

Современные геологические процессы

ЖУПАНОВСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 30.01.2016 г. С $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (КАМЧАТКА)

ВВЕДЕНИЕ

30.01.2016 г. в 03 час. 25 мин. по Гринвичу (15 час. 25 мин. по местному времени) под восточным побережьем Камчатки произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_w = 7.2$ (рис. 1, 2). Параметры землетрясения — координаты и энергетические характеристики по данным различных обрабатывающих центров России и мира — приведены в табл. 1. Гипоцентр землетрясения находился примерно в 100 км к северу от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 178 км.

Эпицентральная область, очерченная афтершоками, располагалась в районе долины реки Жупанова и условно ограничена горными массивами, включая хребет Дзензур, гору Жупановские Востряки и вулкан Жупановский, находящийся в состоянии извержения с середины 2014 г. (рис. 3 на 1 стр. обложки). Исходя из географического критерия, это сейсмическое событие стали именовать Жупановским землетрясением.

По данным Камчатского филиала (КФ) Геофизической службы (ГС) РАН Жупановское землетрясение ощущалось в Камчатском крае с интенсивностью до 6 баллов (здесь и далее используется шкала сейсмической интенсивности MSK-64 (Медведев и др., 1965)).

В результате сильного землетрясения уровень сейсмичности Камчатского участка зоны субдукции поднялся до экстремально высокого по шкале СОУС'09 (Салтыков, 2011) во временных окнах до 90 суток и достиг высокого уровня в годовом окне (рис. 4).

В работе представлены первые результаты исследования Жупановского землетрясения и приводятся результаты его обработки в оперативном режиме и по регламентам Службы срочных донесений и Службы предупреждения о цунами.

ОБРАБОТКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО РЕГЛАМЕНТАМ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ И СЛУЖБЫ СРОЧНЫХ ДОНЕСЕНИЙ

Сейсмическая подсистема Службы предупреждения о цунами включает в себя три реги-

ональных информационно-обрабатывающих центра («Петропавловск», «Южно-Сахалинск» и «Владивосток»), которые имеют полный и равный доступ к сейсмическим данным. В то же время, поскольку действующие регламенты Службы предупреждения о цунами (СПЦ) и Службы срочных донесений (ССД) в каждом РИОЦ несколько различаются, при этом различены и наборы сейсмических станций, используемых для оперативной обработки сильных землетрясений. Рассмотрим в деталях обработку Жупановского землетрясения по регламентам СПЦ и ССД в РИОЦ «Петропавловск», который расположен в г. Петропавловске-Камчатском, входит в состав КФ ГС РАН и работает в непрерывном и круглосуточном режиме. По действующему регламенту СПЦ обработка землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$, зарегистрированного на расстоянии до 1000 км от РИОЦ «Петропавловск», должна занять не более 10 минут.

Дежурная смена РИОЦ приступила к обработке землетрясения сразу после срабатывания сигнализации при превышении регистрируемым сейсмическим сигналом заданного уровня на станции «Авача» (AVH), ближайшей к эпицентру. В течение первой минуты с момента срабатывания сигнализации сигнал «Регистрируется сильное землетрясение!» был передан в Центр цунами ФБГУ «Камчатское УГМС» (Росгидромет).

Предварительная оценка параметров землетрясения была получена через 2 мин. 50 с со времени в очаге. Уточненные параметры землетрясения получены через 4 мин. 37 с со времени в очаге (53.88° с. ш., 159.18° в. д., глубина $H=160$ км, $M_s^{\text{PET}}=5.7$, $M_s(20R)=6.5$, $K_p = 15.2$). Рассылка срочных донесений осуществлялась по установленному списку адресов (ГУ МЧС России по Камчатскому краю, ССД ГС РАН, Росгидромет и др.). Тревога цунами не объявлялась, поскольку эпицентр находился на суше.

