

**ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН  
В ОЧАГОВЫХ ОБЛАСТЯХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

*Добрынина А.А.<sup>1</sup>, Саньков В.А.<sup>1,2</sup>, Герман В.И.<sup>3</sup>, Тоцакова С.А.<sup>1</sup>, Предеин П.А.<sup>4</sup>,  
Чечельницкий В.В.<sup>5</sup>, Тубанов Ц.А.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск

<sup>3</sup>Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья,  
Красноярск

<sup>4</sup>Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ

<sup>5</sup>Байкальский филиал Геофизической службы, Иркутск

*Аннотация.* В работе представлены результаты исследования поглощения сейсмических волн в очаговых областях сильных землетрясений юга Восточной Сибири на примере Бусингольского (27.12.1991 г., М=6.5), Южно-Байкальского (25.02.1999 г., М=5.9), Кичерских (21.03.1999 г., М=6.0 и М=5.9), Чаруодинских (10.11.2005, М=5.8 и 11.12.2005, М=5.6) и Тувинских землетрясений (27.12.2011 г., М=6.1 и 26.02.2012 г., М=6.4). Анализ проводился на основе рассмотрения временного распределения отношений амплитуд ( $A_S/A_P$ ) и скоростей ( $V_P/V_S$ ) объемных прямых поперечных (S) и продольных (P) волн в афтершоковых последовательностях, сопровождавших выбранные сильные землетрясения, и показал существование временных вариаций затухания сейсмических волн в очаговых областях сильных землетрясений. Изменение параметров затухания сейсмических волн связывается с миграцией флюидов при изменении напряженно-деформированного состояния среды. При этом, в зонах преимущественного растяжения флюиды концентрируются в области готовящегося очага, а затем перераспределяются в более широкой области разрушения. Для зон с преобладанием режимов сжатия и сдвига флюид, выдвигнутый в процессе усиливающегося во времени сжатия перед началом сейсмической активизации, мигрирует в область сформировавшихся хрупких деформаций, существенно изменяя поглощающие свойства массива.

*Ключевые слова:* затухание, области сдвига, области растяжения, сильные землетрясения, афтершоки, юг Восточной Сибири.

**TEMPORAL VARIATIONS OF SEISMIC WAVE ATTENUATION IN THE FOCAL  
AREAS OF STRONG EARTHQUAKES IN THE SOUTH OF THE EASTERN SIBERIA**

*Dobrynina A.A.<sup>1</sup>, Sankov V.A.<sup>1,2</sup>, German V.I.<sup>3</sup>, Toschakova S.A.<sup>1</sup>, Predein P.A.<sup>4</sup>,  
Chechelnitzky V.V.<sup>5</sup>, Tubanov Ts.A.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Institute of the Earth's crust of SB RAS, Irkutsk

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk

<sup>3</sup>Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources, Krasnoyarsk

