

СОЛНЕЧНЫЕ ГЕЛИЙ И НЕОН В АЛМАЗАХ, БАЗАЛЬТАХ ПЛЮМОВ
И ГОРЯЧИХ ТОЧЕК: ВОЗМОЖНЫЕ ВРЕМЯ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ
ГЕТЕРОГЕННОСТИ НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

© 2003 г. Б. А. Блюман

*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского
199106 Санкт-Петербург, Средний пр., 74; e-mail: lirrasny@mail.wplus.net*

Поступила в редакцию 18.03.2002 г.

Характеризуя изотопный состав гелия в обедненном (деплетированном) магматическом резервуаре, И.Я. Азбель и И.Н. Толстихин [1] отмечали, что величина $^3\text{He}/^4\text{He}$ равная $1.2 \pm 0.2 \times 10^{-5}$ обнаружена в базальтах и гидротермальных системах срединно-океанских хребтов (СОХ) и в базальтах областей современного вулканизма. Такой изотопный состав гелия объясняется смешением сохранившегося в мантии первичного гелия с непрерывно накапливающимся радиогенным гелием. И.Я. Азбель и И.Н. Толстихин [1] указывали на "...важное исключение – присутствие в горячих точках повышенного по отношению к базальтам СОХ в несколько раз изотопного отношения гелия, достигающего величины более чем $3-5 \times 10^{-5}$, полученной для термальных флюидов Исландии – области мантийного плюмажа погружающегося в недра мантии на глубину 400 км" [1, с. 48]. Они же констатируют присутствие вещества необходимого резервуара в базальтах Гавайского архипелага – горячего пятна с величинами изотопного гелиевого отношения 2.1×10^{-5} , почти в два раза превышающего величину типичную для гидротерм океанических рифтовых зон. В ультраосновных включениях и толеитовых базальтах подводного вулкана Лоихи Гавайев величина гелиевого изотопного отношения достигает 5×10^{-5} . Весьма примечательно, что И.Я. Азбель и И.Н. Толстихин [1] приводят ссылку на работу М. Озима и С. Зашу [2], в которой установлены исключительно высокие величины гелиевого изотопного отношения в алмазах – свидетельств захвата гелия алмазом на ранних стадиях эволюции Земли. М. Озима и С. Зашу [2] измерены величины гелиевого изотопного отношения в 27 южно-африканских алмазах, достигающие до 3.2×10^{-4} . Это позволило авторам полагать, что начальное гелиевое отношение было значительно выше, чем планетарное (1.42×10^{-4}) и близко к солнечному гелию (4×10^{-4}). М. Озима [2] считает возможным, что алмазы с высоким изотопным гелиевым отношением ($>2 \times 10^{-4}$) могут быть такими же древними, как Земля, или формировались вскоре

после формирования Земли и что изначально "уловленный" (trapped) гелий алмазов подобен солнечному, скорее чем планетарному гелию. Гелий в алмазах должен быть изолирован от U и Th со времени формирования Земли и не претерпел каких-либо последующих изменений.

Изучение изотопов неона в кубических алмазах Заира [3] показало, что величины изотопных отношений неона ($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} - 11.5-13.5$ и $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} - 0.047-0.074$) показывают, что неон в алмазах является смесью атмосферного и "алмазного" неона, причем последний содержит неон солнечного типа, захваченный из мантии, и нуклеогенный неон, повышенное содержание которого обусловлено его "производством" в алмазе и он не привнес извне. В этом случае возраст алмаза может быть равен 4 млрд. л. при условии содержания в нем 1 ppb урана, чтобы произвести установленное в алмазах количество ^{21}Ne . По мнению М. Озима и С. Зашу [3], солнечный неон уловлен мантией в процессе аккреции, что подтверждается и тем, что неон в обогащенных газами метеоритах имеет величину $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ идентичную "солнечной" – 11.3 ± 0.3 . Рассматривая эволюцию изотопов неона в мантии и алмазах, М. Озима и С. Зашу [3] показывают, что атмосферный неон фракционирован от первичного солнечного, в то время как неоновые изотопные отношения в базальтах СОХ – результат смешения между атмосферным и мантийным неоном (present mantle).

