



## SPECIFIC FEATURES OF FIELDS OF STRESSES ASSOCIATED WITH AFTERSHOCK PROCESSES IN THE ALTAI-SAYAN MOUNTAINOUS REGION

O.A. Kuchai

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
3 Prospect Koptuyuga, Novosibirsk, 630090, Russia*

**Abstract:** The cataclastic method developed by Yu.L. Rebetsky is applied to reconstruct the recent field of stresses related to aftershock sequences of earthquakes that occurred in the Altai-Sayan mountainous region, specifically the Altai earthquake of 27 September 2003 ( $M=7.3$ ;  $\varphi=50.061^\circ$ ;  $\lambda=87.966^\circ$ ) and the Busingol earthquake of 27 December 1991 ( $M=5.0$ ;  $\varphi=51.1^\circ$ ;  $\lambda=98.13^\circ$ ). Upon reconstruction of the field of stresses from data on aftershocks of different magnitudes, it is revealed that orientations of maximum stresses are misaligned, and this may suggest a lack of similarity of fields of stresses in different scale ranks. The fields of stresses reconstructed from data on sequences of weak aftershocks of the Altai and Busingol earthquakes show changes in orientations of major stress axes at opposite sides of the shear faults under study. The orientation of the maximum deviation stress axes due to strong aftershocks is consistent with the regional field of stresses and does not change in the vicinity of the fault plane associated with the strong earthquakes the Altai and Sayan regions.

**Key words:** stress, earthquake foci mechanism, aftershock.

**Recommended by** S.I. Sherman 15 February 2012.

**Citation:** Kuchai O.A. Specific features of fields of stresses associated with aftershock processes in the Altai-Sayan mountainous region // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. V. 3. № 1. P. 59–68. DOI:10.5800/GT-GT-2012-3-1-0062.

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ АФТЕРШОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ

O.A. Kuchai

*Институт нефтегазовой геологии и  
геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, Коптюга, 3, Россия*

**Аннотация:** Для реконструкции современного поля напряжений за счет афтершоковой последовательности Алтайского (27 сентября 2003 г.,  $M = 7.3$ ,  $\varphi=50.061^\circ$ ,  $\lambda=87.966^\circ$ ) и Бусийнгольского землетрясений (27 декабря 1991 г.  $M=6.5$ ,  $\varphi=51.1^\circ$ ,  $\lambda=98.13^\circ$ ), произошедших в Алтае-Саянской горной области, использовался катакластический

метод Ю.Л. Ребецкого [Rebetsky, 1997, 1999, 2003, 2007]. В результате восстановления поля напряжений, полученного за счет афтершоков разных магнитуд, проявилась несоосность в ориентации осей максимальных девиаторных напряжений, которая может свидетельствовать об отсутствии подобия поля напряжений разных масштабных уровней. Поля напряжений по слабым Алтайским и Бусийнгольским афтершоковым последовательностям обнаруживают свойство изменения ориентации осей главных напряжений по разные стороны сдвиговых разрывов. Ориентация осей максимального девиаторного напряжения за счет сильных повторных толчков, соответствующая региональному полю напряжений, не меняется вблизи области плоскости разрыва исследованных сильных землетрясений Алтая и Саян.

**Ключевые слова:** напряжения, механизм очага землетрясения, афтершок.

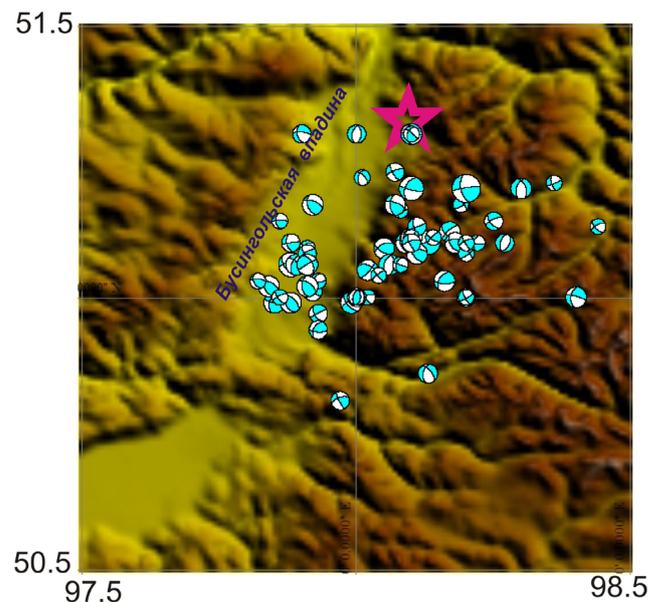
## 1. ВВЕДЕНИЕ

Иерархии полей напряжений разных структурных уровней было посвящено значительное количество статей [Osokina, 1987; Osokina, Fridman, 1987; Sherman, Dneprovsky, 1989; Nikolaev, 1992; Seminsky, 2001, 2005]. Но на натурном материале работ по анализу особенностей полей напряжений, выявляемых по афтершоковым процессам различных энергий [Rebetsky, 2001, 2007; Rebetsky, Marinin, 2005], немного. Ранее проводились работы по расчету только сейсмостектонических деформаций вследствие повторных толчков [Kuchai, 1982, 1986; Kuchai, Shklyar, 1990; Kuchai et al., 2002]. Новая методика позволила применить при обработке каталогов механизмов афтершоков Алтайского (27 сентября 2003 г. 11ч 33 мин,  $M = 7.3$ ,  $\varphi = 50.061^\circ$ ,  $\lambda = 87.966^\circ$ ) и Бусийнгольского (27 декабря 1991 г.,  $M = 6.5$ ,  $\varphi = 51.1^\circ$ ,  $\lambda = 98.13^\circ$ ) землетрясений (рис. 1, 2) метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА) [Rebetsky, 2007] для восстановления напряженно-деформированного состояния земной коры афтершоковой области. Решения механизмов афтершоков Бусийнгольского события получены достаточно давно, повторных толчков Алтайского землетрясения – недавно, их параметры использованы для определения сейсмостектонических деформаций афтершоковых процессов [Goldin, Kuchai, 2008]. Теперь появилась возможность восстановить поле напряжений по параметрам механизмов афтершоков этих событий.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

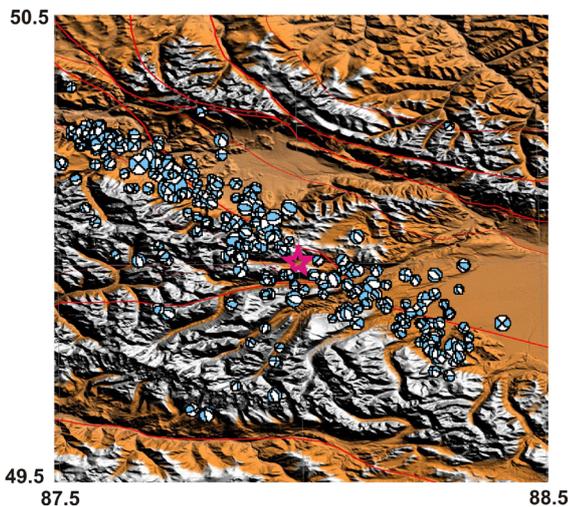
Для реконструкции современного поля напряжений за счет афтершоковых последовательностей Алтайского и Бусийнгольского землетрясений использовался программный комплекс МКА Ю.Л. Ребецкого [Rebetsky, 1997, 1999, 2003, 2007]. Алгоритм МКА многоэтапный, позволяет определять не только параметры эллипсоида напряжений и приращений сейсмостектонических деформаций (первый этап), но и величины напряжений (второй – четвертый этапы).