<sup>4</sup>Geological Institute of SB RAS, Ulan-Ude

<sup>5</sup>Baikal Regional Seismological Center, Irkutsk

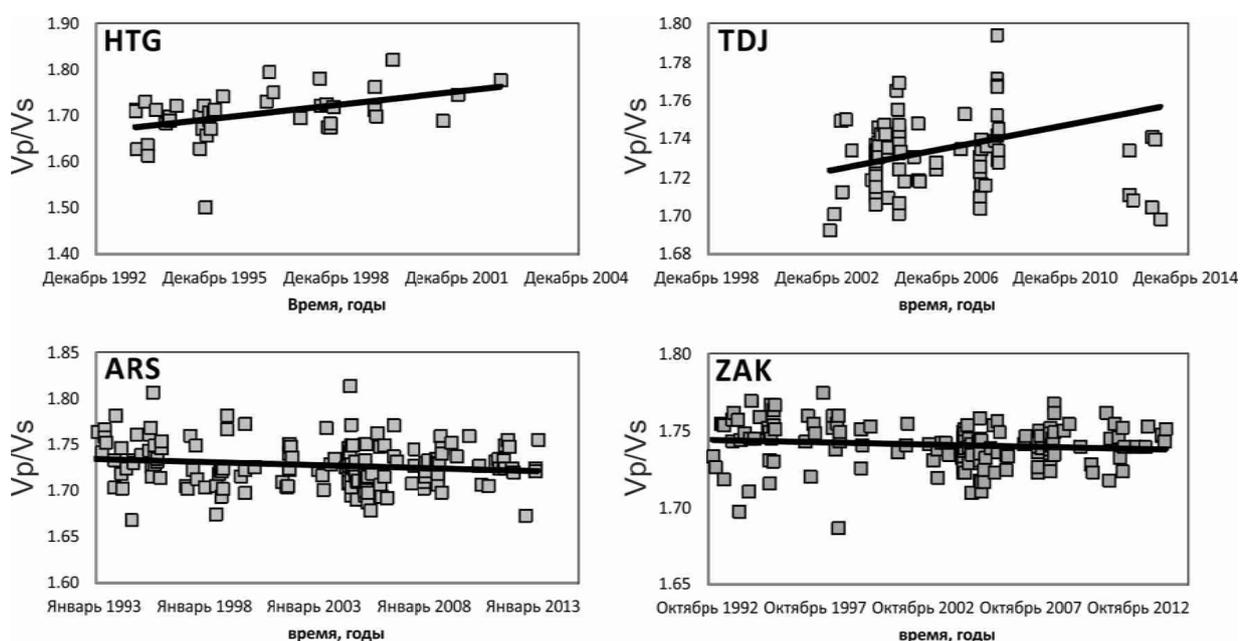
*Abstract.* The seismic wave attenuation in the focal areas of strong earthquakes in the south of the Eastern Siberia is considered. The results of such study for Busingol earthquake of 27 December, 1911, M=6.5; South-Baikal earthquake of 25 February, 1999, M=5.9; Kichera earthquakes of 21 March, 1999, M=6.0 and M=5.9; Chara earthquakes of 10 November, 2005, M=5.8 and 11 December, 2005, M=5.6 and Tuva earthquakes of 27 Dember, 2011, M=6.1 and 26 February, 2012, M=6.4 are presented. The analysis was based on considering of the temporal

distributions of the relations of the amplitudes ( $A_S/A_P$ ) and velocities ( $V_P/V_S$ ) of the body direct S- and P-waves in the aftershock sequences accompanied the selected strong events. The study demonstrated the existing of temporal variations of seismic wave attenuation in the focal areas of the strong earthquakes. The variations of the seismic wave attenuation are explained by the fluid migration during the change of stress-strain state of the medium. Herewith, in the extension zones the fluids concentrate in the focus of the future earthquake and then redistribute in the wider area of destruction. For the strike-slip zones the fluid is pressed out during the increasing compression before the beginning of the seismic activity. It migrates in the area of the brittle deformations and significantly change the absorption properties of the medium.

*Keywords:* attenuation, strike-slip zone, extension zone, strong earthquakes, aftershocks, the south of Eastern Siberia

В настоящей работе исследуются вариации поглощения сейсмических волн в очаговых областях сильных землетрясений юга Восточной Сибири на примере Бусингольского (27.12.1991 г.,  $M=6.5$ , [1]), Южно-Байкальского (25.02.1999 г.,  $M=5.9$ , [2]), Кичерских (21.03.1999 г.,  $M=6.0$  и  $M=5.9$ , [2]), Чаруодинских (10.11.2005,  $M=5.8$  и 11.12.2005,  $M=5.6$ , [3]) и Тувинских землетрясений (27.12.2011 г.,  $M=6.1$  и 26.02.2012 г.,  $M=6.4$ , [4]). Землетрясения сопровождалось афтершоковыми последовательностями, для Южно-Байкальского и Кичерских землетрясений также зафиксирована форшоковая активность [1-4]. Поперечные волны очень чувствительны к содержанию флюида в среде, поэтому временные вариации отношений скоростей ( $V_P/V_S$ ) и амплитуд ( $A_S/A_P$ ) прямых объемных продольных (P) и поперечных (S) волн, зарегистрированных на ближайших к очаговым областям сейсмических станциях (расстояния до 400 км), могут интерпретироваться с точки зрения вариаций содержания флюида в этих объемах коры. Для анализа использовались как землетрясения, входящие в состав афтершоковых последовательностей, так и события, локализованные в прилегающих к ним районах.