В 1987 году М. Хонда и др. [4] обнаружили в алмазах величины изотопного отношения неона ($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$) значительно выше, чем атмосферные, и близкие к солнечным.

В последние годы появляются работы по изотопии гелия и неона в базальтах горячих точек и плюмов – Исландского и Гавайского. М. Хонда и др. [5] опубликовали сведения о присутствии в базальтах Гавайев величин $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ значительно выше атмосферных и близких к "солнечному" неону.

Е. Ханю и др. [6] на примере горячей точки базальтов о-ва Реуньон рассматривают изотопные – гелиевые и неоновые – свидетельства существо-

вания в мантии двух независимых резервуаров: резервуара базальтов океанических островов (OIB) – менее дегазированного и резервуара базальтов СОХ (MORB) – более дегазированного. Присутствие этих изолированных резервуаров, по мнению Т. Ханю и др. [6], противоречит модели двухуровневой (layered) конвекции в мантии оттого, что эти резервуары изолированы от перемешивания. По их мнению, мантийные плюмы – главный способ транспорта глубинного материала к поверхности из нижней мантии. Изучение вулканитов горячих точек островов Реуньон и Маврициус показало длительное существование в нижней мантии ненарушенных конвекций недегазированных доменов, “питающих” плюмы в течение всего периода вулканизма (8 млн. лет). Радиогенная обогащенность гелиевых изотопов этих горячих точек выше, чем обогащенность вулканитов Лоихи Гавайев. Варьирующая (Реуньон, Лоихи-Гавайи) степень дегазации нижней мантии сформирована, по мнению Т. Ханю и др. [6] на ранних стадиях развития Земли, что подтверждается существованием в нижней мантии ненарушенных конвекцией гетерогенных первичных доменов.

В работе Е. Диксона и др. [7] рассматриваются изотопные отношения неона в базальтах Исландии, располагающиеся на линии смешения воздушный – солнечный неон и являющиеся свидетельством того, что первичный компонент солнечного неона захвачен (“trapped”) в мантии Земли и остался там сравнительно неизменным со времени 4.5 млрд. л. По мнению этих авторов, мантия сложена двумя главными конечными компонентами: сильно дегазированным компонентом и много менее дегазированным оригинальным первичным мантийным компонентом. В дальнейшем предполагается смешение этих двух компонентов и присутствие последнего в базальтах ряда горячих пятен – плюмов – Исландского и Гавайского. Масштабы этих недегазированных доменов в мантии могут уменьшаться со временем, “утоняясь” в перемешивающейся мантии. В качестве возможного аналога первичной недегазированной мантии может рассматриваться компонент NIMU еще и оттого, что, по мнению авторов [7], примитивная мантия характеризуется хондритовыми, околохондритовыми соотношениями литофильных (refractory) элементов, величинами E_{Nd} и E_{Sr} близкими к 0 и свинцовыми изотопными характеристиками, располагающимися вблизи геохроны 4.5 млрд. л. Авторы [7] также считают, что зоны примитивной недегазированной мантии существуют внутри нее в масштабах равных или превышающих участки плавления в мантии, что согласуется с моделью “шаров, пузырей” (blob) недегазированной примитивной мантии [8], которые могли формироваться на ранней истории

Земли и содержать “первичнообразованный” материал.

М. Морейра и др. [9] показали, что новые данные по изотопии гелия и неона субгляциальных базальтовых стекол Исландии свидетельствуют о том, что изотопный состав неона базальтов близок к солнечному и отличается от изотопного состава неона в базальтах Лоихи (Гавайи). Изотопное гелиевое отношение в базальтах Исландии ниже, чем в базальтах Лоихи, что обусловлено различиями их геологического положения. Понижение гелиевого изотопного отношения в базальтах Исландии относительно Лоихи обусловлено, по мнению авторов, размещением Исландского плюма в пределах СОХ, где происходит смешение дегазированного материала базальтов СОХ с материалом недегазированной первичной мантии. Такого смешения не происходит во внутриплитных базальтах Гавайского плюма. Гелий-неоновые изотопные характеристики базальтов Исландии, близкие к солнечным (высокие ^3He и ^{21}Ne) – свидетельства того, что источник Исландского плюма не был дегазирован после аккреции, при том что имеются геофизические доказательства проникновения Исландского плюма из нижней мантии.

