

**КАЧКАНАРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 29 марта 2010 г.****с  $K_p=12.1$ ,  $M_w=4.4$ ,  $I_0=5$  (Средний Урал)****Р.А. Дягилев<sup>1</sup>, Ф.Г. Верхоланцев<sup>2</sup>, И.В. Голубева<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ГИ УрО РАН, г. Пермь, [dr@mi-perm.ru](mailto:dr@mi-perm.ru)<sup>2</sup>ГС РАН, г. Обнинск, [sombra@mail.ru](mailto:sombra@mail.ru), [golubeva@mi-perm.ru](mailto:golubeva@mi-perm.ru)

30 марта 2010 г. в 03<sup>h</sup>02<sup>m</sup> местного времени (29 марта в 21<sup>h</sup>02<sup>m</sup> по Гринвичу) в 25 км к северо-западу от г. Качканар, на границе между Свердловской областью и Пермским краем, произошло землетрясение с магнитудой  $M_L=3.9$ . Событие с интенсивностью в эпицентре до  $I_0=5$  баллов ощущалось в нескольких ближайших населенных пунктах в радиусе 40–50 км. Через 10 дней после землетрясения в данном районе имело место еще одно слабое сейсмическое событие с  $M_L=2$ , которое в силу своей пространственно-временной близости к Качканарскому землетрясению было признано его единственным афтершоком.

Качканарское землетрясение вызвало широкий общественный резонанс. Относительно сильные землетрясения на Урале происходят довольно редко, особенно редки события с обширными макросейсмическими проявлениями. На территории, охваченной сейсмическими сотрясениями, имеется несколько горнодобывающих предприятий, которые потенциально могли быть причастны к возникновению техногенной сейсмичности в районе очага. Однако анализ данных региональной сейсмической сети, развиваемой на Западном Урале в течение предшествующих 10 лет [1–5], позволил установить природный характер землетрясения. В настоящее время Качканарское событие стало одним из наиболее изученных землетрясений на Урале.

**Оценка местоположения и времени в очаге.** Параметры главного события и его афтершока, рассчитанные по записям региональной сейсмологической сети, приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры Качканарского землетрясения и его афтершока

№	Дата	$t_0$ , ч мин с	Гипоцентр					$M_L$	Станции
			$\varphi^\circ$ , N	$\delta\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$ , E	$\delta\lambda^\circ$	$h$ , км		
Качканарское землетрясение									
1	29.03	21 02 17.93	58.85	0.06	59.17	0.06	10	3.9	PR0R, PR1R, PR2R, PR3R, PR4R, PR6R, SOKR, SVUR, ARU, SVE, ORR, IZH
		21 02 18.36	58.86	0.07	59.16	0.08	21f		
Афтершок									
2	08.04	17 59 04.36	59.08	0.09	59.13	0.11	10f	2.0	PR0R, PR1R, PR2R, SVUR, ARU
		17 59 05.21	59.09	0.09	59.14	0.11	21f		

Примечание. Коды и названия станций: PR0R – «Вернечусовские Городки», PR1R – «Романово», PR2R – «Добрянка», PR3R – «Кунгур», PR4R – «Власы», PR6R – «Екимята», SOKR – «Соликамск», SVUR – «Североуральск», ARU – «Арти», SVE – «Свердловск», ORR – «Оренбург», IZH – «Ижица».

Здесь даны по два варианта решения для каждого события. Главное событие было зарегистрировано двенадцатью региональными станциями (табл. 1). Для него первый вариант решения дает местоположение очага, в котором невязки времен вступления множества видимых сейсмических фаз минимальны. Сейсмические станции, зафиксировавшие событие, обеспечивают неплохое окружение эпицентра (рис. 1), особенно в западной части. На ближайших станциях с  $\Delta=138$ –143 км хорошо видны вступления только прямых объемных волн. Для остальных станций, удаленных от очага более чем на 160 км, хорошо прослеживаются вступления фаз  $P_n$ ,  $P_b$ ,  $P_g$ ,  $S_n$ ,  $S_g$ . При локации использовался годограф IASPEI 1991 [6], однако заложенная в него трехслойная скоростная модель земной коры не смогла обеспечить пространственной привязки очага лучше, чем представлена в табл. 1. Имеющиеся данные о строении земной коры на Урале

[7, 8], свидетельствуют о наличии существенных отклонений усредненной модели IASPEI 1991 от действительности. Так, например, наблюдаемые вариации глубины границы Мохо на участках распространения волн от очага до станций достигают 30–40 % (рис. 1). Таким образом, в дальнейшем с введением в обиход трехмерной скоростной модели Урала местоположение эпицентра может быть несколько уточнено. Наличие глубинных фаз  $pP$  и  $sP$  на некоторых станциях позволило оценить глубину очага  $h=21\pm 4$  км. Поэтому второй вариант локации в табл. 1, полученный для такой фиксированной глубины, следует считать наиболее предпочтительным.