Для этого используются данные о механизмах очагов землетрясений, дополнительные материалы в виде обобщений экспериментов по разрушению горных пород, сведения о динамических параметрах очагов землетрясений и др. [Rebetsky, 2007]. В настоящей работе рассматриваются результаты работы алгоритма МКА первого этапа и анализируются особенности реконструкции ориентации главных осей напряжений, а также параметры, определяющие тип напряженного состояния (геодинамический режим), коэффициент Лоде-Надаи. Коэффициент Лоде-Надаи ( $\mu_0$ ), определяющий вид тензора напряжений или вид его эллипсоида, изменяется от  $-1$  до  $+1$ , тип напряженного состояния показывает взаимосвязь между направлением вектора на зенит и ориентацией главных осей напряжений.



**Рис. 1.** Диаграммы механизмов очагов афтершоков Бусийнгольского землетрясения. Звездочкой отмечен эпицентр главного события.

**Fig. 1.** Focal mechanisms of aftershocks of the Busingol earthquake. The star shows the epicenter of the major seismic event.



**Рис. 2.** Диаграммы механизмов очагов афтершоков Алтайского землетрясения. Звездочкой отмечен эпицентр главного события. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.htm>

**Fig. 2.** Focal mechanisms of aftershocks of the Altai earthquake. The star shows the epicenter of the major seismic event. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.htm>

В расчетах учитывались механизмы 43 афтершоков Бусийнгольского землетрясения (1991–1994 гг.) (рис. 1) и 225 афтершоков Алтайского землетрясения (2003–2007 гг.) (рис. 2), определенные по методике [Vvedenskaya, 1969; Yunga, 1979] с использованием регионального годографа, рассчитанного [Tsubulchik, 1967] для Алтае-Саянской области. Для эпицентральных расстояний более 800 км тип волны определяется по годографу Джеффриса-Буллена. Из-за отсутствия надежного определения глубин очагов в Алтае-Саянской горной области глубина афтершоков принималась равной 15 км. Все определения координат эпицентров выполнены в группе, руководимой А.Г. Филиной [Filina, 1999] и В.Г. Подкорытовой, и опубликованы в сборниках: «Землетрясения Северной Евразии» [Zemletryaseniya..., 2009] и «Землетрясения России» [Zemletryaseniya..., 2007].

Точность определения параметров механизмов очагов землетрясений зависит от многих факторов: от количества сейсмических станций, зарегистрировавших землетрясение, от расположения этих станций относительно очага, от точности интерпретации волны, выходящей в первое вступление. Надежно построены решения механизмов очагов землетрясений с  $M > 4.3$ , в определении которых использовались данные от 35 до 50 сейсмических станций. Менее надежно находятся решения очагов более слабых сейсмических событий ( $M < 4.3$ ), в определении которых участвует 10 – 30 знаков первых вступлений с записей сейсмических станций. Экспериментальными данными для определения механизмов очагов явились записи землетрясений на сейсмических станциях Алтае-Саянской сейсмологической экспедиции Байкальского филиала геофизической службы СО РАН, Казахской сейсмологической экспедиции Института сейсмологии НАН РК, а также материалы о знаках смещений продольных волн, публикуемые в «Сейсмо-

логических бюллетенях» Казахского национального центра сейсмологических данных. Для нахождения параметров механизмов очагов афтершоков Алтайского землетрясения дополнительно привлекались знаки первых вступлений на двух китайских станциях: Карамай и Веньцюань (за 2003 г.). Построены решения механизмов очагов в диапазоне магнитуд 3.2 – 6.6 для афтершоков Алтайского землетрясения и 3.3 – 5 для афтершоков Бусийнгольского землетрясения. При создании каталога для расчета по программе МКА предпочтение отдавалось параметрам механизмов очагов сильных афтершоков, полученных в Гарвардском центре [The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project]. Надо отметить, что, несмотря на большое число сейсмических станций, участвовавших в определении параметров механизмов каждого из очагов афтершоков Алтайского землетрясения, решения строились со средней степенью надежности. Большую роль в уточнении механизмов сыграли сейсмические станции Института сейсмологии НАН РК.

По типам смещений афтершоки Алтайского и Бусийнгольского землетрясений распределились следующим образом: сдвигов – 24 и 14 %, сбросов и сдвигосбросов – 37 и 28 %, надвигов и сдвиго-надвигов – 39 и 56 %. При расчете по программе МКА участвовало 11 афтершоков с  $M \geq 4.6$  и 214 афтершоков с  $M < 4.6$  главного Алтайского события; 18 афтершоков с  $M \geq 4.4$  и 25 афтершоков с  $M < 4.0$  Бусийнгольского землетрясения. В алгоритме МКА учитывается энергетическая характеристика землетрясения, поэтому использовалась зависимость [Riznichenko, 1985] между энергетическим классом и магнитудой. Энергетические классы землетрясений в Алтае-Саянской области определяются надежно, а магнитуды, определяемые по разным волнам, для каждого землетрясения различаются значительно (например, афтершок 1 октября 2003 г. в 2 ч 38 мин:  $M_c=4.2$ ,  $M_s=5.8$ ,  $M_{PS}=4.8$ ,  $M_b=4.6$ ; афтершок 29 сентября 2003 г. в 17 ч 5 мин:  $M_c=4.2$ ,  $M_s=3.3$ ,  $M_{PS}=4.8$ ,  $M_b=4.5$ ) [Zemletryaseniya..., 2009]. В работе использовались магнитуды по данным [Filina, 1999], энергетические классы Бусийнгольских повторных толчков пересчитывались в магнитуды по формулам [Riznichenko, 1985].

Доля определенных механизмов афтершоков Алтайского события с магнитудами 3.3 – 4.5 и общего количества повторных толчков с этими же магнитудами составляет 40 %, с  $M = 5.0 – 6.7 – 91$  %. Соотношение определенных механизмов афтершоков Бусийнгольского события 10 и 11-го энергетических классов ( $M = 3.3 – 4.3$ ) и общего количества повторных толчков такой же энергии равно 27 %, 12 и 13-го энергетических классов ( $M = 4.4 – 5.3$ ) – 67 %. Высокий процент определенных механизмов афтершоков позволяет говорить о достоверности при восстановлении поля напряжений по очагам сильных событий. Уменьшение процентного отношения определенных механизмов более слабых повторных толчков понижает надеж-

ность восстановленных полей напряжений.

Ниже приводятся данные по параметрам очагов наиболее сильных афтершоков, которые использовались в расчетах.