В работе Д. Порцелли и др. [10] рассматривается одна из возможных моделей проникновения редких газов в процессе их адвекции в глубокую мантию из поверхностного магматического базальтового океана с возможной глубиной до 1500 км, возникшего в результате поверхностного плавления Земли, обусловленного гравитационной энергией дифференциации.

Положение о слоистом (layered) типе конвекции, основанное на разделении мантии на деплетированную верхнюю и недеплетированную нижнюю, по мнению Т. Бекера, Дж. Келлога и Р.О. Кеннела [8], плохо совместимо с сейсмологическими данными. До опубликования работы этих авторов ранее были предложены различные модели строения нижней мантии с учетом сейсмологических данных. Дж. Дэвис [11] предположил, что “куски, глыбы” (lumps) примитивного материала могут существовать в нижней мантии, являясь резервуарами недеплетированных базальтов. Расчеты М. Манга [12] свидетельствуют о том, что высокоскоростные “куски, глыбы” могут сохраниться в конвектирующих ячейках геологически длительное время не будучи деформированными и смешаны с окружающим их “текущим” веществом. М. Манга [12] показал, что высоковязкие “куски, глыбы” могут подвергаться неоднократно конвективным преобразованиям и это означает, что время конвективной их эрозии и смешения их материала с конвектирующим материалом может быть сопоставимо с геохимическим возрастом: области “жесткие” могут проти-

востоять смешению с окружающей мантией геологически длительное время, когда они имеют вязкость с фактором повышения около 75. Т. Бекер, Дж. Келлог [8] исследовали модель конвекции М. Манга [12] с рядом динамических, термальных, геохимических и реологических следствий. Радиоогенное тепло, производимое примитивными шарами (blobs) обуславливает повышение их температуры. Однако это может быть приемлемо для сравнительно небольших шаров радиусом менее 800 км. Результирующая термальная “плавучесть” шаров определяет их удаление от СОХ, их взаимодействие с поднимающимися плюмами. Геохимические построения указывают на то, что “шары” занимают от 30 до 65% мантии или меньше, в том случае, если они более обогащены по сравнению с примитивной мантией. Термальные построения предполагают, что “шары” окружены деплетированным материалом низкой вязкости, транспортирующим тепло к поверхности. Термальное уменьшение вязкости “шаров” по их периферии определяет условия динамического смещения. В среднем же вязкость нижней мантии увеличивается в условиях присутствия в ней шаров: если их вязкость в 100 раз превышает вязкость окружающей мантии, то это будет увеличивать эффективную вязкость приблизительно в 5 раз.

Образование шаров, по мнению Т. Бекера и Дж. Келлога [8] – нерешенная проблема. Геометрия шаров может быть определена моделями глобальной сейсмической томографии и может во многом объяснять геохимические и геофизические данные. По данным Т. Бекера и Дж. Келлога, геохимические данные свидетельствуют о гетерогенности мантии в различных линейных масштабах, хотя изотопная изменчивость может быть сведена к ограниченному количеству конечных компонентов – резервуаров. Подобные резервуары – компоненты мантийного смещения с устойчивыми изотопно-геохимическими характеристиками – установлены в верхней мантии (ЕМ1, ЕМ2, Н1МУ) [13], но практически отсутствуют сведения об их геометрии, хотя в ряде работ посвященных изотопным аномалиям (DUPAL, SOPITA) [14, 15], такие данные приведены, и линейные масштабы таких аномалий достигают сотен и тысячи километров. Свидетельства гетерогенности нижней мантии вытекают из рассмотренных выше данных по изотопии гелия и неона в базальтах мантийных плюмов и горячих точек. Эти же данные свидетельствуют о раннем синаккреционном (4–4.5 млрд. л.) времени заложения неоднородностей в нижней мантии.

