иридиевые аномалии — прямые указатели удара тела, которое по размерам сравнивают с астероидом Эрос (Eros, $33 \times 13 \times 13$ км) [Glikson, 2008]. Свидетельством третьей мезоархейской импактной фазы возрастом около 3.0 млрд лет является глубоко эродированный кратер Маниитсок (Maniitsoq) диаметром 160 км на юго-западе Гренландии. В его центре и на периферии обнаружены ударные брекчии, псевдотрахилиты и планарные деформации (PDF) в минералах [Garde et al., 2012]. Четвертая фаза — палеопротерозойская (2.40—1.63 млрд лет). Наиболее масштабные импактные события этой фазы произошли в интервале 2.02—1.85 млрд лет. Это ударный кратер Вредефорт (Vredefort) на юге Африки (диаметр 300 км, возраст 2.023 млрд лет); Котуйканская (250 км, 1.95 млрд лет) и предполагаемые Куонамская и Аргасалинская астроблемы (примерно такого же размера) на севере Сибирского кратона; Садбери (Sudbery) на Канадском щите (250 км, 1.85 млрд лет). Всего насчитывается 14 разновеликих палеопротерозойских астроблем [Катастрофические..., 2005; Koeberl, 2006; The Earth Impact..., 2007; Глуховский, Кузьмин, 2013].

Масштабные астероидные удары могли приводить к импакт-триггерному зарождению мантийных плюмов, которое сопровождалось корово-мантийным рециклированием пород мишени (земная кора). Действительно, статистически установлена высокая степень корреляции (доверительный уровень от 90 до 97 %) архейских и палеопротерозойских фаз астероидных бомбардировок Земли и Луны, с этапами плюмового магматизма и наиболее энергичного роста континентальной коры на Земле и катаклизмов на Луне [Ozima, 1987; Abbot, Isley, 2002a]. О высокой корреляции импактных событий с проявлениями плюмового магматизма пишет в своих работах Ф. Пирайно [Pirajno, 2000, 2007]. Таким образом, очевидно, в истории Земли эндогенная активность могла совпадать с космическими событиями, главным образом бомбардировкой метеоритами. Такие явления отмечаются и в фанерозое.

Эволюция лунно-земной дистанции. Проблема лунно-земных связей тесно связана с природой образования спутника Земли и с астероидными атаками как Земли, так и Луны. Большинство ученых [Хаин, 2003; Хаин, Короновский, 2007; Harrison, 2006; Koeberl, 2006; Wood, 2011; и др.] считают, что в конце процесса аккреции Земли при ее массе 60—70 % по сравнению с современной, она столкнулась с космическим телом с массой, близкой массе Марса. Это произошло примерно 4540—4530 млн лет тому назад, т.е. через 30—40 млн лет после формирования Солнечной системы, когда Земля в значительной степени была дифференцирована, большая часть ее ядра уже сформировалась¹.

¹ Не все согласны с этой гипотезой, полагая, что Луна образовалась независимо из газопылевого облака. Однако данные о силикатном составе Луны и мантии позволяют нам признать гипотезу столкновения более доказуемой [Кузьмин, 2014].