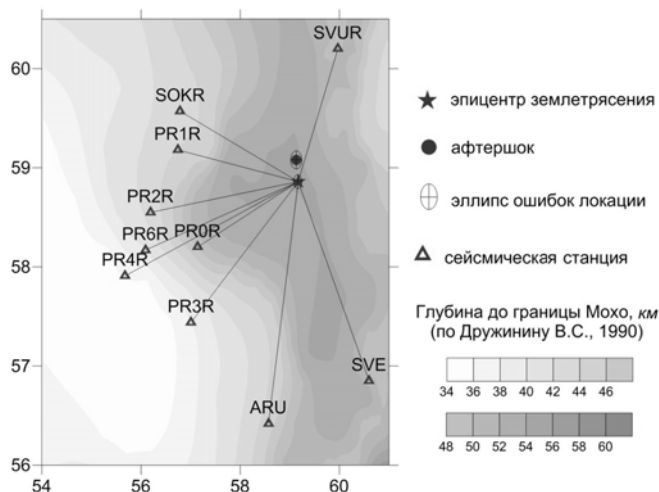


Рис. 1. Взаимное расположение эпицентра Качканарского землетрясения и ближайших станций

Второе землетрясение, отличающееся меньшей магнитудой ( $M_L=2$ ), произошло 8 апреля в 17<sup>h</sup>59<sup>m</sup> в 26 км к северу от эпицентра Качканарского землетрясения. Оно зарегистрировано только ближайшими и самыми тихими станциями. На карте представительности  $M_{\min}$  [9], характеризующей данный район, эпицентр лежит недалеко от изолинии  $M_{\min}=2.0$ , но все же вне ее. В течение нескольких дней после главного события поблизости никаких других сейсмических явлений, за исключением технологических взрывов на горнодобывающих предприятиях, зафиксировано не было. Поскольку дополнительная сеть временных станций в районе эпицентра не разворачивалась, трудно судить о том, действительно ли имел место

афтершоковый процесс из событий с  $M_L < 2.0$ . Тем не менее, это единственное последующее землетрясение можно считать афтершоком Качканарского землетрясения в силу его пространственно-временной близости к главному очагу.

Для второго толчка расчет местоположения сделан для двух фиксированных глубин: первый – для средней глубины землетрясений в регионе  $h_{cp}=10$  км, второй – для глубины главного очага  $h=21$  км. За счет сравнительно низкого качества записи (нечеткие вступления, меньшее число станций) пространственная привязка эпицентра получилась немного хуже: погрешность  $\delta = \pm 10$  км.

Данные о параметрах основного очага, определенные другими агентствами, представлены в табл. 2. Их распределение в плане показано на рис. 2.

Таблица 2. Разные решения параметров Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г. с  $M_w=4.4$

Агентство	$t_0$ , ч мин с	$\delta t_0$ , с	Гипоцентр					Магнитуда	Источник
			$\varphi^\circ$ , N	$\delta\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$ , E	$\delta\lambda^\circ$	$h$ , км		
PERM	21 02 18.36		58.86	0.07	59.16	0.08	21	$M_L=3.9$ , $M_w=4.4$ , $K_p=12.1$	[10]
OBN	21 02 11	0.48	58.92		59.07		5	$m_b=4.3$	[11]
	21 02 15.74		58.87		59.21		10f	$m_b=4.2$	
MOS	21 02 15.2	2.2	58.856	0.07	59.287	0.07	20	$MPSP=4.2/5$	[12]
CSEM	21 02 15.40	0.23	58.90	0.08	59.31	0.08	10f	$m_b=4.2$	[13]
IDC	21 02 15.28	0.57	58.87	0.10	59.19	0.10	–	$m_b=3.6/12$ , $M_L=3.9/10$ , $M_s=2.6/3$	[13]
ISC	21 02 15.63	1.41	58.77	0.07	59.17	0.05	7.5	$m_b=3.8/12$	[13]
NEIC	21 02 15.74	0.48	58.87	0.11	59.21	0.07	10f	$m_b=3.6/7$	[13]
NNC	21 02 23.33	1.78	58.34	0.15	59.95	0.08	16.1	$m_b=4.0$ , $m_{pv}=4.1$ , $K_p=10.1$	[14]
NORSAR	21 02 20.034		58.68		58.91		33	$m_b=3.7$	[15]
USC	16 02 19 (время ошибочно)		58.84		59.21		9	$M=3.3$	[16]

Примечание. USC – ГОУ НПП «Уралсейсмоцентр», г. Екатеринбург, Россия; расшифровка кодов других агентств дана в «Обозначениях» к наст. сб.



Рис. 2. Решения эпицентра Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г. с  $M_w=4.4$  по данным разных агентств

1, 2 – инструментальный эпицентр по региональным и другим данным соответственно; 3 – населенный пункт; 4 – граница Пермского края и Свердловской области; 5 – реки и водохранилища.

**Магнитуда, энергетический класс, сейсмический момент и фокальный механизм.** С использованием региональных особенностей затухания сейсмических волн [1] определена локальная магнитуда  $M_L=3.9$ . По данным станций PR0R, PR1R, PR2R, PR3R, PR4R, ARU и SVE определены величины скалярного сейсмического момента и энергетического класса (табл. 3). Среднее значение  $M_0$ , определенное по спектрам продольных волн, составило  $7 \cdot 10^{15}$  Н·м; средний радиус очага  $r$ , полученный согласно модели Брюна из угловой частоты, равен 796 м; среднее значение моментной магнитуды  $M_w$  равно 4.4.

Таблица 3. Определение сейсмического момента Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г.

Станция	$M_0$ , Н·м	$r$ , м	$M_w$	$K_p$
PR0R	$1.40 \cdot 10^{16}$	554	4.7	13.2
PR1R	$1.37 \cdot 10^{15}$	547	4.3	11.2
PR2R	$1.80 \cdot 10^{15}$	1027	4.1	11.6
PR3R	$1.11 \cdot 10^{16}$	912	4.7	12.8
PR4R	$1.18 \cdot 10^{16}$	777	4.4	13.5
ARU	$4.73 \cdot 10^{15}$	879	4.4	12.0
SVE	$4.27 \cdot 10^{15}$	875	4.5	12.2
SVUR	–	–	–	10.4
Среднее	$7.02 \cdot 10^{15}$	796	4.4	12.1

Решение механизма очага землетрясения получено по знакам первых вступлений продольных волн на 9 ближайших станциях (табл. 4). На некоторых станциях различимы знаки вступлений для разных типов продольных волн, в результате чего из 15 выделенных вступлений выявлено, что 8 были сформированы волной сжатия (знак «+») и 7 – волной растяжения (знак «-»). На рис. 3 механизм показан в графическом виде в стереографической проекции (нижняя полусфера).