В помещении, где осуществлялась обработка землетрясения, колебания ощущались в течение одной минуты с интенсивностью до 4 баллов, что не помешало дежурной смене квалифицированно и своевременно выполнить все регламентированные действия. РИОЦ «Петропавловск» полностью уложился в сроки, установленные регламентами

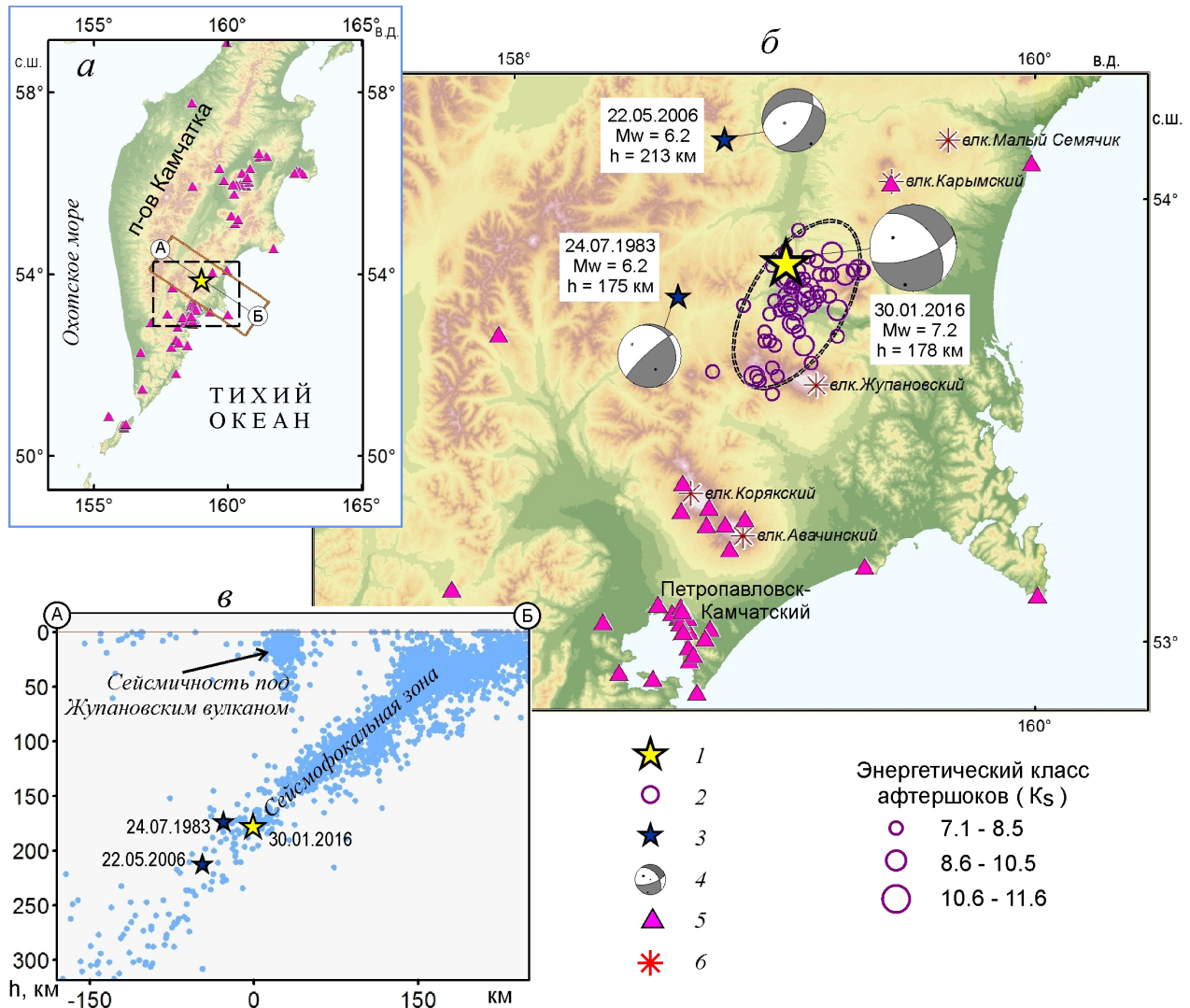


Рис. 1. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. $M_w = 7.2$ и его афтершоки: эпицентр Жупановского землетрясения на схеме Камчатской региональной сети сейсмических станций (а); схема расположения эпицентров Жупановского землетрясения и его афтершоков с энергетическими классами $K_s > 7.0$ (б) в области, очерченной штриховым пунктиром на рис. 1а; разрез фрагмента сейсмофокальной зоны (в), ограниченного прямоугольником на рис. 1а. 1 — Жупановское землетрясение; 2 — эпицентры афтершоков; 3 — сильные ($M_w > 6.0$) землетрясения рассматриваемого района с 1961 г. по 30.01.2016 г., зарегистрированные в диапазоне глубин от 150 до 250 км; 4 — стереограммы механизмов очагов землетрясений 22.05.2006 г., 24.07.1983 г. и 30.01.2016 г., определенные в КФ ГС РАН по знакам первых вступлений объемных волн; 5 — сейсмические станции; б — вулканы. На разрезе точками обозначены проекции гипоцентров на вертикальную плоскость.

СПЦ и ССД, продемонстрировал при этом хорошую точность оценок параметров землетрясения и обоснованно не стал объявлять тревогу цунами.