В работах по исследованию афтершоковых последовательностей важен масштаб осреднения, который зависит от уровня магнитуд землетрясений и от плотности распределения сейсмических событий. В нашем

случае обработка параметров механизмов очагов землетрясений с использованием программы МКА производилась в узлах сетки  $0.02 \times 0.02^\circ$  для слабых и умеренных повторных толчков и в узлах сетки  $0.04 \times 0.04^\circ$  и  $0.05 \times 0.05^\circ$  для сильных событий.

Алгоритм МКА имеет критерии формирования однородной выборки механизмов очагов землетрясений (афтершоков), по данным о которых и производится

**Параметры механизмов очагов сильных афтершоков Бусингольского землетрясения**  
**Focal mechanisms of strong aftershocks of the Busingol earthquake**

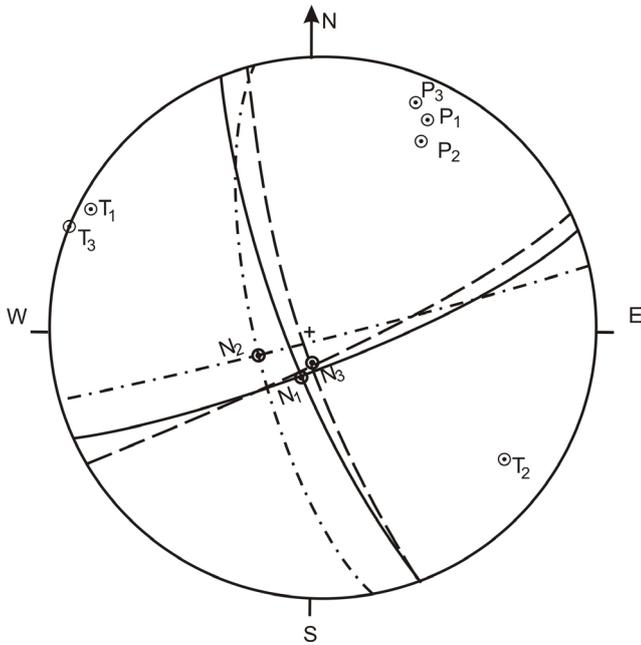
год	M	D	H	m	M	K	Fi	Ld	PN 1			PN 2		
									stk	dp	slip	stk	dp	slip
1991	12	27	17	24	4.4	12	51.12	98.17	125	53	-21	229	73	-140
1991	12	27	21	34	4.5	12	50.99	97.99	139	56	-24	244	70	-143
1991	12	28	8	3	5	13	51.06	97.88	135	44	141	256	65	54
1991	12	28	9	7	5	13	51.1	98.13	134	7	139	265	86	85
1991	12	28	9	55	4.4	12	51.06	97.89	205	50	155	313	71	44
1991	12	28	10	41	4.4	12	51.05	98.02	297	49	160	41	75	43
1992	1	2	0	5	4.4	12	51.1	98.09	158	44	139	281	63	55
1992	1	2	4	7	4.4	12	51.08	98.11	264	51	45	142	58	132
1992	1	2	5	28	4.4	12	51.11	98.1	157	45	119	300	52	65
1992	1	2	12	59	4.4	12	50.99	97.85	198	49	-178	107	89	-41
1992	1	4	2	52	4.4	12	51.09	98.05	242	52	50	116	54	130
1992	1	4	13	12	4.4	12	50.99	97.88	154	44	106	313	49	76
1992	1	4	16	4	4.4	12	51.02	97.84	155	48	121	294	51	61
1992	1	12	16	22	4.4	12	51.06	98.06	197	43	-80	4	49	-98
1992	1	15	17	49	4.4	12	51.1	98.18	146	46	134	273	59	55
1992	8	20	19	17	4.4	12	51.17	97.92	160	45	128	293	57	59
1992	10	15	8	30	4.4	12	51.02	97.91	172	43	129	306	59	61
1992	10	26	17	23	4.4	12	51.03	98.16	211	43	38	91	66	127

**Параметры механизмов очагов сильных афтершоков Алтайского землетрясения**  
**Focal mechanisms of strong aftershocks of the Altai earthquake**

год	M	D	H	m	M	K	Lon	Lat	stk	dp	slip	stk	dp	slip
2003	9	27	11	58	5	13.1	88.13	49.93	246	50	166	346	79	42
2003	9	27	13	3	4.7	12.6	88.14	49.95	253	43	-141	132	66	-54
2003	9	27	13	16	5.1	13.3	87.86	50.04	85	45	78	282	48	102
2003	9	27	18	52	6.4	16.6	87.71	50.19	117	67	157	217	69	25
2003	9	27	20	30	4.9	12.9	87.9	50.11	286	45	123	64	54	62
2003	10	1	1	3	6.6	16.4	87.73	50.15	221	68	6	129	85	158
2003	10	1	3	58	4.7	12.6	87.92	50.07	158	51	-167	59	81	-39
2003	10	13	5	26	5	13.1	87.57	50.26	57	69	10	323	81	159
2003	10	17	5	30	5.3	13.6	87.66	50.2	222	80	-6	313	84	-169
2003	10	23	0	25	5	13	88.31	49.82	170	74	-168	76	79	-16
2003	11	17	1	35	5.3	13.5	87.73	50.18	67	48	53	295	55	124

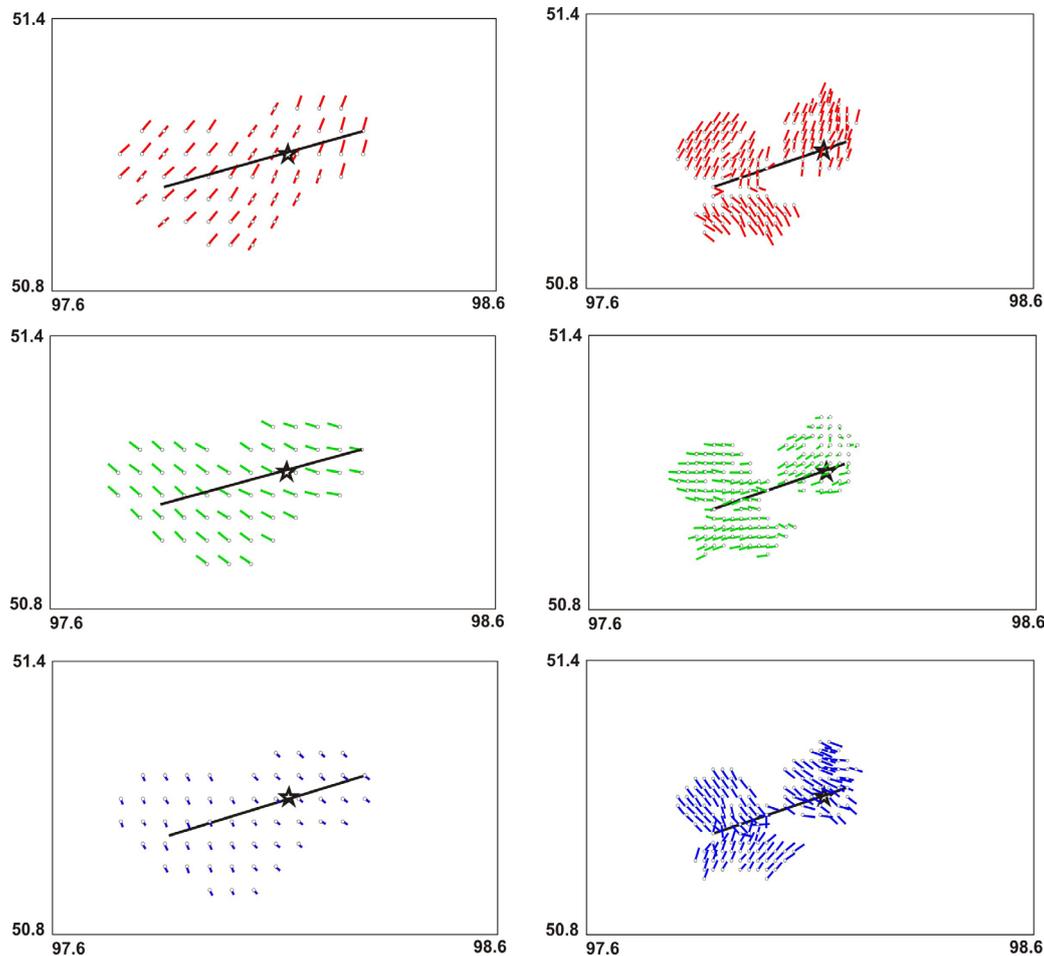
M – месяц, D – день, H – час, m – минуты, M – магнитуда, K – энергетический класс землетрясения, Fi и Ld – координаты афтершоков, stk – азимут нодальной плоскости, dp – угол падения плоскости, slip – угол скольжения подвижки в очаге.

