

ГЕОРЕАКТОР

В.Н. Сергеев

Представлен краткий обзор по гипотезе существования в недрах Земли природного ядерного реактора – геореактора. Интерес к этой гипотезе вызван недостаточностью современных знаний о тепловом балансе Земли, а также об источниках, генерирующих земное магнитное поле. Рассмотрены различные предложения о месте расположения гипотетического геореактора в земных недрах: в центре Земли, на границе жидкого и твердого ядра Земли и на границе мантии и ядра. Приведены ограничения сверху на мощность гипотетического геореактора в центре Земли и на границе твердого и жидкого ядра Земли, полученные на основе измерений потоков нейтрино, рождаемых в недрах Земли (геонейтрино).

Введение

Измеренный тепловой поток из недр Земли на земной поверхности составляет 47 ± 2 ТВт [Davies, Davies, 2010]. Современные модели дают значения теплового потока из земных недр в достаточно широком диапазоне [Anderson, 2009], что оставляет возможность существования энергетических источников помимо обычно рассматриваемых, таких как радиоактивный распад сосредоточенных в недрах Земли радиоактивных изотопов (в основном ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K), гравитационная дифференциация вещества в мантии и ядре, приливное трение и т.д. Таким источником тепла мог бы быть и природный ядерный реактор.

Природный ядерный реактор

При захвате нейтронов ядра тяжелых элементов, в частности, урана и тория, становятся нестабильными и делятся на части [Широков, Юдин, 1980; Блан, 1989]. При этом выделяется энергия и несколько нейтронов, что дает возможность осуществ-

вления самоподдерживающейся ядерной реакции деления при условии, что потери нейтронов в среде, вызванные рассеянием и поглощением ядрами неделящихся элементов, меньше, чем их воспроизводство. Энергия нейтронов, выделяемых при делении ядер, довольно высока (порядка нескольких МэВ). При рассеянии на ядрах среды нейтроны деления быстро теряют первоначальную энергию. Имея в виду, что для деления наиболее распространенного изотопа урана ^{238}U требуются нейтроны с энергиями выше 1 МэВ, потеря энергии нейтронами деления препятствует осуществлению самоподдерживающейся ядерной реакции деления ^{238}U . Изотоп урана ^{235}U делится нейтронами любых энергий, но доля его в природном уране не велика. Для улучшения возможности протекания самоподдерживающейся реакции деления в природном уране в среде необходимо присутствие вещества, ядра которого замедляли бы нейтроны деления, не поглощая их – замедлителя. Причиной этого служит то обстоятельство, что нейтроны легко поглощаются делящимися ядрами в том случае, если у них маленькая энергия движения.

Природный уран состоит в основном из двух изотопов ^{238}U (период полураспада – $4,468 \cdot 10^9$ лет) и ^{235}U (период полураспада – $7,04 \cdot 10^8$ лет) [Audi et al., 2003]. Распространенность этих изотопов урана в настоящее время ^{238}U – 99,2745% и ^{235}U – 0,7200% [Audi et al., 2003]. Для того, чтобы могла начаться самоподдерживающаяся реакция деления урана, необходима концентрация ^{235}U в природном уране более высокая, чем 0,72%. Из-за меньшего времени полураспада ^{235}U его концентрация в природном уране в прошлом была выше. Впервые вопрос о возможности протекания самоподдерживающейся реакции деления урана и тория в естественных условиях когда-либо в прошлом был рассмотрен в работах [Wetherill, 1953; Wetherill, Inghram, 1953]. В работе [Kuroda, 1956] было показано, что $2,1 \cdot 10^9$ лет назад и ранее, когда концентрация ^{235}U в природном уране была выше 4%, при наличии замедлителя нейтронов (в [Kuroda, 1956] в этом качестве рассматривалась вода) и достаточных размерах скопления природного урана, могла начаться самоподдерживающаяся реакция деления урана. В 1972 году в урановом месторождении близ Окло (Западная Африка) были обнаружены следы работы природного ядерного реактора [Петров, 1977]. Это открытие в дальнейшем стимулировало рассмотрение возможности существования природного ядерного реактора в глубинах Земли – геореактора. Были предложены гипотезы о существовании геореактора в ядре, в центре Земли, на границе жидкого и твердого ядра Земли и на границе мантии и ядра.