Анализ временных вариаций параметров затухания (отношений  $V_P/V_S$  и  $A_S/A_P$ ) показывает их различное поведение для разных афтершоковых последовательностей. Для событий, локализованных в очаговой области Бусингольского землетрясения и прилегающих к ней районах за период с 1993 по 2014 гг. на ближайших к эпицентру сейсмических станциях (ARAD, KZL, ORL, MOY, HTG, KRN, TLY, IRK) отмечается тенденция к увеличению параметра  $V_P/V_S$  со временем, в то время как для станций ARS и ZAK наблюдается понижение указанного параметра со временем (рис. 1).



**Рис. 1.** Временные вариации отношений  $V_P/V_S$  для Бусингольских землетрясений.

Интересное поведение  $V_p/V_s$  фиксируется на станции TDJ: в период с 2003 по 2008 гг. отмечается рост параметра  $V_p/V_s$ , а за период 2013-2014 гг. – понижение. Аналогичное поведение параметров затухания отмечается для Чаруодинских землетрясений: отношение  $V_p/V_s$  повышается, а отношение  $A_s/A_p$  – понижается со временем в течение периода с ноября 2005 г. по июнь 2006 г.

Для района Южного Байкала рассматривались землетрясения Южно-Байкальской форшоково-афтершоковой последовательности [2] и события, произошедшие в районе Южного Байкала позже, но до момента Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. На рис. 2 показаны вариации отношений скоростей объемных продольных и поперечных волн для форшоков (белые кружки) и афтершоков (серые кружки) Южно-Байкальского землетрясения (черный кружок). Анализ вариаций отношений  $V_p/V_s$  показывает, что в самом начале активизации (стадия форшоков) для большинства сейсмических станций наблюдались достаточно высокие значения  $V_p/V_s$  – до 1.78, с 25 февраля (основная стадия) эти значения на большинстве станций резко упали (рис. 2). Далее в ходе сейсмической активизации отмечаются хаотические вариации отношения скоростей, и, наконец, в последующие годы параметр  $V_p/V_s$  стабильно понижается. Например, для станции Хурамша значение параметра  $V_p/V_s$  понизилось на 3% за рассматриваемый период времени (1999-2008 гг.).