M – month; D – day; H – hour; m – minute; M – magnitude; K – earthquake energy class; Ld and Fi – epicenter coordinates; stk – nodal plane azimuth; dp – angle of dip plane; slip – angle of slip motion in foci.



**Рис. 3.** Решения механизма очага Бусийнгольского землетрясения, построенные для верхней полусферы разными центрами обработки. Нодальные плоскости, показанные линией и осями механизма с индексом 1, определены в Гарвардском центре, штриховая линия с точкой и осями с индексом 2 – Геологической службой США, штриховой линией и осями с индексом 3 – получены автором.

**Fig. 3.** Focal mechanism of the Busingol earthquake (upper hemisphere). Nodal planes: 1 – according to Harvard University (solid line); 2 – according to the US Geological Survey (dotted line); 3 – according to the author (dotted line).



расчет параметров тензора напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций. Эти критерии являются следствием энергетических представлений теории пластичности и выражаются в виде набора неравенств [Rebetsky, 2007], ограничивающих связь между искомыми параметрами тензора напряжений (ориентация главных осей) и механизмами очагов в однородной среде. Сама однородная выборка характеризует квазиоднородную стадию деформирования локального участка земной коры – домена. В нашем случае число событий в однородной выборке было от 3 до 8. Результатом реконструкции первого этапа явились наборы карт напряженного состояния по повторным афтершоковым толчкам разных магнитудных диапазонов.

Остановимся на особенностях Бусийнгольского землетрясения и его афтершоках. Механизм очага главного события – сдвиговой (рис. 3). Простираение

**Рис. 4.** Проекция на горизонтальную плоскость осей максимального девиаторного напряжения, восстановленные по данным механизмов очагов афтершоков Бусийнгольского землетрясения по разным магнитудам;  $M \geq 4.4$ ,  $3.3 \leq M \leq 4.3$ . Красные линии – оси максимальных девиаторных напряжений сжатия, зеленые линии – оси максимальных девиаторных промежуточных напряжений, синие линии – оси максимальных девиаторных напряжений растяжения. Направление погружения осей. Точка в центре линии означает близгоризонтальное положение осей напряжения. Эти же точки являются центрами однородно деформирующихся доменов. Прямой длинной линией схематично показана плоскость разрыва. Звездочкой отмечен эпицентр главного события. Левый столбец рисунков получен по сильным афтершокам, правый – по слабым.

**Fig. 4.** Projections to the horizontal plane of axes of maximum deviator stress of compression, as reconstructed from focal mechanisms of aftershocks of the Busingol earthquake ( $M \geq 4.4$ ,  $3.3 \leq M \leq 4.3$ ). Red lines show axes of maximum deviator stress of compression; green lines show axes of maximum deviator transitional stress; blue lines show axes of maximum deviator stress of extension. Directions of axis plunge are shown. Points in lines' centres show near-horizontal positions of stress axes; the points are centres of domains of homogeneous deformation. The straight long line schematically shows the rupture plane. The star shows the epicenter of the main seismic event. Left column – strong aftershocks; right column – weak aftershocks.

плоскости разрыва в данном случае соответствует линии вытянутости афтершоков [Filina, 1999] и механизму очага землетрясения. Предполагаемая длина разрыва установлена по зависимости, полученной Ю.В. Ризниченко [Riznichenko, 1985].

Из рис. 4 следует, что ориентация осей максимальных девиаторных напряжений сжатия, полученная по наиболее сильным афтершокам Бусийнгольского землетрясения с  $M \geq 4.4$ , сохраняет северо-восточное-юго-западное направление практически по всей афтершоковой области, согласуется с ориентацией оси Р механизма очага самого Бусийнгольского землетрясения (см. рис. 1) и с региональным полем напряжений, полученным по землетрясениям, произошедшим в течение нескольких десятков лет в районе Белино-Бусийнгольской впадины и ее окружении [Rebetskii et al., 2009]. Поля промежуточных осей и осей растяжения характеризуются однонаправленным простиранием: в первом случае наблюдается падение осей к СЗ, во втором случае к ЮВ под средними углами к горизонту (рис. 4). Коэффициент Лодде-Надаи меняется в узком диапазоне значений от +0.2 до -0.2. Тип напряженного состояния соответствует сжатию для всей афтершоковой области (рис. 5).