Таблица 4. Параметры механизма очага землетрясения 29 марта 2010 г. в  $21^{\text{h}}02^{\text{m}}$  с  $M_w=4.4$

Агентство	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	$h$ , км	Магнитуда		$K_p$	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
				$M_w$	$M_L$		T		N		P		NP1			NP2		
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
PERM	29.03	21 02 18	21	4.4	3.9	12.1	38	303	46	89	17	199	75	77	42	335	50	164

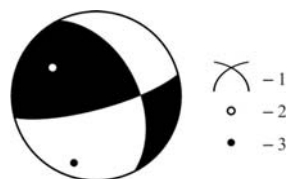


Рис. 3. Стереодиаграмма механизма очага Качканарского землетрясения  
1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно; зачернена область волн сжатия.

Рассматривая пространственную ориентацию нодальных плоскостей, следует обратить внимание на второй вариант решения, который в свете имеющихся представлений о геологическом строении Урала представляется наиболее правдоподобным. Запад–северо-западное

( $STK=335^\circ$ ) простирание  $NP2$  с точностью до первых градусов совпадает с простиранием Главного Уральского разлома. Практически идентичны с ним направление и угол падения нодальной плоскости. С этим же направлением согласуются азимут простирания области самых больших глубин границы Мохо (рис. 1) и линия, соединяющая эпицентры главного события с его афтершоком. Определенное сходство в пространственной ориентации наблюдается также в очертаниях макросейсмического поля (будет описано далее), хотя последнее, вероятнее всего, отражает неоднородность скоростного строения массива, что в свою очередь определяется теми же геологическими особенностями Урала.

**Определение типа источника.** Зона эпицентра располагается близко к некоторым горнодобывающим предприятиям, осуществляющим разработку месторождений полезных ископаемых наземным и подземным способами. Наиболее крупный из них – Качканарский горнообогатительный комбинат – ведет добычу железной руды в карьере глубиной 300 м. Имеется также несколько мелких карьеров в других соседних населенных пунктах и одна шахта в пос. Сараны. Практически везде разработка месторождений ведется буровзрывным способом, что накладывает определенные трудности при определении типа сейсмических источников из данного района. Сразу после события среди местного населения, привыкшего к частым взрывам, были сомнения по поводу природного характера явления. Количество инструментальных данных в первое время также было ограничено. В связи с этим был произведен расчет дискриминирующих параметров, по которым в регионе осуществляется экспресс-разделение на различные типы сейсмических источников. Опираясь на установленные ранее пороговые значения отношений амплитуд поперечных и продольных волн [17], используемых в качестве основного дискриминирующего признака, было установлено практически однозначное соответствие произошедшего события категории «тектонические землетрясения». Достаточно высокое отношение  $A_s/A_p$  (рис. 4) было получено в различных частотных диапазонах для трех станций, участвовавших в расчетах («Романово» – PR1R, «Добрянка» – PR2R и «Кунгур» – PR3R).

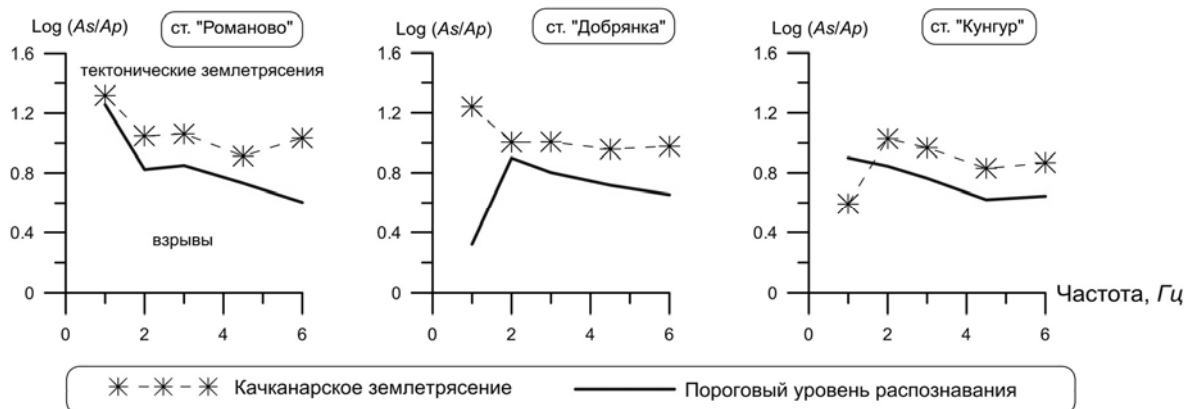


Рис. 4. Распознавание природы сейсмического источника

**Макросейсмические данные.** Население большинства поселков, где ощущалось землетрясение, составляет первые тысячи человек. В них опрос проводился в общественных местах, таких как поселковые администрации, магазины, школы. Опрашиваемые граждане зачастую сообщали не только свои личные ощущения, но и ощущения своих близких, передавали рассказы своих соседей, таким образом, многие из анкет содержат сведения сразу от 3–4 человек. Всего для каждого крупного поселка составлялось не менее трех анкет. В малонаселенных пунктах (Покап, Верхний Ис) опрос проводился почти среди всех жителей, однако для достоверности в обобщении результатов предпочтение отдавалось сведениям от социально благополучных граждан.