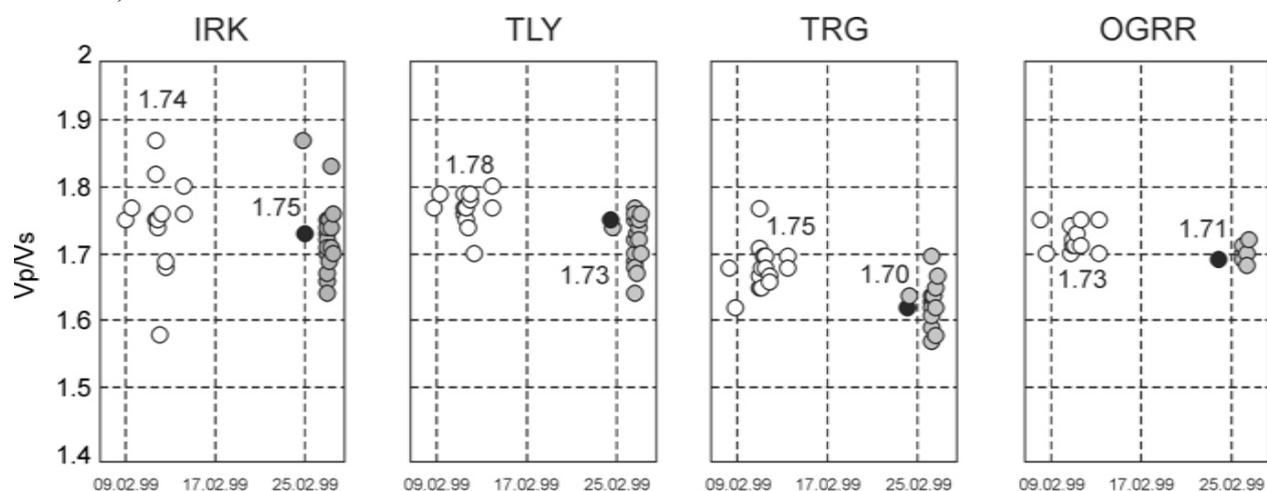
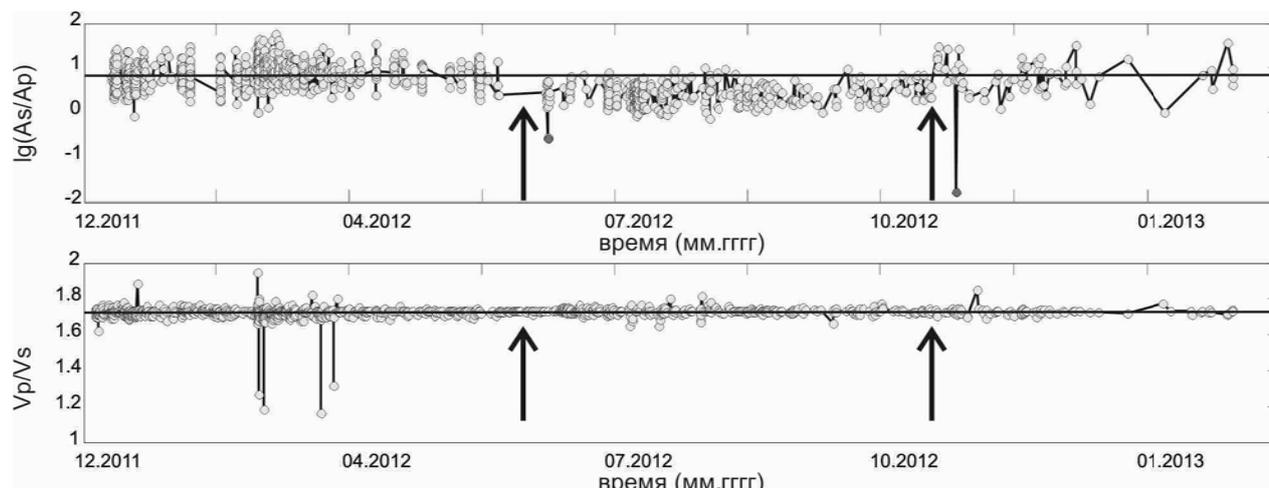


Рис. 2. Вариации отношений  $V_p/V_s$  для Южно-Байкальской последовательности.

Кичерские землетрясения представляют собой пример уникальной долгоживущей афтершоковой последовательности: начавшись в 1999 г., сейсмическая активность продолжается до настоящего времени. Сильнейшие землетрясения последовательности произошли в марте, мае и декабре 1999 г., после этого в очаговой области наблюдалась умеренная сейсмическая активность – самое сильное событие имело энергетический класс  $K = 11.0$ . В декабре 2006 г. произошло сильное землетрясение с  $K = 13.6$ , сопровождавшееся многочисленными афтершоками, в июле 2015 г. также зарегистрировано событие с  $K=13.0$ . В настоящей работе мы ограничились рассмотрением временного периода с 1999 г. по 2006 г., т. е. временем первой активизации. На начало активизации отношение  $V_p/V_s$  имело достаточно высокие значения – до 1.78, в ходе сейсмического процесса это отношение понижалось – до величин 1.76÷1.73 для разных станций. Параметр  $A_s/A_p$ , наоборот, показывает постепенное повышение со временем.