РИОЦ «Южно-Сахалинск» и «Владивосток» получили сходные параметры очага, уложившись во временные ограничения, установленные их регламентами.

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА БАЛЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ КАМЧАТСКОГО КРАЯ И г. ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Данные 43 акселерометров, расположенных в Камчатском крае и на Северных Курилах и

входящих в систему сейсмического мониторинга КФ ГС РАН, доступны в РИОЦ «Петропавловск» в режиме близком к реальному времени. Из них 21 прибор установлен на территории г. Петропавловска-Камчатского и в его окрестностях. Это позволяет оперативно произвести оценку интенсивности колебаний при сильном землетрясении и организовать быстрое информирование заинтересованных организаций о балльности и, следовательно, о масштабах проявления и потенциальных последствиях сейсмического события.

Технология оперативной оценки балльности по инструментальным данным программно реализована Д.В. Дрозниным и введена в эксплуатацию в РИОЦ «Петропавловск» в конце 2014 г.

ЖУПАНОВСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

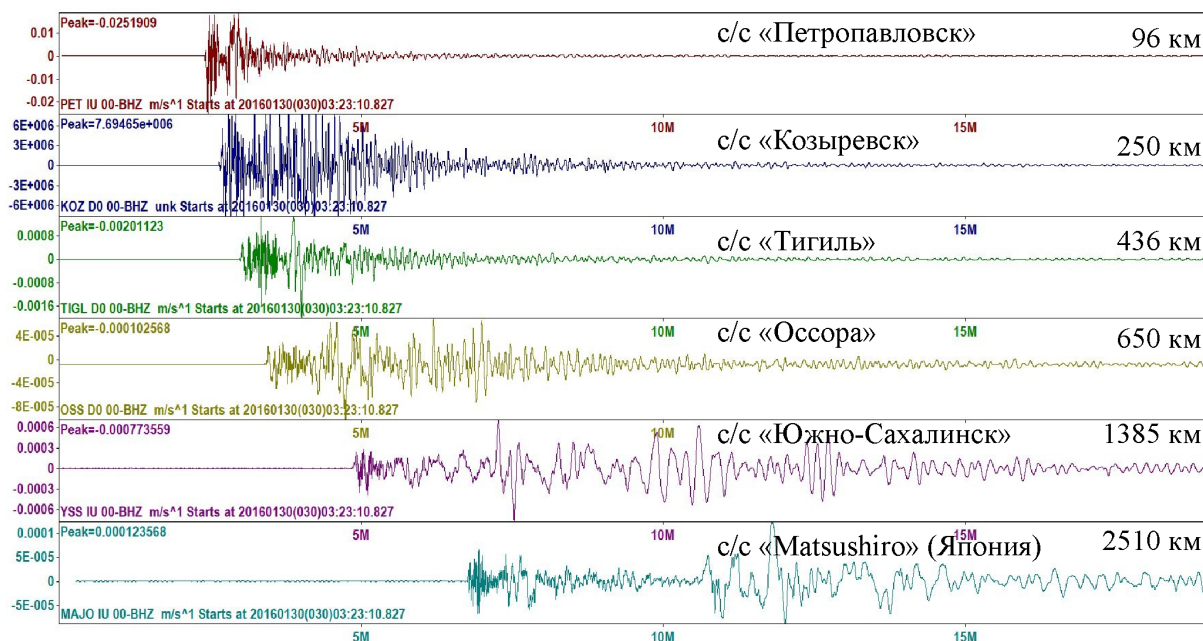


Рис. 2. Примеры записей Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. $M_w = 7.2$ широкополосными сейсмическими станциями, расположенными на эпицентральных расстояниях до ~2500 км.