Далее приводятся обобщенные сведения о макросейсмических проявлениях в различных населенных пунктах. Для каждого пункта указывается расстояние от инструментального эпицентра ( $\Delta$ ), население, число анкет (опрошенных граждан), характер макросейсмических проявлений. При оценке интенсивности сотрясений использованы количественные характеристики, принятые в шкале MSK-64 [18].

Ниже приведено описание макросейсмических эффектов в населенных пунктах.

***I=5 баллов.*** *Средняя Усьва*,  $\Delta=20$  км, число анкет – 4 (10 человек). Землетрясение ощущалось всеми людьми в помещении. Люди проснулись, испугались, многие вышли из домов. Сначала гул, потом вибрация, «как от трактора». Покачивалась мебель, звенела посуда в шкафу, у кого-то сошел снег с крыши. Большинство домов деревянные, одноэтажные в хорошем состоянии, остались без повреждений. Дома стоят на песчано-глинистых известняках. В одном 2-этажном шлакоблочном доме у жительницы на 1-м этаже упала гардина, порвались обои, других повреждений здания нет. Интенсивность  $I=5$  баллов.

***I=4–5 баллов.*** *Покан*,  $\Delta=7$  км, число опрошенных – 3. Все жители деревни почувствовали один достаточно короткий сильный толчок, вызвавший состояние тревоги. Отмечали гул и покачивание одновременно. Проснулись все, кто не спал, но остались на месте. Дребезжали стекла, покачивались стены. Все дома деревянные, одноэтажные, в хорошем состоянии, стоят на глинах небольшой мощности, покрывающих скальные известняки. Повреждений зданий нет.

*Косья*,  $\Delta=13$  км, число анкет – 4 (12 человек). Ощущалось многими людьми в помещениях. Почти все опрошенные спали и «проснулись от толчка, но потом снова уснули». Трое испытали испуг. «Покачивался диван и стены», наблюдались «легкое движение, вибрация как от трактора», дребезжание окон. В двух случаях отмечалось неестественное поведение животных: перед землетрясением собака и три кошки вышли из дома. Все дома деревянные, одноэтажные, в хорошем состоянии, стоят на глинистых известняках. После землетрясения остались без повреждений.

*Медведка*,  $\Delta=14$  км, число анкет – 6 (18 человек). Ощущалось сильно большинством людей в помещении. Почти все опрошенные проснулись и вскочили, многие испугались. Прохождение сейсмической волны сопровождалось резким звуковым эффектом. Перед толчками жители слышали сильный гул, после которого дребезжали стекла. Слышали «звук, напоминающий выстрел или взрыв, после которого началось сотрясение здания». Ощущали «вибрацию, гул, толчок, будто сошел с крыши снег». «Тряслась посуда и стекла в окнах», «дрожали стены, кровать». Все дома деревянные, одноэтажные, в хорошем и удовлетворительном состоянии, стоят на глинистом известняке. Повреждений зданий нет.

*Верхний Ис*,  $\Delta=15$  км, число анкет – 3 (12 человек). Ощущалось большинством граждан достаточно сильно. Люди находились в спящем состоянии, большинство из них просыпались, испытывали сильный испуг, многие выбегали на улицу. Сначала был гул, потом почти сразу вибрация. Качались люстры, дребезжали стекла. У одного хозяина «в теплице вылетели 2 стекла, в доме отошли обои, появились трещины в покраске». Дома деревянные, одноэтажные, в хорошем состоянии и новые, стоят на глинистом грунте. Повреждений зданий нет.

*Качканар*,  $\Delta=25–27$  км, число анкет – 29 (75 человек).

Город является типичным населенным пунктом при горно-обогатительном комбинате. Разработка железорудного сырья началась в середине 50-х годов XX века. В связи с этим большинство зданий в городе в хорошем состоянии и достаточно современной постройки. Практически все дома имеют от 5 до 12 этажей и построены на прочных скальных грунтах, за исключением небольшого частного сектора, расположенного в долине реки Ис. Жители города прекрасно представляют себе сейсмические и звуковые эффекты от массовых взрывов на карьере Качканарского ГОКа, поэтому описания их ощущений от землетрясения содержат сравнения с взрывами и в то же время указывают на отличие события от взрывов.

Все ощущавшие землетрясение сначала чувствовали прохождение звуковой волны – «раскат грома», «как от взрыва», затем задрезжали стекла, «пошла нарастающая вибрация», произошло несколько толчков, после которых вибрация стала убывать. Сравнивая колебания с карьерными взрывами, опрашиваемые отмечали, что при взрыве как звуковая, так и сейсмическая волна приходит «как-бы сбоку» – с направления ГОКа. При землетрясении звуковая волна шла с северо-запада, а сейсмическая волна ощущалась как пришедшая снизу, из глубины земли.

Анкетирование населения города проводилось преимущественно через Интернет, поэтому имеются макросейсмические данные с различных районов города. Обобщая полученные сведения по г. Качканар, можно сказать, что всего почувствовали землетрясение 56 % опрошенных, при этом более 80 % находились в состоянии сна, остальные бодрствовали. Проснулись от тряски и вибрации 39 % спящих. Кроме них, 5 человек проснулись за некоторое время до землетрясения (от 30<sup>с</sup> до 2<sup>м</sup>). Отдельные люди от беспокойства выбегали на улицу. На верхних

этажах и в домах, расположенных на самых высоких отметках города, колебания ощущались несколько сильнее, чем внизу. Жители, у кого были животные, сообщали об их испуганном и возбужденном поведении при землетрясении (примерно половина случаев). В ряде случаев отмечалось необычное поведение животных накануне, некоторые люди также отмечали свое необычное состояние (бессонница, головные боли) в день перед землетрясением.