Присутствие значимо повышенных гелиевых изотопных отношений в базальтах океанических островов (ОИВ), в ряде случаев ассоциированных с мантийными плюмами, обычно интерпретируется как доказательство присутствия в нижней мантии доменов (“шаров”) примитивной недегазированной

и недеплетированной мантии [16, 17]. Разброс величин гелиевых отношений в ОИВ – показатель того, что источник этих базальтов много более гетерогенен, чем источник MORB. Пространственная стабильность мантийных плюмов свидетельствует о глубинном источнике, располагающемся в наиболее низких уровнях мантии.

Т. Бекер и Дж. Келлог [8] рассматривают возможное количество “шаров” в нижней мантии, их размеры, колеблющиеся от 550 до 780 км, с учетом половины расстояние между шарами от 96 до 121 км. При этом чем более примитивны шары, тем выше в них производство внутреннего тепла по сравнению с окружающим их матриксом; нагрев шаров увеличивает их плавучесть и смещение в более высокие уровни мантии, а не совмещение с конвекционными ячейками. Внутренний разогрев примитивных шаров, уменьшение их вязкости могут варьировать в зависимости от степени их деплетированности и “разогрева”, определяя разные скорости, масштабы и время их подъема (апвеллинга) в верхнюю мантию. Рассчитано, что области шаров, подвергшиеся внутреннему разогреву, и потери вязкости ограничены половиной их радиуса (~13% объема), определяя взаимодействие внутренней и внешней частей шаров. Диссипация внутреннего тепла происходит во время относительного перемещения шаров между твердой оболочкой шаров и окружающей их “ослабленной” мантией, что приводит к эрозии наружной оболочки шаров окружающей “ослабленной” мантией. Внутренний разогрев шаров приводит к нелинейности их реологии с учетом того, что наиболее вязкий материал нижней мантии имел наиболее высокую температуру плавления. Величина расчетных отношений вязкости шаров и мантии может быть равной 100 [8]. При этом шары с латеральными размерами около 1200 км наиболее устойчивы и могут не подвергаться смешению геологически продолжительное время.

Важный вопрос – происхождение шаров, которые должны образовываться на ранних стадиях земной истории и содержать материал примитивного происхождения. “Шары” могут быть различены в мантии сейсмологическими наблюдениями, мантийной томографией [18], статистической интерпретацией времени прохождения волн: внутренняя часть шаров по сравнению с внешней более нагрета, что определяет замедление волн. В целом же противоположный эффект температура – состав затрудняет интерпретацию сейсмических данных с учетом различий эффектов S- и P-волн. По данным Дж. Девиса и др. [19], пространственный масштаб гетерогенности может быть определен линейной величиной порядка 1000 км, что совпадает с линейными размерами верхнемантийной аномалии DUPAL.

Приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что алмазы сохранили свидетельства древнего (синаккреционного) происхождения, уловив и сохранив (trapped) солнечные гелий и неон в момент формирования протогенетических, центральных частей алмазов алмазоносных эклогитов. С этими же древними процессами с возрастом около 4 млрд. л. связано, по-видимому, и синаккреционное формирование гетерогенности нижней мантии, сохранившей, так же как и алмаз, домены первичной, недегазированной мантии, не “стертые” последующими процессами конвекции в мантии. Свидетельством существования таких древних “первичных” недегазированных доменов в нижней мантии являются изотопные характеристики гелия и неона в базальтах горячих точек и мантийных плюмов. Существование доменов недегазированной мантии позволяет считать, что древние 4–4.5 млрд. л. синаккреционные домены первичного протопланетарного вещества сохранились в мантии, гетерогенность которой, подтверждается совокупными изотопно-геохимическими и геофизическими данными и является еще одним свидетельством ограниченной роли конвективных движений в нижней мантии. Эти же данные, наоборот, являются ярким свидетельством глубинного происхождения мантийных плюмов, как бы “сканирующих” нижнюю мантию в областях вулканизма плюмов и горячих точек и выносящих из мантийных глубин свидетельства присутствия здесь гетерогенных доменов примитивной недегазированной мантии.