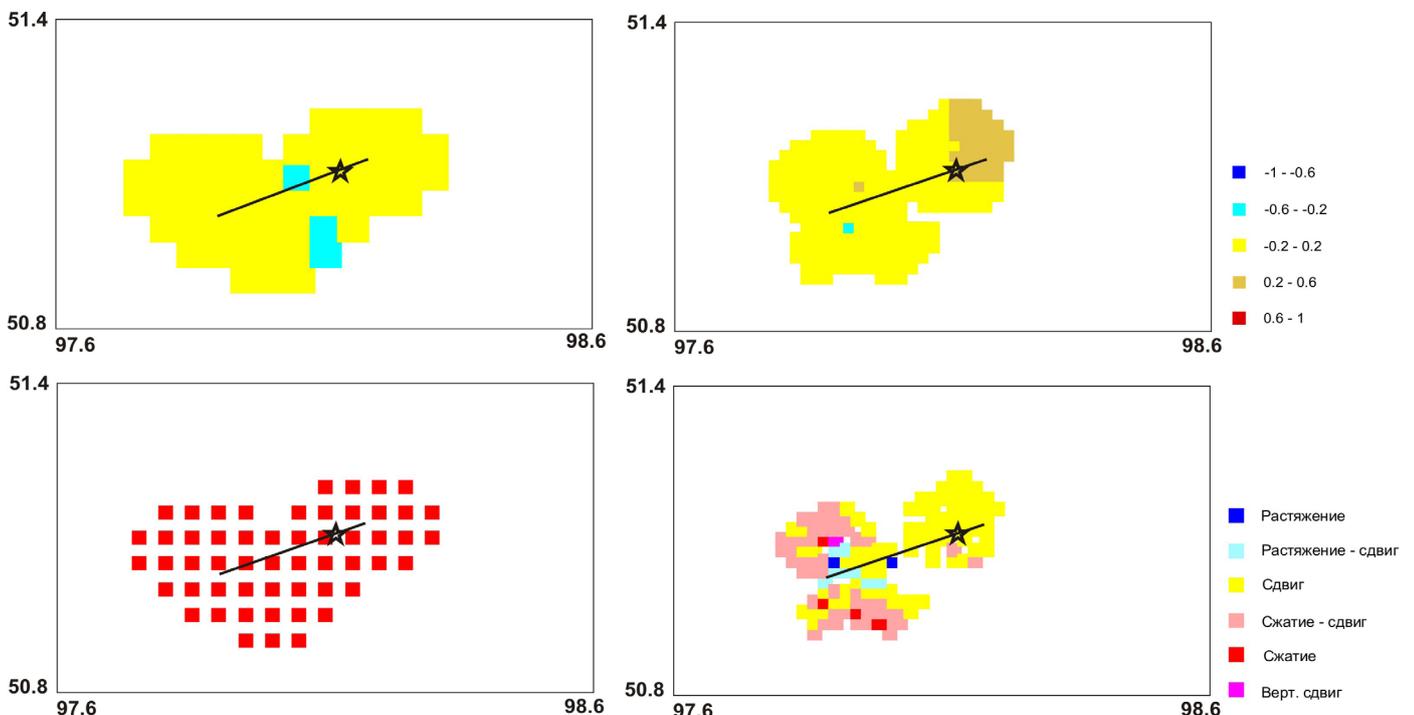
По афтершокам малых магнитуд ( $3.3 \leq M \leq 4.3$ ) выделяются блоки, в пределах которых ориентация осей главного сжатия имеет СВ направление с погружением к северо-востоку, а также СЗ направление с преимущественным погружением к юго-востоку (области южнее плоскости разрыва) (см. рис. 4). Оси  $\sigma_2$  преимущественно близширотные и на небольшой

территории в северной части области афтершоков – близвертикальные. Оси  $\sigma_1$  северо-западного простирания падают к ЮВ, юго-западного простирания к СВ. Значения коэффициента Лодде-Надаи показывают, что вид напряженного состояния соответствует сдвигу и сдвигу со сжатием (рис. 5). Локальное поле напряжений менее однородно (по повторным толчкам больших магнитуд) и имеет разную ориентацию осей максимальных девиаторных напряжений по обе стороны предполагаемого близвертикального разрыва (см. рис. 4).

Аналогичная картина, связанная с разделением афтершоковой области плоскостью разрыва на участки с разной ориентацией главных осей напряжений, выявлена и по результатам восстановления поля напряжений по афтершоковой последовательности Алтайского землетрясения.

Механизм очага Алтайского землетрясения, построенный для верхней полусферы разными центрами обработки, приведен на рисунке 6. Нодальная плоскость северо-западного простирания в двух вариантах круто падает к юго-западу и в одном к северо-востоку. Только плоскость, падающая к СВ, согласуется с положением эпицентра и соответствует плоскости разрыва, вышедшей на поверхность [Rogozhin et al., 2004].

Восстановленные оси максимальных девиаторных напряжений сжатия по механизмам афтершоков Алтайского землетрясения с  $M \geq 4.6$  имеют субмеридиональное близгоризонтальное простирание (рис. 7), характерное для напряжений сжатия на территории

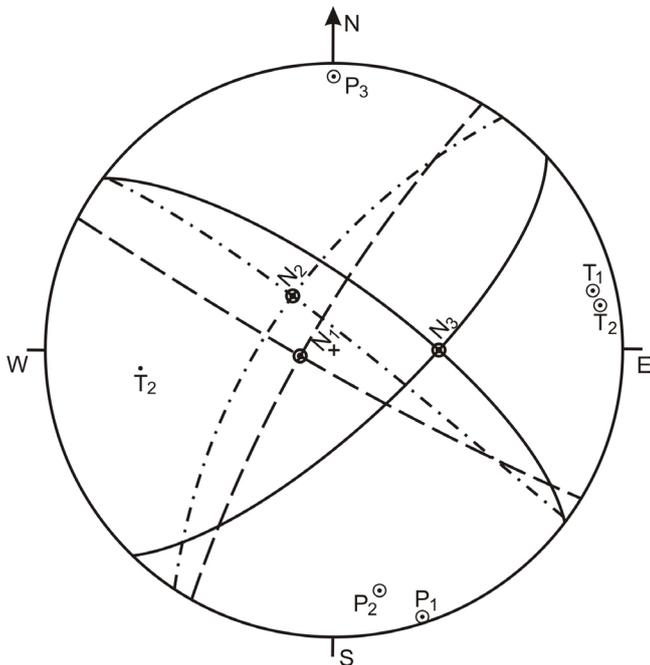


**Рис. 5.** Вид тензора напряжений – коэффициент Лодде-Надаи, полученный по афтершокам Бусийнгольского землетрясения:  $M \geq 4.4$  (слева),  $3.3 \leq M \leq 4.3$  (справа). Значения коэффициента Лодде-Надаи показаны справа наверху, типы напряженного состояния – справа внизу.

**Fig. 5.** Stress tensor – Lode-Nadai coefficient determined for aftershocks of the Busingol earthquake:  $M \geq 4.4$  (left),  $3.3 \leq M \leq 4.3$  (right). Values of Lode-Nadai coefficient are given at the top to the right, and types of the state of stresses are given at the bottom to the right.