Таблица 1. Параметры Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. и сильных ($M_w > 6.0$) землетрясений рассматриваемого района с 1961 г. по 30.01.2016 г., зарегистрированных в диапазоне глубин от 150 до 250 км.

Гипоцентр			Энергетический класс / Магнитуда			
Дата г. м. д.	Время ч : м : с	Координаты	КФ ГС РАН	Global CMT ¹	NEIC (US GS) ²	Обнинск ³
Жупановское землетрясение 30.01.2016 г.						
2016.01.30	03:25:08.4	53.85° с.ш. 159.04° в.д. $h = 178$ км	$K_S = 15.7$ $M_L = 7.1$ $M_c = 7.1$ $M_w = 7.2$ $M_S(20R) = 6.5$	$M_w = 7.2$ $M_S = 7.2$	$M_w = 7.2$ $m_b = 6.7$	$m_b = 7.2$ $M_S = 6.6$
Сильные ($M_w > 6.0$) землетрясения рассматриваемого района с 1961 г. по 30.01.2016 г. в диапазоне глубин $h = 150-250$ км						
1983.07.24	23:07:30.5	53.78° с.ш. 158.63° в.д. $h = 175$ км	$K_S = 14.4$ $M_L = 6.5$	$M_w = 6.2$ $m_b = 6.1$	$M_w = 6.2$ $m_b = 6.1$	$M_S = 5.4$
2006.05.22	13:08:00.5	54.13° с.ш. 158.81° в.д. $h = 213$ км	$K_S = 13.5$ $M_L = 6.0$	$M_w = 6.2$ $m_b = 6.2$ $M_S = 6.2$	$M_w = 6.2$ $m_b = 6.2$	$m_b = 6.4$ $M_S = 5.3$

Примечание. ¹The Global CMT Project (<http://www.globalcmt.org>); ²National Earthquake Information Center, U.S. Geological Survey (<http://neic.usgs.gov>); ³ Геофизическая служба РАН, Обнинск (<http://www.gsras.ru>). Энергетические характеристики: K_S — энергетический класс по S-волне по энергетической классификации (Федотов, 1972); M_L — локальная магнитуда; M_c — магнитуда по коде; M_w — моментная магнитуда; M_S — магнитуда по поверхностной волне Релея; $M_S(20R)$ — региональная магнитуда по поперечным и поверхностным волнам вблизи периода $T = 20$ с; m_b — магнитуда по объемным волнам.

Согласно регламенту, при отсутствии повторных толчков сводка данных об интенсивности сотрясений по инструментальным данным подается дежурной сменой после получения основных параметров очага землетрясения и рассылки сообщений по регламентам ССД и СПЦ. При этом время на подготовку сводки составляет 15 мин. с момента начала регистрации события. Жупановское землетрясение позволило впервые масштабно использовать

эту разработку для достаточно сильного землетрясения с интенсивностью сотрясений до 6 баллов.

Через 10 мин. с момента регистрации землетрясения в РИОЦ «Петропавловск» были рассчитаны значения интенсивности колебаний в баллах во всех точках, где установлены акселерометры (рис. 5 на 2 стр. обложки). Эта информация в графическом и табличном формате была передана в МЧС Камчатского края.