Изотопно-геохимическая неоднородность проявлена в верхней мантии континентов и океанов статистически устойчивым присутствием в базальтах континентов и океанов определенных изотопных компонентов смешения EMI, EMII, NIMU. Время заложения, формирования изотопной гетерогенности в верхней мантии, по согласованному мнению геохимиков [20], варьирует по различным данным в интервале 2–3 млрд. л., а линейные размеры изотопных аномалий в океанах, в частности, варьируют от тысячи (DUPAL) до сотен (SOPITA) километров, находясь в соответствии с данными о присутствии и размерах гетерогенностей в верхней мантии по данным сейсмической томографии. Отмечено [21] изотопно-геохимическое соответствие мантийных изотопных компонентов смешения с определенными “компонентами” консолидированной коры континентов: компонента EMI – с нижней гранулит-базитовой корой, компонента EMII – с верхней гранитно-метаморфической корой, а компонента NIMU – с вулканами гранитно-зеленокаменных областей. Совместный анализ изотопно-геохимических характеристик континентальных, океанских базальтов, глубинных ксенолитов и кимберлитов показал [22], что допустимо предположение о синхронности, когенетичности формирования неоднород-

ностей коры и верхней мантии континентов и океанов, древнем (2–3 млрд. л.) заложении неоднородностей в верхней мантии, глубинном (до глубины 660 км) проникновении этих неоднородностей в верхнюю мантию и длительном, практически ненарушенном их существовании в верхней мантии. При этом представляется возможным предполагать импактное сопроисхождение древнейших (3.5–2.5 млрд. л.) алмазоносных эклогитов, тоналит-трондьемит-гранитоидных и базальт-коматиитовых комплексов [23].

Приведенные выше свидетельства неоднородности нижней мантии следуют из данных изучения изотопии гелия и неона в базальтах мантийных плюмов и горячих точек океанов; эти же данные позволяют предполагать значительные латеральные размеры неоднородностей, синаккреционное их заложение (4–4.5 млрд. л.) и, кроме того, относительно фиксированное положение, практически ненарушенное конвекционными движениями. В целом же представляется возможным, с учетом данных о присутствии примитивного недегазированного первичного “солнечного” вещества во включениях в алмазах алмазоносных эклогитов и в базальтах плюмов океанов, полагать, что их формирование происходило практически синхронно на ранних стадиях развития Земли (4.4–3.5–2.5 млрд. л.) при участии первичного недегазированного “солнечного” вещества. При этом присутствие такого вещества, установленного в алмазах алмазоносных эклогитов, сопряжено с процессами раннего постаккреционного развития Земли, когда при участии этих древнейших импактных событий происходило сопроисхождение алмазоносных эклогитов, серогнейсовых и базальт-коматиитовых ассоциаций, синхронно и когенетично с которыми формировалась вещественная и изотопно-геохимическая неоднородность древнейших коры и верхней мантии [22, 23]. Более древний возраст (4.5–4 млрд. л.) и, наверное, синаккреционное происхождение имеет гетерогенность и нижней мантии, также практически ненарушенная конвекционными движениями и фиксируемая присутствием в нижней мантии первичного, недегазированного “солнечного” вещества.

Гетерогенность нижней и верхней мантии, одновременное ее образование при участии древнейших синаккреционных процессов (нижняя мантия) и постаккреционных импактных процессов (кора и верхняя мантия) накладывают определенные ограничения на различные модели конвекции в мантии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Азбель И.Я., Толстихин И.Н.* Радиогенные изотопы и эволюция мантии земли, коры и атмосферы. Апатиты: Изд. Кольск. фил. АН СССР, 1988. 136 с.