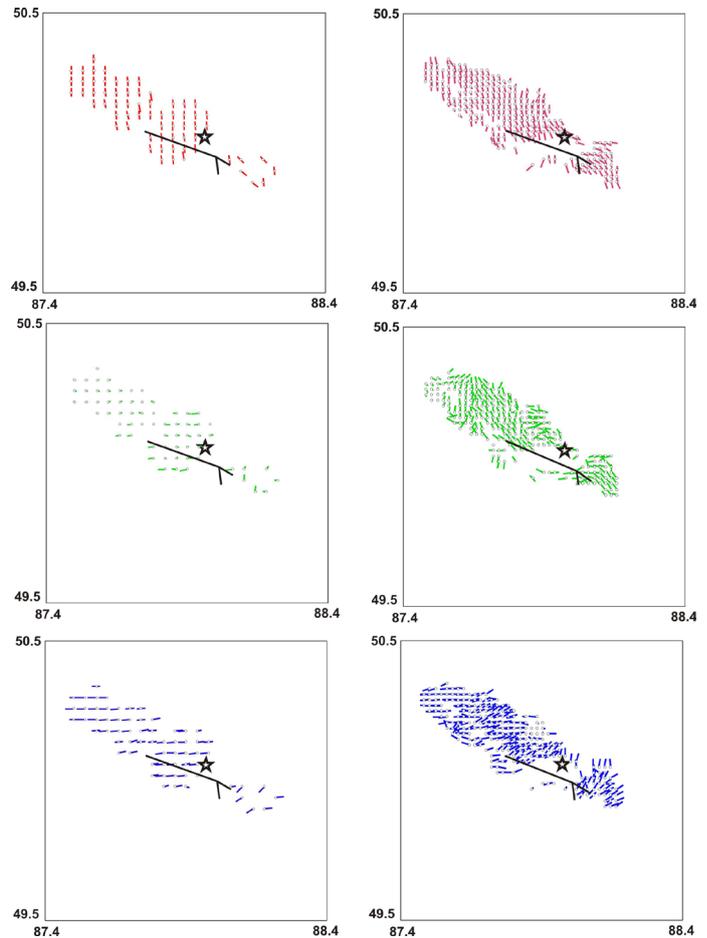
этого района [Rebetskii et al., 2009], и соответствуют азимуту оси сжатия сброшенного напряжения Р главного землетрясения (см. рис. 6.) К востоку от эпицентра на небольшой территории встречаются оси  $\sigma_3$  северо-западного простирания. Промежуточные оси – близвертикальны, на востоке оси имеют средние углы с вертикалью и погружение их достаточно хаотичное (рис. 7). Ориентация осей максимальных девиаторных напряжений растяжения субширотная с погружением к западу, на востоке от эпицентра главного толчка – к юго-западу. Преимущественные направления напряжений  $\sigma_1$  характеризуют региональное поле и согласуются с геотектонической обстановкой в регионе [Rebetskii et al., 2009]. Значения коэффициента  $\mu$  свидетельствуют о том, что вид тензора напряжений близок к сдвигу со сжатием на западе, далее на восток становится практически одноосным сжатием и восточнее эпицентра – чистым сдвигом (рис. 8). Тип напряженного состояния соответствует в основном сдвигу (рис. 8).

По механизмам энергетически более слабых событий ( $3.3 \leq M \leq 4.5$ ) восстановленное поле напряжений позволяет выделить объемы земной коры уже с дифференцированной ориентацией осей максимального сжатия. Западнее эпицентра главного события оси напряжений  $\sigma_3$  имеют субмеридиональное и северо-западное простирание, при этом в восточной части – субширотное. При преимущественном погружении



**Рис. 6.** Решения механизма очага Алтайского землетрясения, построенные для верхней полусферы разными центрами обработки. Нодальные плоскости, показанные линией и осями механизма очага с индексом один, определены в Гарвардском центре, штриховая линия с точкой и осями с индексом 2 – Геологической службой США, штриховой линией и осями с индексом 3 – Геологической службой РАН (г. Обнинск).

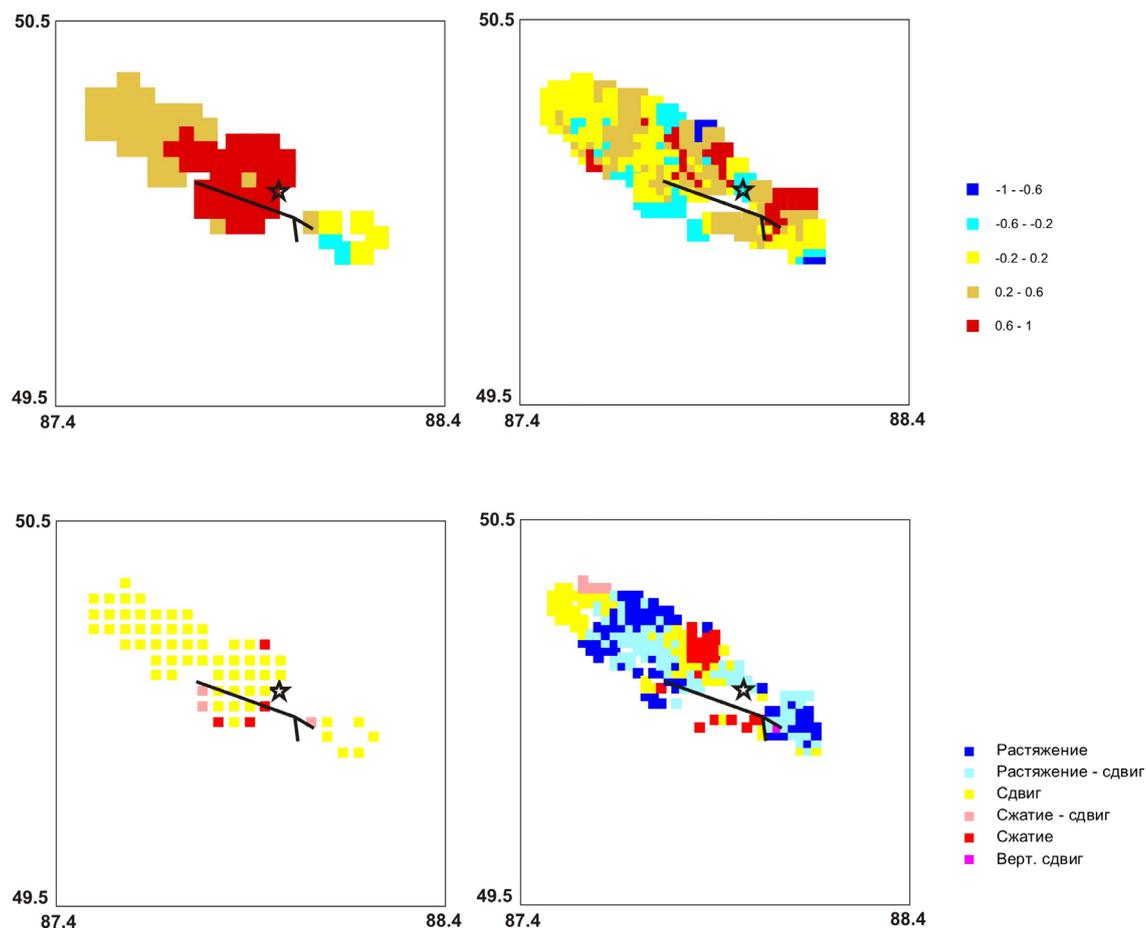
**Fig. 6.** Determinations of the mechanism of the Altai earthquake foci (upper hemisphere). 1 – data from Harvard University; 2 – the US Geological Survey; 3 – RAS Geological Survey in Obninsk, Russia.



**Рис. 7.** Проекции на горизонтальную плоскость осей максимального девиаторного напряжения, восстановленные по данным механизмов очагов афтершоков Алтайского землетрясения по разным магнитудам:  $M \geq 4.6$  (левый столбец рисунков),  $3.3 \leq M \leq 4.5$  (правый столбец рисунков). Прямой длинной линией схематично показана плоскость разрыва. Обозначения те же, что и на рис. 4.