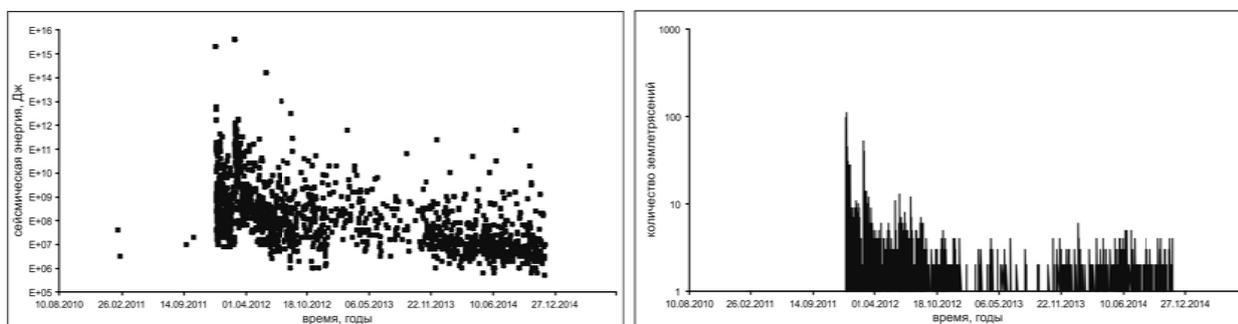
Тувинская афтершоковая последовательность локализована в районе хребта Академика Обручева в пределах Саяно-Тувинского поднятия и представляет собой мощную последовательность землетрясений (более 2500 толчков по состоянию на конец 2014 г.) с двумя главными толчками, разделенными двухмесячным периодом. Анализ отношений скоростей ( $V_p/V_s$ ) и амплитуд ( $A_s/A_p$ ) прямых объемных волн для станции HVS показал

существование временного интервала длиной в несколько месяцев (от 13.06.2012 до 08.11.2012) с пониженными значениями параметра  $A_S/A_P$  (рис. 3).



**Рис. 3. Временные вариации отношений  $A_S/A_P$  и  $V_P/V_S$  для Тувинской последовательности, станция Хову-Аксы (HVS).**

На графиках вариаций  $V_P/V_S$  этой области соответствуют области относительного повышения. Анализ графиков посуточного распределения количества землетрясений и суммарной сейсмической энергии (по данным регионального каталога, составленного Красноярским научно-исследовательским институтом геологии и минерального сырья) показал, что практически сразу после этого периода (с задержкой в два месяца) выделяется период с января по октябрь 2013 г., для которого характерна редкая слабая сейсмичность (рис. 4). Общее количество толчков не превышало 130, а энергетический класс самого сильного события равен 11.8.



**Рис. 4. Выделение сейсмической энергии (слева) и количество землетрясений (справа) для Тувинской последовательности.**

Значительное уменьшение скоростей и амплитуд поперечных волн относительно продольных отмечается при прохождении S-волн через слой сильного поглощения, содержащий заметную долю жидкой фазы [5]. Подобный эффект может быть вызван миграцией флюида в очаговую область из окружающего пространства. Согласно выявленным тенденциям такой процесс наблюдался в эпицентральной зоне Бусингольского и Чарундинских землетрясений. Для Южно-Байкальской и Кичерской последовательностей установлен другой сценарий изменения поглощающих свойств сейсмогенной среды, который предполагает высокую ее флюидонасыщенность до основной стадии с последующим падением параметра  $V_P/V_S$ . По-видимому, флюид мигрировал из очаговой области во внешнее пространство.

Совершенно иное временное распределение значений  $V_P/V_S$  и  $A_S/A_P$  наблюдалось в очаговой зоне Тувинских землетрясений 2011–2014 гг. К сожалению, у нас отсутствуют наблюдения до первого события последовательности (27.12.2011 г.). В начальной фазе по-

следовательности указанные параметры имели средние значения близкие к 1.73. На спаде афтершоковой активности произошло снижение амплитуд поперечных волн относительно продольных, сопровождавшееся снижением скоростей поперечных волн, что может быть интерпретировано, как следствие притока флюидов в разрушенную очаговую область. Одновременно относительно повысилось количество слабых толчков. Это явление наблюдалось в течение довольно длительного промежутка времени, за этим с интервалом приблизительно 2 месяца последовало резкое уменьшение количества землетрясений. Однако, после десятимесячного относительного сейсмического затишья, афтершоковая активность возобновилась на более высоком уровне. Предположительно, постсейсмические релаксационные деформации вызвали новое перераспределение флюидной масс в очаговой области. В целом, намечается тенденция развития долгоживущей афтершоковой последовательности с характеристиками, подобными Бусингольской последовательности землетрясений. Это тем более вероятно, поскольку обе последовательности находятся в сходных геодинамических условиях, характеризующихся проявлением сдвиговых деформаций [6].