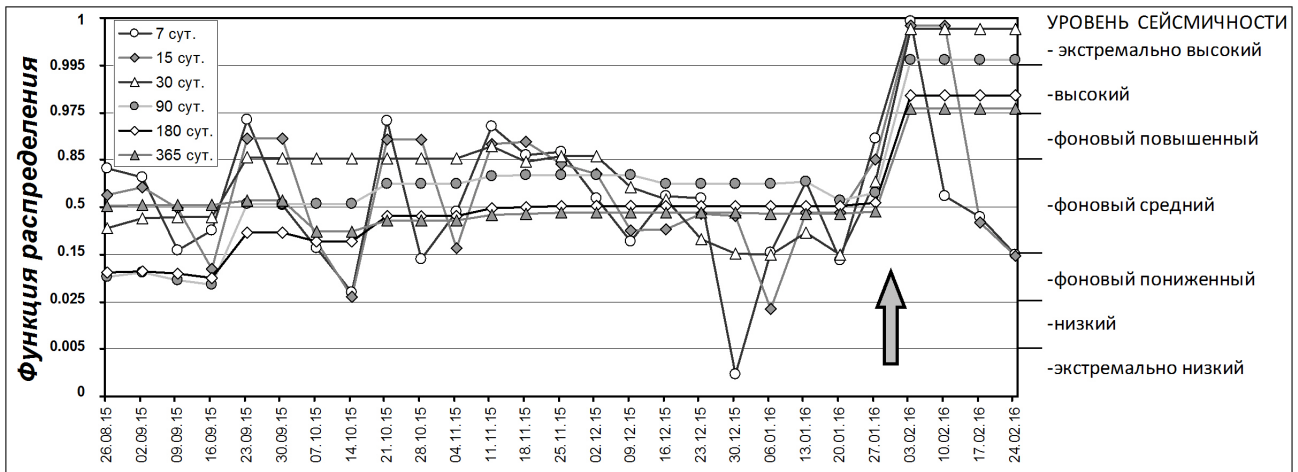


Рис. 4. Временной ход уровня сейсмичности Камчатского участка Курило-Камчатской зоны субдукции в различных временных окнах. Стрелкой отмечено Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. $M_w = 7.2$.

Таким образом, уже через 10 мин. после сильного землетрясения МЧС было обеспечено детальными данными об интенсивности колебаний на территории г. Петропавловска-Камчатского и Камчатки в целом. Оценки параметров сейсмического события, дополненные данными об интенсивности сотрясений, дают более полное и детальное представление о произошедшем, что, в свою очередь, позволит производить более эффективное планирование мероприятий, направленных на смягчения последствий в случае разрушительного землетрясения. Поэтому можно говорить о качественном повышении значимости данных, которые КФ ГС РАН в реальном времени предоставляет в МЧС и Администрацию Камчатского края.

ОПЕРАТИВНАЯ ОБРАБОТКА ЖУПАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ЕГО АФТЕРШОКОВ

В РИОЦ «Петропавловск» организован прием пакетов данных в режиме близком к реальному времени со 113-ти станций, расположенных на Дальнем Востоке Российской Федерации, в том числе и полуострове Камчатка, и на территориях сопредельных государств. Из них 77 пунктов составляют сеть постоянно действующих сейсмических станций КФ ГС РАН (Чебров и др., 2013). Остальные станции входят в состав сетей Сахалинского и Магаданского филиалов ГС РАН и мировой сети IRIS.

Через 14 мин. с начала регистрации Жупановского землетрясения дежурным сотрудником службы оперативной обработки РИОЦ «Петропавловск» были получены оценки его параметров по данным девятнадцати станций сети КФ ГС РАН. Согласно регламенту информация была передана по электронной почте и сотовой связи по установленному списку адресов.

Окончательная обработка землетрясения была произведена по данным 66-ти сейсмических станций. Итоговые параметры землетрясения представлены в табл. 1, они близки к первоначальному определению гипоцентра.

После основного толчка регистрировалась афтершоковая активность. С 30 января по 29 февраля 2016 г. в радиусе 35 км от эпицентра Жупановского землетрясения было зарегистрировано и обработано в оперативном режиме 89 афтершочков энергетического класса $K_s = 6.0-11.6$, из них 34 события — в первые сутки после основного толчка. Далее землетрясения в этом районе происходили ежедневно с частотой от 1 до 8 событий в сутки. Преобладающее число гипоцентров определено в интервале глубин 150–190 км. Средняя ошибка локации для землетрясений афтершокового облака составила ~12 км в плане и ~11 км по глубине. Самый сильный афтершок с $K_s=11.6$ произошел 30.01.2016 г. через 17 мин. после основного события.