Гипотезы о геореакторе

Впервые гипотеза о существовании геореактора в ядре, в центре Земли рассматривалась в работе [Herndon, 1993]. В дальнейшем эта гипотеза получила свое развитие в работах [Herndon, 1996; 2007; Hollenbach, Herndon, 2001] и некоторых других. В настоящем виде она представлена в [Herndon, 2009]. По мнению автора гипотезы, в центре Земли, в глубине внутреннего ядра располагается природный ядерный реактор, состоящий из активной зоны и оболочки из продуктов деления и радиоактивного распада. Эта оболочка может находиться в жидком состоянии. Оболочка геореактора поглощает нейтроны. При увеличении мощности геореактора происходит расширение вещества активной зоны и смешивание делящихся материалов с поглощающим нейтроны веществом оболочки. При этом мощность геореактора падает. Затем происходит отделение вещества оболочки от делящихся материалов и мощность геореактора снова увеличивается. Таким образом осу-

ществляется саморегуляция работы геореактора. Магнитное поле Земли, по мнению автора гипотезы, создается конвекцией в оболочке геореактора, а не конвекцией в жидком ядре. Для подтверждения гипотезы в [Hollenbach, Herndon, 2001] приведены результаты математического моделирования работы геореактора.

Возможность существования геореактора на границе жидкого и твердого ядра Земли рассматривалась в работе [Анисичкин, Безбородов, 2009] и других работах с участием тех же авторов. Так в [Анисичкин и др., 2003] приводится обоснование концентрации делящихся материалов на границе жидкого и твердого ядра Земли, и рассматриваются различные механизмы протекания самоподдерживающейся ядерной реакции в ядре Земли. В качестве основных механизмов реакций в активном слое предлагаются квазистационарное горение с воспроизводством делящихся изотопов и нейтронно-делительная волна [Феоктистов, 1989]. Рассматривается также возможность взрывного характера протекания ядерных реакций, в частности, инициированного падением на Землю крупных тел.

Гипотеза о существовании геореактора на границе мантии и ядра Земли рассматривалась в работе [De Meijer, Van Westrenen, 2008]. Авторы этой гипотезы обращают внимание на то, что концентрация урана и тория в нижней мантии на границе мантии и ядра (при условии их равномерного распределения) в далеком прошлом была всего в несколько раз меньшей, чем необходимо для начала работы геореактора. Неоднородности в распределении урана и тория, а также присутствие плутония ^{244}Pu , как источника нейтронов могли, по мнению авторов, привести к началу работы геореактора на быстрых нейтронах с воспроизводством ядерного топлива.

В качестве подтверждения всех гипотез о геореакторе их авторы приводят данные о соотношении стабильных изотопов гелия $^3\text{He}/^4\text{He}$ в изверженных породах. Увеличение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в изверженных породах относительно $^3\text{He}/^4\text{He}$ в атмосфере они объясняют радиогенным происхождением ^3He и ^4He , связанным с работой геореактора. Обсуждается также влияние возможного нестационарного характера работы геореактора на процессы, происходящие в Земле (изменение магнитного поля Земли и т.п.).

Важнейшим вопросом при рассмотрении возможности существования геореактора является вопрос о механизме концентрации делящихся материалов (урана и тория) в земных недрах. Этот вопрос является слабым местом всех предложенных гипотез о геореакторе (смотри, например, комментарии к [Анисичкин, Безбородов, 2009], опубликованные вместе с самой статьей). Однако полностью исключать возможность существования геореактора в недрах Земли пока еще нельзя. Окончательно подтвердить или опровергнуть эти гипотезы могут измерения потоков нейтрино из недр Земли – геонейтрино.

Измерение потоков геонейтрино и гипотеза геореактора

Анализ данных, полученных детекторами KamLAND и Borexino, дает возможность получить информацию о гипотетическом природном ядерном реакторе. В работе [Bellini et al., 2010] на основе данных Borexino для геореактора в центре Земли получено ограничение по мощности в 3 ТВт. Аналогичное ограничение по данным KamLAND составляет 6,2 ТВт [Abe et al., 2008]. В работе [Fogli et al., 2010] получены несколько иные значения ограничения на мощность геореактора в центре Земли. Для данных Borexino – 4,1 ТВт, для данных KamLAND – 6,7 ТВт и совместная обработка данных KamLAND и Borexino дает 3,9 ТВт.

В отличие от гипотезы о существовании геореактора в центре Земли, когда известно точное местоположение источников антинейтрино от геореактора, в гипотезах о существовании геореактора на границе жидкого и твердого ядра Земли и на границе мантии и ядра точное местоположение геореактора неизвестно. Это обстоятельство вносит некоторую неопределенность при обработке данных измерений геонейтринных потоков. В предположении существования геореактора на границе жидкого и твердого ядра, на основе данных наблюдений KamLAND за 2002–2009 годы и данных наблюдений Borexino за 2007–2009 годы, в работе [Rusov et al., 2010] получена оценка мощности геореактора в интервалах времени по несколько лет для различных оптимальных расстояний от геореактора до детектора. Результат составил от нескольких десятков до 5 ТВт. На основании этих результатов авторы работы [Rusov et al., 2010] делают вывод о существенно нестационарном режиме работы геореактора.