**Fig. 7.** Projections to the horizontal plane of axes of maximum deviator stress of compression, as reconstructed from focal mechanisms of aftershocks of the Altai earthquakes ( $M \geq 4.6$  in the left column;  $3.3 \leq M \leq 4.5$  in the right column). The straight long line schematically shows the rupture plane. See the legend in Figure 4.

осей к югу и юго-востоку отмечается и погружение их к северу, а на восточной окраине к востоку (см. рис.7.) Обратившись к осям максимального растяжения, можно наблюдать их субширотное и северо-восточное направление. Коэффициент  $\mu$  меняется от  $-0.9$  до  $+0.9$  (рис. 8). Встречаются все типы напряженного состояния за исключением вертикального сдвига. Области типа растяжения и растяжения со сдвигом располагаются в юго-восточной части и значительно северо-западнее эпицентра, сжатия и сдвига – ближе к эпицентру основного землетрясения (рис. 8). Полученное в этом случае локальное поле напряжений стало более мозаичным и менее однородным. Южнее плоскости разрыва падение осей  $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$  отличается от падения их севернее разрыва (см. рис. 7). Положение предполагаемой плоскости разрыва в поле локальных напряжений (см. рис. 7) ( $3.3 \leq M \leq 4.4$ ) отделяет области с разной ориентацией осей главных напряжений. Такая



**Рис. 8.** Вид тензора напряжений – коэффициент Лодэ-Надаи, полученный по афтершокам Алтайского землетрясения:  $M \geq 4.6$  (слева),  $3.3 \leq M \leq 4.5$  (справа). Обозначения те же, что и на рис. 5.

**Fig. 8.** Stress tensor – Lode-Nadai coefficient determined for aftershocks of the Altai earthquake:  $M \geq 4.6$  (left),  $3.3 \leq M \leq 4.5$  (right). See the legend in Figure 5.

картина не наблюдается, если поле напряжений получено по механизмам сильнейших афтершоков (см. рис. 7). Заметим, что некоторые изменения в ориентации происходят в крыльях раздвоенного восточного окончания разрыва.

### 3. ВЫВОДЫ

Таким образом, однородность поля напряжений, в случае Бусийнгольских повторных толчков, проявляется с участием механизмов афтершоков меньших магнитуд ( $5.0 > M \geq 4.4$ ) (см. рис. 4), чем в очаговой области Алтайского землетрясения ( $6.7 > M \geq 4.6$ ) (см. рис. 7). Полученная ориентация осей максимального девиаторного сжатия и растяжения по очагам афтершоков демонстрирует меньшую упорядоченность по мере уменьшения магнитуд сейсмических событий. По-видимому, на формирование очагов более слабых событий оказывают влияние более мелкие неоднородности земной коры [Kuchai, Rebetsky, 2011; Kuchai, 2011]. Этот результат был подтвержден последующими работами [Leskova, Emanov, 2011; Omar et al., 2011]. Несоосность в ориентации главных осей напряжений,

полученных за счет механизмов афтершоков разных магнитуд, может свидетельствовать об отсутствии подобия поля напряжений разных масштабных уровней.

Из работ Д.Н. Осокиной [Osokina, 1987] известно, что появление разрыва приводит к перестройке поля напряжений, из-за чего вторичные нарушения, т.е. афтершоки, могут иметь механизмы, отличные от главного события. Поля напряжений по слабым Алтайским и Бусийнгольским афтершоковым последовательностям обнаруживают свойство изменения ориентации осей главных напряжений по разные стороны сдвиговых разрывов. Ориентация осей максимального девиаторного напряжения за счет сильных повторных толчков, соответствующая региональному полю напряжений, не меняется вблизи плоскости разрыва исследованных сильных землетрясений Алтая и Саян.

Выражаю искреннюю благодарность Ю.Л. Ребечкову за предоставленную программу восстановления напряженно-деформированного состояния по механизмам очагов землетрясений.

Работа была выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 10-05-01042) и Программы 4 Президиума РАН (проект № 4-1).