*Нововильвенский*,  $\Delta=30$  км, число анкет – 2, число опрошенных – 7. Все спали и сильно испугались. Землетрясение ощущалось сильно – был «гул, вибрация», «дрожали стены, кровать, с крыши сошел снег», «сильно лаяли собаки». Все дома деревянные, одноэтажные, стоят на глинистом грунте. Здания просевшие, с трещинами, новых повреждений нет.

*И с*,  $\Delta=35$  км, число анкет – 1 (2 человека). Ощущалось сильно на 2-м этаже 2-этажного кирпичного дома. «Проснулась, почувствовала, что катаюсь по дивану». «Рядом стоял стол-раскладушка, его столешница открывалась и закрывалась». «Появилась трещинка на потолке в стыке между плитами».

*I=3–4 балла. Промысла*,  $\Delta=33$  км, число анкет – 3 (7 человек). Ощущалось большинством людей в помещениях. Многие спящие просыпались. Отмечалось дребезжание стекол, «шум, гул, тряска дома в течение нескольких секунд», «проходила легкая волна, движение пола под ногами». Предметы не сдвигались. Люди не пугались. Повреждений зданий нет (большинство домов деревянные, одноэтажные, в хорошем и удовлетворительном состоянии, стоят на глинистых грунтах).

*Теплая Гора*,  $\Delta=37$  км, количество анкет – 3 (17 человек). Ощущалось многими людьми в помещении (примерно половиной из опрошенных). Все люди, почувствовавшие землетрясение, проснулись оттого, что ощутили «гул и вибрацию», «встряску, как будто машина в дом въехала», «как будто снег сошел с крыши или тяжелая техника проехала». «Вибрировала кровать и система отопления», но предметы не сдвигались. Люди не пугались, испугался только один человек. Прохождение сейсмической волны сильнее ощущали жители деревянных одноэтажных домов, построенных на обводненных аллювиальных отложениях ближе к реке. Жители кирпичных и панельных 5-этажных домов, расположенных выше по склону горы на скальном основании, прохождения волны не почувствовали. Здания в хорошем и удовлетворительном состоянии, повреждений зданий нет.

*Сараны*,  $\Delta=42$  км, число анкет – 3 (6 человек). Ощущалось многими людьми в помещении. Наблюдался «сильный слышимый гул, слабое потряхивание; дребезжание посуды и нехарактерная вибрация холодильника; кошка в неурочное время запросилась на улицу, после вела себя нормально». «Вибрация, нарастающий гул, стихание, дребезжание, как будто прошла тяжелая техника. Испуг». Здания в поселке стоят на скальном грунте, никаких новых повреждений нет.

*I=3 балла. Нижняя Тура (Лесной)*,  $\Delta=46$  км, число опрошенных – 5. Землетрясение чувствовали немногие жители в помещении. Ощущения слабые – «слабая дрожь, вибрация». Повреждений зданий нет.

*Павда*,  $\Delta=47$  км, число опрошенных – 5. Землетрясение ощущали некоторые жители. Дома в поселке деревянные, кирпичные, одно- и двухэтажные, грунт глинистый.

**Не ощущалось.** *Лялинское линейное производственное управление магистральных газопроводов (Нясьма)*,  $\Delta=31$  км, опрошен диспетчер газокomppressorной станции, работавший в ночную смену. Диспетчер ничего не почувствовал на фоне постоянного шума и вибрации от оборудования.

*Ж/д станция Бисер*,  $\Delta=43$  км, число опрошенных – 5.

*Старая Ляля*,  $\Delta=46$  км, сделан запрос в администрацию поселка. Землетрясение не чувствовали. В поселке дома деревянные одноэтажные.

*Горнозаводск*,  $\Delta=72$  км, число опрошенных – 10.

*Новая Ляля*,  $\Delta=85$  км, сделан запрос в городскую администрацию.

По результатам обработки данных обследования построена карта изосейст (для построения использовался метод *Kriging* [19] пакета *Surfer8*), представленная на рис. 5 а. На карте отмечены эпицентр, пункты-баллы и изосейсты. Для пунктов, где получены неоднозначные оценки интенсивности, использовались средние значения. К северу и северо-востоку от эпицентра изосейсты проведены условно или не проведены совсем из-за отсутствия данных, т.к. указанные на карте населенные пункты являются нежилыми.

Как можно видеть из рис. 5 а, исходное макросейсмическое поле имеет неправильные очертания: вытянутые в субмеридиональном направлении изосейсты, имеются небольшие локальные искажения. Вытянутый характер изосейст, вероятно, имеет отношение к вытянутости локальных геологических структур, в то время как локальные искажения, скорее всего, связаны с изменчивостью свойств грунтов на поверхности. Как известно, грунты, различные по составу, плотности и обводненности, имеют различные сейсмические свойства, что существенно отражается на регистрируемой интенсивности  $I$  сейсмических колебаний. В отдельных случаях на интенсивность может влиять и рельеф местности. Для того чтобы получить неискаженное макросейсмическое поле, была произведена его коррекция за различия в грунтовых условиях.