Заключение

В любом случае гипотеза о существовании геореактора остается пока гипотезой, и для ее проверки требуется регистрация геонейтрино (при достаточной статистике) с энергиями выше 3,26 Мэв [Русов, Тарасов, Литвинов, 2008], то есть с энергиями выше тех, что дают реакции распада радиоактивных изотопов в недрах Земли [Сергеев, 2010], так как энергетический спектр геонейтрино от геореактора простирается до 8 Мэв. В настоящее время накопленных данных пока недостаточно для проведения этой работы. С вводом в эксплуатацию в ближайшие годы новых детекторов, способных регистрировать геонейтрино, SNO+ и Hanohano [Сергеев, 2010] и накоплением новых данных на уже действующих детекторах KamLAND и Borexino гипотеза о геореакторе может быть подтверждена или опровергнута в течение нескольких лет. Следует отметить, что остановка японских промышленных ядерных реакторов, вызванных трагическими событиями марта 2011 года, уменьшит фон геонейтринных потоков, связанный с реакторными антинейтрино, и улучшит качество данных, получаемых детектором KamLAND.

Автор благодарит профессора А.В. Витязева за постоянный интерес к проблемам нейтринной геофизики и внимание к этой работе.

Литература

- Анисичкин В.Ф., Безбородов А.А., Еришов А.П., Суслов И.Р. Возможные режимы цепных ядерных реакций в ядре Земли / VII Забабахинские научные чтения. Сентябрь 8–12, Снежинск. 2003.
- Анисичкин В.Ф., Безбородов А.А. Ядерная топка Земли // Наука из первых рук, 2009, №3, С. 26–35.
- Блан Д. Ядра, частицы, ядерные реакторы. М.: Мир. 1989. 336 с.
- Петров Ю.В. Естественный ядерный реактор Окло // Успехи физических наук. 1977, т. 123, вып. 3, с. 473–486.
- Русов В.Д., Тарасов В.А., Литвинов Д.А. Физика реакторных антинейтрино. М.: Эдиториал УРСС. 2008. 408 с.
- Сергеев В.Н. Перспективы геонейтринных исследований / Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2010, с. 54–58.

- Феокистов Л.П.* Нейтронно-делительная волна // Доклады АН СССР. 1989. Т. 309. № 4. С. 864–867.
- Широков Ю.М., Юдин Н.П.* Ядерная физика. М.: Наука. 1980. 728 с.
- Abe S. et al.* Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND // Phys. Rev. Lett. 2008, 100, 221803; arXiv: 0801.4589v3 [hep-ex].
- Anderson D.A.* Energetics of the Earth and the Missing Heat Source Mystery / 2009, <http://www.mantleplumes.org/Energetics.html>.
- Audi G. et al.* The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties // Nuclear Physics A. 2003, 729. P. 3–128.
- Bellini G. et al.* Observation of Geo-Neutrinos // Phys. Lett. 2010, B687, P. 299–304; arXiv: 1003.0284v2 [hep-ex].
- Davies, J.H., Davies D.R.* Earth's surface heat flux // Solid Earth. 2010, 1, P. 5–24.
- Fogli G.L. et al.* Combined analysis of KamLAND and Borexino neutrino signals from Th and U decays in the Earth's interior // Phys. Rev. D 82:093006, 2010; arXiv: 1006.1113v1 [hep-ph].
- Herndon J.M.* Feasibility of a nuclear fission reactor at the center of the Earth as the energy source for the geomagnetic field // Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. 1993, 45. P. 423–437.
- Herndon J.M.* Sub-structure of the inner core of the Earth / Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 1996, 93. P. 646–648.
- Herndon J.M.* Nuclear georeactor generation of the Earth's geomagnetic field // Current Science. 2007. V. 93. No. 11. P. 1485–1487.
- Herndon J.M.* Uniqueness of Herndon's Georeactor: Energy Source and Production Mechanism for Earth's Magnetic Field; arXiv: 0901.4509v2 [physics.gen-ph].
- Hollenbach D.F., Herndon J.M.* Deep-Earth reactor: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field / Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2001, 98. P. 11085–11090.
- Kuroda P.K.* On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals // J. Chem. Phys. 1956. V. 25. No. 4. P. 781–782.
- De Meijer R.J., Van Westrenen W.* Assessing the feasibility and consequences of nuclear georeactors in Earth's core-mantle boundary region; arXiv: 0805.0664v1 [physics.geo-ph].
- Rusov V.D. et al.* The KamLAND-experiment and Soliton-like Nuclear Georeactor. Part 1. Comparison of Theory with Experiment; arXiv: 1011.3568v3 [astro-ph.EP].
- Wetherill G.W.* Spontaneous fission yields from uranium and thorium // Phys. Rev. 1953. V. 92. No. 4. p. 907–912.
- Wetherill G.W., Inghram M.G.* / Proc. of the Conference on Nuclear Processes in Geologic Settings, USA, Sept. 1953, p. 30.