2. Ozima M., Zashu S., Niton O. $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio, noble gas abundance and K–Ar dating of diamonds. An attempt to search for records of early terrestrial history // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1983. V. 47. № 12. P. 2217–2225.
3. Ozima M., Zashu S. Solar type Ne in Zaire cubic diamonds // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1988. V. 52. № 1. P. 19–25.
4. Honda M., Reynolds J.H., Roedder E., Epstein S. Noble gases in gem-class diamonds from known localities: occurrence solar-like helium and neon // *Journ. Geoph. Res.* 1987. V. 92. P. 12507–12521.
5. Honda M., McDougall, Patterson D.B. Possible solar noble-gas in Hawaiian basalts // *Nature*. 1991. V. 349. P. 149–151.
6. Hanyu T., Dunai T.J., Davies G.R. et al. Noble gas study of Reunion hotspot: evidence for distinct less degassed mantle sources // *EPSL*. 2001. V. 193. № 1–2. P. 83–98.
7. Dixon E.T., Honda M., Dougall J.Mc. et al. Preservation of near solar neon isotopic ratios in Islandic basalts // *EPSL*. 2000. V. 180. № 3–4. P. 309–324.
8. Becker T.W., Kellog J.D., O'Connell R.J. Thermal constraints on the survival of primitive blobs in the lower mantle // *EPSL*. 1999. V. 171. P. 351–365.
9. Moreira M., Breddam K., Curtice J., Kurz M.D. Solar neon in the Islandic mantle: new evidence for an undegassed lower mantle // *EPSL*. 2001. V. 185. № 1–2. P. 15–23.
10. Porcelli D., Woolom D., Cassen P. Deep Earth rare gases: initial inventories, capture from solar nebula and losses during Moon formation // *EPSL*. 2001. V. 193. № 1–2. P. 237–251.
11. Davies G.F. Geophysical and isotopic constraints on mantle convection an interim synthesis // *JGR*. 1984. V. 8. P. 541–544.
12. Manga M. Mixing of heterogenities in the mantle: effect of viscosity differences // *JGR*. 1996. V. 23. P. 403–406.
13. Zindler A., Hart S. Chemical geodynamic. *Ann. Rev. // EPSL*. 1986. V. 14. P. 493–571.
14. Hart S. Heterogenous mantle domain signatures, genesis and mixing chronologies // *EPSL*. 1988. V. 90. P. 273–296.
15. Staudigel H., Park K.-H., Pringle M. et al. The longevity of South Pacific isotope and thermal anomaly // *EPSL*. 1991. V. 102. № 1. P. 24–74.
16. Kurz M.D., Jenkins W.J., Hart S.R., Claque D. Helium isotopic variations in volcanic rocks from Loihi Seamount and the Island Hawaii // *EPSL*. 1983. V. 66. P. 388–406.
17. Farley K.A., Natland J.H., Gaig H. Binary mixing of enriched and undegassed (primitiv-questionable) mantle components (He, Sr, Nd, Pb) in Samoan lawas // *EPSL*. 1992. V. 111. P. 183–199.
18. Su W.-j., Dzievoski A.M. Simultaneous inversion for 3-D variation in shear and bulk velocity in the mantle. *Phys. // Earth Planet. Inter.* 1997. V. 100. P. 135–156.
19. Davies J.H., Gudmundsson O., Clagton R.W. Spectra of mantle shear wave velocity structure // *Geoph. J. Int.* 1992. V. 108. P. 565–582.
20. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
21. Блюман Б.А. О возможной природе компонентов изотопного смещения базальтов океанических островов // *Геохимия*. 1997. № 6. С. 653–658.
22. Блюман Б.А. Изотопные характеристики корово-мантийных неоднородностей, время и глубина их формирования // *Геохимия*. 2001. № 5. С. 567–572.
23. Блюман Б.А. О возможности импактного происхождения древнейших алмазоносных эклогитов, серогнейсовых и базальт-коматиитовых комплексов // *Тектоника и геофизика литосферы. Мат. XXV Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2002. С. 66–69.*