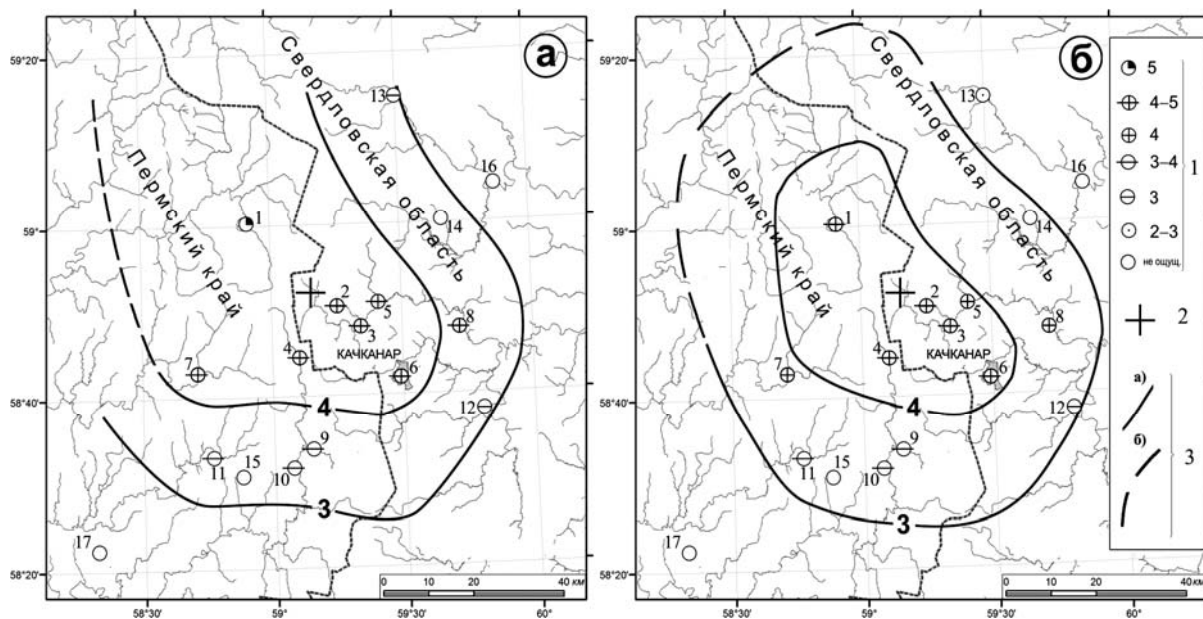


Рис. 5. Карта изосейст исходная (а) и скорректированная (б)

1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64 [20]; 2 – инструментальный эпицентр; 3 – изосейста: уверенная (а), неуверенная (б).

Таблица 5. Макросейсмические данные о Качканарском землетрясении 29 марта в 21<sup>h</sup>02<sup>m</sup> с  $M_w=4.4$

№	Пункт	$\Delta$ , км	$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E	Звук
<u>5 баллов</u>					
1	пос. Средняя Усьва	20	59	58.93	гул, жужжание
<u>4–5 баллов</u>					
2	пос. Покап	7	58.83	59.27	гул
3	пос. Косья	13	58.8	59.35	гул
4	пос. Медведка	14	58.742	59.102	гул, звук как от взрыва, выстрела
5	пос. Верхний Ис	15	58.844	59.418	гул
6	г. Качканар	26	58.698	59.476	гул
7	пос. Нововильвенский	30	58.72	58.72	гул
8	пос. Ис	35	58.78	59.75	
<u>3–4 балла</u>					
9	пос. Промысла	33	58.567	59.161	гул
10	пос. Теплая Гора	37	58.53	59.082	гул
11	пос. Сараны	42	58.55	58.76	гул
<u>3 балла</u>					
12	г. Лесной	44	58.633	59.783	
13	пос. Павда	47	59.25	59.5	

№	Пункт	$\Delta$ , км	$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E	Звук
	<u>Не ощущалось</u>				
14	пос. Нясьма	31	59.001	59.637	
15	ж/д ст. Бисер	43	58.51	58.87	
16	пос. Старая Ляля	46	59.07	59.86	
17	г. Горнозаводск	72	58.38	58.32	

Примечание. Сокращенные обозначения: дер. – деревня; пос. – поселок; г. – город; ж/д ст. – железнодорожная станция.

Исправленное поле содержит оценки интенсивности  $I_{cor}$ , такие, какие бы они были на средних грунтах (табл. 6). Учитывая незначительное разнообразие в строении верхней части разреза (в большинстве пунктов грунты можно отнести ко II категории по сейсмическим свойствам [21], т.е. к средним), поправки интенсивности приняты небольшими –  $\Delta I=0.5$  балла. В зависимости от условий величина поправки прибавляется либо вычитается из полученных оценок интенсивности.

**Таблица 6.** Коррекция сейсмической интенсивности за различия в грунтовых условиях

Населенный пункт	Грунт	$I$ , баллы	Поправка $\Delta I$ , баллы	$I_{cor}$ , баллы
Верхний Ис	Глинистый обводненный известняк в речной долине	4.5	-0.5 (грунт)	4
Ж/д станция Бисер	Скальный грунт на склоне	3.0	0	3
Ис	Глинистый обводненный известняк в речной долине	4.5	-0.5 (грунт)	4
Качканар	Скальный грунт	4.5	+0.5 (грунт) -0.5 (этажность)	4.5
Косья	Глинистый известняк на склоне	4.5	0	4.5
Медведка	Глинистый известняк на склоне	4.5	0	4.5
Нижняя Тура (Лесной)	Глинистый известняк на холмистой равнине	3.0	0	3
Нововильвенский	Глинистые отложения в речной долине	4.5	-0.5 (грунт)	4
Павда	Глинистый грунт на равнине у реки	3	-0.5 (грунт)	2.5
Покап	Глинистый известняк на склоне	4.5	0	4.5
Промысла	Глина в небольшой речной долине	3.5	0	3.5
Сараны	Скальный грунт	3.5	0	3.5
Средняя Усьва	Песчано-глинистые отложения и известняк в широкой речной долине	5.0	-0.5 (грунт)	4.5
Теплая Гора	Известняк на склоне	3.5	0	3.5

Несмотря на то, что многие граждане указывают скальный грунт в основании их здания, в действительности его не всегда можно отнести к первой категории по сейсмическим свойствам. Скальные грунты на поверхности, как правило, являются полуразрушенными, что означает их принадлежность ко II категории по сейсмическим свойствам. Таковыми были признаны грунты на ж/д станции Бисер, Теплой Горе и пос. Сараны (поправка  $\delta I=0$  баллов).