## 4. ЛИТЕРАТУРА

- Filina A.G.* Zemletryaseniya Altaya i Sayan [Altai and Sayan earthquakes] // Zemletryaseniya Severnoj Evrazii v 1993 g. M.: NIA-Priroda, 1999. S. 65–68 (in Russian).
- Goł'din S.V., Kuchai O.A.* Sejsmotektonicheskie deformacii v okrestnosti sil'nyh zemletryasenij Altaya [Seismotectonic deformations in the vicinity of strong earthquakes in Altai] // Fizicheskaya mezomehanika. 2008. T. 11, № 1. S. 5–13 (in Russian).
- Kuchai O.A.* Prostranstvennye zakonomernosti aftershokovogo deformirovaniya ochagovoj oblasti sil'nogo zemletryaseniya [Spatial regularities of aftershock deformation in focal areas of strong earthquakes] // Fizika Zemli. 1982. № 10. S. 62–67 (in Russian).
- Kuchai O.A.* Prostranstvenno-vremennye osobennosti aftershokovogo deformirovaniya ochagovoj oblasti Markansuijskogo zemletryaseniya [Space-and-time specific features of aftershock deformation of the focal area of the Markansui earthquake] // Fizika Zemli. 1986. № 8. S. 24–31 (in Russian).
- Kuchai O.A.* Rezul'taty vosstanovleniya polya napryazhenij zemletryasenij Altaya i Sayan [Results of stress field reconstruction for Altai and Sayan earthquakes] // Materialy konferencii, posvyaschennye 75-letiyu so dnya rozhdeniya akademika RAN S.V. Goł'dina. Novosibirsk, 2011. S. 43–44 (in Russian).
- Kuchai O.A., Muraliev A.M., Abdrahmatov K.E., Delvaux D., Duchkov A.D.* The 1992 Suisamyr earthquake and the aftershock strain field // Geologiya i geofizika (Russian geology and geophysics). 2002. T. 43, № 11. P. 1038–1048.
- Kuchai O.A., Rebetsky Yu.L.* Pole napryazhenij Altae-Sayanskoj oblasti i aftershokovyh posledovatel'nostej Altajskogo i Busingol'skogo zemletryasenij [The stress field of the Altai-Sayan region and aftershock sequences of Altai and Busingol earthquakes] // Materialy XVII Vserossijskoj konferencii «Problemy sejsmotektoniki» / Pod red. A.O. Gliko, E.A. Rogozhina, Yu.K. Schukina, L.I. Nadezhka. M., 2011. S. 292–296 (in Russian).
- Kuchai O.A., Shklyar G.P.* Sejsmicheskoe deformirovanie ochagovyh oblastej sil'nyh zemletryasenij Pamira [Seismic deformation of focal areas of strong earthquakes in Pamir] // Fizika Zemli. 1990. № 12. S. 68–76 (in Russian).
- Leskova E.V., Emanov A.A.* Napryazhenno-deformirovanoe sostoyanie Chujsko-Kurajskoj zony (Gornyj Altaj) [Stress-and-strain state of Chuisko-Kurai zone (Altai Mountains)] // Sovremennaya tektonika. Metody i rezul'taty: Materialy vtoroj molodezhnoj shkoly-seminara. M.: IFZ, 2011. T. 1. S. 154–160 (in Russian).
- Nikolaev P.N.* Metodika tektonodinamicheskogo analiza [The Method of Tectonophysical Analysis]. M.: Nedra, 1992. 294 s. (in Russian).
- Omar H.M., Rebetsky Yu.L., Aref'ev S.S.* Mehanizmy aftershokov Altajskogo zemletryaseniya 2003 g. i napryazhennoe sostoyanie ego v ochagovoj oblasti dlya perioda 2004–2005 gg. [The mechanism of aftershocks of 2003 Altai earthquake and the state of stresses in its focal area for the period from 2004 to 2005] // Sovremennaya tektonika. Metody i rezul'taty: Materialy vtoroj molodezhnoj shkoly-seminara. M.: IFZ, 2011. T. 1. S. 207–214 (in Russian).
- Osokina D.N.* Ob ierarhicheskikh svojstvakh tektonicheskogo polya napryazhenij [On hierarchic properties of the tectonic stress field] // Polya napryazhenij i deformacij v zemnoj kore. M.: Nauka, 1987. S. 136–151 (in Russian).
- Osokina D.N., Fridman V.N.* Issledovanie zakonomernostej stroeniya polya napryazhenij v okrestnostyah sdvigovogo razryva s treniem mezhdru beregami [The study of regularities of stress field structures in the vicinity of share faults with friction between fault walls] // Polya napryazhenij i deformacij v zemnoj kore. M.: Nauka, 1987. S. 74–119 (in Russian).
- Rebetsky Yu.L.* Reconstruction of tectonic stresses and seismotectonic strains: methodical fundamentals, current stress field of Southeastern Asia and Oceania // Doklady Earth Sciences. 1997. V. 354, № 4. P. 560–563.
- Rebetsky Yu.L.* Methods for reconstructing tectonic stresses and seismotectonic deformations based on the modern theory of plasticity // Doklady Earth Sciences. 1999. V. 365A, № 3. P. 370–373.
- Rebetskii Yu.L., Aref'ev S.S., Nikitina E.S.* Monitoring of Stressed State in the Aftershock Region of the Spitak Earthquake // Doklady Earth Sciences. 2000. V. 375, № 8. P. 1329–1334.
- Rebetskii Yu.L.* Development of the Method of Cataclastic Analysis of Shear Fractures for Tectonic Stress Estimation // Doklady Earth Sciences. 2003. V. 388, № 1. P. 72–76.
- Rebetsky Yu.L.* Tektonicheskie napryazheniya i prochnost' prirodnyh massivov [Tectonic stresses and natural rock strength]. M.: IKC «Akademkniga», 2007. 406 s. (in Russian).
- Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva N.A.* Metod kataklasticheskogo analiza razryvnyh narushenij i rezul'taty raschetov sovremennogo napryazhennogo sostoyaniya v kore vblizi granic plit i dlya vnutriplitnyh gorno-skladchatyh orogenov [The method of cataclastic analysis of fractures and results of estimations of the recent state of stresses in the crust near plate boundaries and estimations for intra-plate mountainous-folded orogens] // Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle. M.: IFZ, 2009. S. 392–400 (in Russian).
- Rebetsky Yu.L., Marinin A.V.* Rekonstrukciya napryazhennogo sostoyaniya do i posle Sumatranskogo zemletryaseniya 26.12.2004 [The reconstruction of tectonic stresses before and after 26.12.2004 Sumatra earthquake] // Aktivnyj geo-

- fizicheskij monitoring litosfery Zemli: Materialy 2-go mezhdunarodnogo simpoziuma 2005 g. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2005. S. 407–411 (in Russian).
- Riznichenko Yu.V. Problemy sejsmologii [Problems of Seismology]. M.: Nauka, 1985. 408 s. (in Russian).
- Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marahanov A.V. et al. Tektonicheskaya pozitsiya i geologicheskie proyavleniya Altajskogo zemletryaseniya 2003 g. [The tectonic position and geological manifestation of 2003 Altai earthquake] // Sil'noe zemletryasenie na Altae 27 sentyabrya 2003 g. M.: IFZ RAN, 2004. 112 s. (in Russian).
- Seminsky K.Zh. Tektonofizicheskie zakonomernosti destruktii litosfery na primere Gimalajskoj zony szhatiya [Tectonophysical regularities of the lithosphere destruction as exemplified by the Himalaya compression zone] // Tihookeanskaya geologiya. 2001. T. 20, № 6. S. 17–30 (in Russian).
- Seminsky K.Zh. Kartirovanie razlomno-blokovoj struktury zemnoj kory na sovremennom `etape razvitiya tektonofiziki szhatiya [Mapping of the fault-block structure of the Earth's crust at the recent stage of development of tectonophysics] // Geofizicheskij zhurnal. 2005. T. 27, № 1. S. 85–96 (in Russian).
- Sherman S.I., Dneprovskiy Yu.I. Polya napryazhenij zemnoj kory i geologo-strukturnye metody ih izucheniya [Fields of stresses of the Earth's crust and geological and structural methods of studies]. Novosibirsk: Nauka, 1989. 157 s. (in Russian).
- The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project. Available from <http://www.globalcmt.org> (last accessed February 20, 2012).
- Tsibul'chik G.M. O godografah sejsmicheskikh voln i stroenii zemnoj kory Altae-Sayanskoj oblasti [On hodographs of seismic waves and the structure of the Earth's crust in the Altai-Sayan region] // Regional'nye geofizicheskie issledovaniya v Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1967. S. 159–169 (in Russian).
- Vvedenskaya A.V. Issledovanie napryazhenij i razryvov v ochagah zemletryasenij pri pomoschi teorii dislokacij [The study of stresses and fractures in earthquake foci with application of the theory of dislocations]. M.: Nauka, 1969. 136 s. (in Russian).
- Yunga S.L. O mehanizme deformirovaniya sejsmoaktivnogo ob`ema zemnoj kory [On the mechanism of deformation of the seismically active volume of the Earth's crust] // Izv. AN SSSR. Fizika Zemli. 1979. № 10. S. 14–23 (in Russian).
- Zemletryaseniya Rossii v 2005 g. (v 2006 g.), (v 2007 g.) [Earthquakes in Russia in 2005 (2006), (2007)]. Obninsk: GS RAN, 2007. 180 s. (2009 g., 216 s.), (2009 g., 220 s.) (in Russian).
- Zemletryaseniya Severnoj Evrazii v 2003 g. (v 2004 g.) [Earthquakes in North Eurasia in 2003 (2004)]. Obninsk: GS RAN, 2009. 434 s. (2010 g., 446 s.) (in Russian).

## Сведения об авторах / Author information:

**Кучай Ольга Анатольевна**

канд. физ.-мат. наук, с.н.с.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Россия

Тел. (383)3333792

e-mail: [KuchayOA@ipgg.nsc.ru](mailto:KuchayOA@ipgg.nsc.ru)**Kuchay, Olga A.**

Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS

3 Prospect Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russia

Tel. (383)3333792

e-mail: [KuchayOA@ipgg.nsc.ru](mailto:KuchayOA@ipgg.nsc.ru)