Как следует из приведенных данных, в исследуемом регионе присутствуют две противоположные тенденции в вариациях параметров поглощения сейсмических волн в очаговых областях крупных сейсмических последовательностей. Одна из них выражается в увеличении поглощения (параметр  $V_p/V_s$  увеличивается,  $A_s/A_p$  уменьшается) со временем и наблюдается для Бусингольской, Чаруодинских и Тувинских землетрясений. Вторая, наоборот, указывает на уменьшение поглощения в ходе сейсмического процесса (отношение  $V_p/V_s$  уменьшается,  $A_s/A_p$  увеличивается) и отмечается для Южно-Байкальских и Кичерских землетрясений.

Из самых общих соображений о направленности процесса развития хрупких деформаций в очаговых областях сейсмических последовательностей следует вывод об увеличении раздробленности, неоднородности среды в результате реализации таких последовательностей независимо от геодинамической ситуации. Однако, полученные противоположные тенденции изменения параметров поглощения сейсмических волн свидетельствуют о более сложном характере процесса, происходящего в очаговой области, или о других факторах, обуславливающих изменения поглощения. Опираясь на выводы авторов работы [5], можно интерпретировать изменения поля поглощения как результат изменения содержания флюидов в очаговой области. Таким образом, уменьшения во времени поглощения связано с вытеснением флюида из области деформаций, и, наоборот, повышения поглощения связано с миграцией флюида из окружающего горного массива в очаговую область. Согласно нашим результатам, первая тенденция наблюдается для последовательностей, располагающихся в пределах Байкальской рифтовой системы с преобладающим растяжением земной коры по комплексу геолого-геофизических данных. То есть, флюиды концентрируются в области готовящегося очага при растяжении, а затем перераспределяются в более широкой области разрушения. Вторая тенденция отмечена для последовательностей, локализованных в областях с преобладанием условий сдвига и сжатия. Здесь флюид, выдавленный в процессе усиливающегося во времени сжатия перед началом сейсмической активизации, мигрирует в область сформировавшихся хрупких деформаций, существенно изменяя поглощающие свойства массива.

В работе использовались каталоги и бюллетени землетрясений, составленные Байкальским и Бурятским филиалами Геофизической Службы (официальный сайт Байкальского филиала Геофизической Службы: <http://seis-bykl.ru/>) и Красноярским научно-исследовательским институтом геологии и минерального сырья.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области, проект p\_сибирь\_a № 14-45-04157.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Еманов А.Ф. Сейсмические активизации в Белино-Бусингольской зоне / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, Е.В. Лескова // Физическая мезомеханика, 2012. № 13. Спец. выпуск. С. 72–77.
2. Добрынина А.А. Скорости и направления распространения разрывов в очагах землетрясений Байкальской рифтовой системы / А.А. Добрынина, В.А. Саньков // Геофизические исследования, 2010. Т. 11, № 2. С. 52–61.
3. Radziminovich N.A. Identification of earthquake aftershock and swarm sequences in the Baikal rift zone / N.A. Radziminovich, M.G. Ochkovskaya // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. Vol. 4, № 2. P. 169–186.
4. Еманов А. Ф. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г. с  $M=6.6$  и 26.02.2012 г. с  $M=6.7$  / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, Е.В. Лескова, А.В. Фатеев, В.Г. Подкорытова, Я.Б. Радзиминович, Н.А. Гилёва, О.К. Масальский, В.И. Лебедев // Землетрясения России в 2011 г. / Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 88–93.
5. Копничев Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли, 2003. № 7. С. 35–47.
6. Саньков В.А. Позднекайнозойское напряженное состояние в зонах активных разломов Западной Монголии и Тувы / В.А. Саньков, А.В. Парфеевец // Доклады Академии наук, 2005. Т. 403, № 6. С. 796–800.