В г. Качканар скальные грунты можно принять малоразрушенными, поскольку большинство зданий являются современными и многоэтажными (хорошо подготовлен фундамент) и построены на горе, что говорит об относительно высокой прочности слагающих пород, которые «занижают» интенсивность относительно средних грунтов (поправка +0.5 балла). В то же время почти все оценки интенсивности получены на основании данных от жителей верхних этажей, где колебания усиливаются. Некоторое усиление придает и фактор рельефа, поэтому необходима обратная корректировка интенсивности (поправка  $\delta I=-0.5$  балла). Таким образом, суммарную поправку для г. Качканар можно принять нулевой.

Глинистые грунты могут принадлежать как ко II, так и к III категории, но для района землетрясения следует учесть, что здесь мощность глин бывает небольшой – намного меньше 20 м слоя, влияние которого, считается, определяет приращение интенсивности. Большинство поселков расположены в горной или холмистой местности, где дома стоят на склонах и где



мощность обломочного материала и глин невелика. Это позволяет грунты в поселках Промысла, Медведка, Косья, деревне Покап и г. Нижняя Тура отнести к средним (поправка 0 баллов).

Отдельные макросейсмические показания были получены от жителей, чьи дома стоят на обводненных грунтах. Основной причиной этого является расположение построек в долинах рек, особенно в долинах с низким уклоном, что является благоприятным условием накопления большего слоя глин и мелкозернистого обломочного материала. Сама вода также считается фактором, ухудшающим сейсмические свойства грунтов. В таких населенных пунктах (Верхний Ис, Ис, Нововильвенский, Средняя Усьва, Павда) была принята занижающая поправка  $\delta I = -0.5$  балла.

Скорректированная карта макросейсмического поля для средних грунтов представлена на рис. 5 б. Новые изосейсты имеют форму, близкую к эллипсообразной. Большая ось эллипса ориентирована с северо-запада на юго-восток с азимутом около  $150^\circ$ . Северные границы проведенных изосейст следует считать по-прежнему условными из-за отсутствия данных, хотя они значительно приблизились к инструментально установленному эпицентру, благодаря чему его положение в новом окружении скорректированных сотрясений выглядит более естественным.

Геометрические параметры скорректированного поля изосейст представлены в табл. 7.

**Таблица 7.** Основные параметры макросейсмического поля Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г. в  $21^{\text{h}}02^{\text{m}}$  с  $M_W=4.4$

$I_i$ , баллы	Геометрические параметры поля изосейст, км				Площадь $S_i$ зоны, км <sup>2</sup>
	$\ell_a$	$\ell_b$	$\bar{\ell}$	$\ell_a/\ell_b$	
4	32.5	19	24.8	1.71	2093
3	50.0	39.0	44.2	1.28	7190

Примечание. Среднее  $\bar{\ell}$  является средним геометрическим  $\bar{\ell} = \sqrt{\ell_a \cdot \ell_b}$ .

Наличие макросейсмического поля позволяет подойти к решению такой задачи, как расчет глубины очага через уравнение макросейсмического поля. Она актуальна для случаев, когда по инструментальным данным установить глубину не представляется возможным. Именно такая ситуация имела место в первое время после землетрясения, пока не были доступны данные всех станций.

**Определение глубины очага по макросейсмическим данным.** При известной магнитуде  $M_{LH}$  и интенсивности  $I$  на поверхности глубину  $h$  можно определить из уравнения макросейсмического поля, которое с параметрами для Восточно-Европейской платформы, Урала и Западной Сибири из [22] имеет вид

$$\lg r = (1.5M_{LH} + 3 - I) / 3.5, \quad (1)$$

где  $r = \sqrt{h^2 + \Delta^2}$  – гипоцентральное расстояние в км, зависящее как от глубины, так и от эпицентрального расстояния  $\Delta$  (радиуса круговой изосейсты, охватывающей ту же площадь, что и фактическая).

Макросейсмическое уравнение использует магнитуду  $M_{LH}$ , которая примерно равна  $M_S$ . Согласно [23],  $M_L$  и  $M_S$  в диапазоне магнитуд от 3 до 8 связаны ортогональным соотношением

$$M_S = (0.8M_L - 1.04) / 0.6, \quad (2)$$

из которого получаем  $M_S = 3.5$ .

Опираясь на интенсивность в эпицентре ( $I_0 = 4.5$ ) и магнитуду  $M_S$ , глубина получается равной 11.4 км. Действительных решений глубины по радиусам 3-й и 4-й изосейст нет. В то же время альтернативное уравнение Н.В. Шебалина [18]

$$\lg \left( \frac{S_0}{\pi h^2} + 1 \right) = (I_0 - I_i) / 1.75, \quad (3)$$

исключающее влияние магнитуды и связывающее площадь  $i$ -й изосейсты  $S_0$  и интенсивность в эпицентре  $I_0$ , дает глубину порядка 19.2 км по площади 3-балльных сотрясений, и 26.7 км по площади 4-балльных сотрясений.

Используя макросейсмическую формулу В.Карника, обобщающую данные по Европейским землетрясениям [23],

$$I_0 = 2M - 2\lg h - 0.7, \quad (4)$$

глубина очага получается равной 7.4 км.

Высокая чувствительность оценок глубины к изменениям магнитуды и интенсивности определяет большую ошибку таких расчетов. При ошибке определения магнитуды ( $\delta M$ ), равной 0.2, изменения глубины, определенной по интенсивности в эпицентре, не превышают 3.4 км по формуле (1) и 6.2 км – по формуле (4).

При изменении интенсивности на величину ее ошибки (примем ее равной  $\delta I=0.5$  балла), глубина, определяемая по изосейстам, меняется так же значительно, как и при изменении магнитуды. Вариации глубины, рассчитанной через  $I_0$ , не превышают 4.5 км для (1) и 5.7 км для (4). Вариация оценок глубины, рассчитанной по формуле (3) составляет около 11 км.

Принимая во внимание все вышесказанное, наиболее надежная глубина получается из расчетов по интенсивности в эпицентре и по площади 3-балльных сотрясений (19.2 км). Она ближе всех и к среднему значению (16.2 км), найденному по всем полученным оценкам, и к инструментальной оценке глубины (21 км). Стандартное отклонение глубины, рассчитанной разными способами, составляет 8.6 км, а с учетом ошибок получения исходных оценок итоговая ошибка глубины очага землетрясения по макросейсмическим данным не может быть меньше 6.8 км.

**Выводы.** Произошедшее землетрясение является первым сильным сейсмическим событием на Урале, для которого определены все основные параметры очага, включая его механизм. Другие землетрясения такого масштаба, произошедшие в регионе ранее, ни разу не получали должного освещения только из-за недостатка инструментальных данных. Текущие сейсмические наблюдения на Урале, как было показано выше, дали определенно положительный результат в изучении региональной сейсмичности.

Обобщая полученные результаты обработки инструментальных данных Качканарского землетрясения, можно сказать, что его очаг имеет значительное удаление от зоны влияния горных работ, проводимых ближайшими горнодобывающими предприятиями. Это делает наведенный характер события маловероятным. Событие также не могло быть взрывом, как предполагали многие местные жители, поскольку ни горнодобывающая промышленность, ни местные военные формирования взрывы с такой магнитудой в регионе не производят и даже технически не могут делать это на слишком большой глубине. Знаки первых вступлений на различных азимутах, как показало решение механизма очага, различны и распределены согласно сдвиговому характеру очага. Взрывную природу отвергают и проверки, опирающиеся на дискриминирующий признак  $A_s/A_p$ . Все это говорит исключительно в пользу того, что Качканарское землетрясение является тектоническим событием.

Макросейсмические данные собраны практически во всех населенных пунктах, попавших в область ощутимых колебаний. Они систематизированы в соответствии с принятой шкалой MSK-64 и содержат самую исчерпывающую информацию об ощущениях людей, животных и имевших место повреждениях. Все это в условиях недостатка инструментальных данных на близких расстояниях позволило достаточно взвешенно подойти к уточнению глубины очага.

#### Л и т е р а т у р а

1. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А., Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В., Верхованцев А.В. Пермский край 2000–2005 гг. // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 269–289.
2. Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Маловичко Д.А., Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В. Урал // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 238–246.
3. Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Маловичко Д.А., Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В. Урал // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 242–247.
4. Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Маловичко Д.А., Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В. Урал // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 248–253.

5. Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Верхоланцева Т.В., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В. Урал // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 217–224.
6. Kennet B.L.N. (editor). IASPEI 1991 Seismological Tables // Sydney: Research School of Earth Sciences Australian National University, 1991. – 167 p.
7. Дружинин В.С., Егоркин А.В., Кашубин С.Н. Новые данные о глубинной структуре Урала и прилегающих к нему областей по данным ГСЗ. – ДАН СССР. – 1990. – 315. – № 5. – С. 1086–1090.
8. The Moho depth of the European plate. – URL: <http://www.seismo.helsinki.fi/mohomap>.
9. Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Верхоланцева Т.В., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В. Урал. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
10. Голубева И.В., Дягилев Р.А. (отв. сост.), Белевская М.А., Верхоланцева Т.В., Старикович Е.Н. (сост.). Каталог землетрясений, горных и горно-тектонических ударов на территории Урала и прилегающих районов за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
11. Российская академия наук. Геофизическая служба. – URL: <http://ceme.gsras.ru/ceme>.
12. Болдырева Н.В. (отв. сост.), Аторина М.А., Бабкина В.Ф., Дуленцова Л.Г., Малянова Л.С., Рыжикова М.И., Щербакова А.И. (сост.). Каталог землетрясений Земли за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
13. International Seismological Centre, On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2013. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
14. Казахстанский национальный центр данных. – URL: <http://www.kndc.kz/index.php/ru>.
15. NORSAR Monthly Seismic Bulletins. – URL: <http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/norsar/>.
16. Дружинин В.С., Пустовалов Н.А., Папшев Г.А., Косилова М.В., Тележук Н.В. Косыинское сейсмическое событие 29 марта 2010 года на Среднем Урале. – Геориск. – 2010. – № 4. – С. 26–30.
17. Дягилев Р.А., Голубева И.В. Оценка эффективности критерия распознавания сейсмических событий  $As/Ap$  для станций Уральского региона с применением статистических подходов // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 78–80.
18. Сейсмическое районирование СССР / Под ред. С.В. Медведева. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
19. Cressie N.A.C. The Origins of Kriging, *Mathematical Geology*, 1990. – v. 22, p. 239–252.
20. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). Шкала сейсмической интенсивности MSK.64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
21. Строительство в сейсмических районах. СНиП II.7.87\*. – М.: Госстрой России, 2000.
22. Шебалин Н.В. Коэффициенты уравнения макросейсмического поля по регионам // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 30.
23. New manual of seismological observatory practice // P. Bormann (ed.). – Potsdam: GFZ, 2002. – Vol.1.