АФТЕРШОКИ ЖУПАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Уровень надежной регистрации камчатской региональной сети сейсмических станций для афтершоковой последовательности Жупановского землетрясения составляет $K_{мин} = 7.1$ (рис. 6а). С учетом этого при последующем анализе были использованы 65 сейсмических событий из очаговой области с $K_s \geq 7.1$. Облако эпицентров афтершочков околонуено эллипсом рассеяния, включающим 90% афтершочков (рис. 1), что позволяет формально оценить размер очага Жупановского землетрясения: длина 50 км, ширина 25 км.

На графике повторяемости (рис. 6а) между основным событием и сильнейшим афтершоком наблюдается разрыв шириной $\Delta K = 4.1$

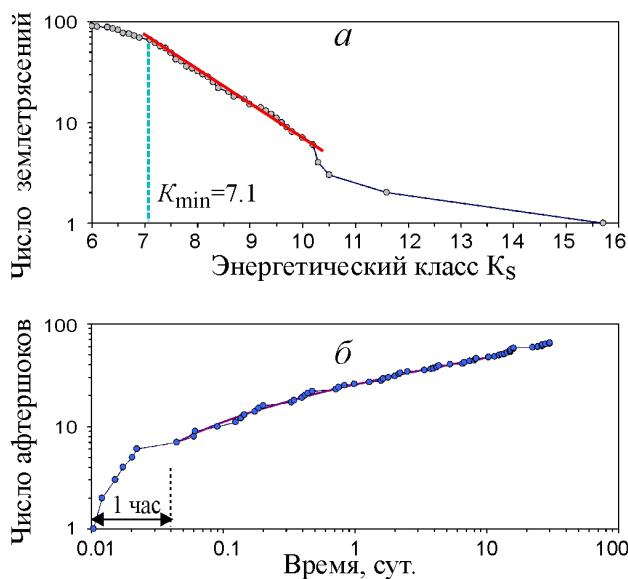


Рис. 6. Афтершоковый процесс Жупановского землетрясения: график повторяемости для афтершоковой последовательности (а) и ее развитие во времени в билогарифмическом масштабе (б). Приведено кумулятивное число афтершоков. За начало отсчета взято время основного события. Показана аппроксимация первых 13 суток (за исключением первого часа) в соответствии с законом Омори.

класса. Такой большой разрыв не типичен для поверхностных землетрясений (принцип Бота (Bath, 1965) определяет его как $\Delta M = 1$, что соответствует $\Delta K = 2$), но для сильных землетрясений на глубинах 100–200 км, достаточно редко сопровождающихся афтершоками, такая ситуация не является исключительной. Например, для Тумрокских землетрясений 2003 и 2004 гг. с магнитудой $M_w = 6.8\text{--}6.9$ разрыв $\Delta K = 4.5\text{--}4.7$ (Левина и др., 2010).

Поскольку в течение первого часа после основного события регистрировались лишь наиболее сильные землетрясения, этот интервал был исключен из рассмотрения при оценке наклона графика повторяемости γ . В результате получено значение $\gamma = 0.44 \pm 0.06$, что соответствует $b = 0.88 \pm 0.12$ для магнитудной шкалы, что типично для этих параметров на Камчатке.

Развитие афтершокового процесса во времени является характерным проявлением эмпирического закона Омори, согласно которому активность афтершоковой последовательности угасает со временем по степенному закону:

$$\frac{dN}{dt} \sim \frac{1}{t^p},$$

где N — число афтершоков, t — время, p — параметр Омори.

В течение первых 13 суток (за исключением непредставительного часового интервала после основного события) убывание числа афтершоков

шло в точном соответствии с законом Омори с параметром $p = 0.84$ (рис. 6б): дисперсия отклонения наблюдаемых данных от аппроксимации составила 0.5.

Интенсивность потока землетрясений в очаговой области при сохранении характера афтершокового процесса может выйти на фоновый уровень к маю 2016 г.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА ЖУПАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Разнообразие тектонических обстановок в зоне ответственности КФ ГС РАН потребовало регионализации сейсмичности, что в настоящее время реализовано на основе тектоно-географических критериев: Камчатский регион и прилегающие к нему области разбиты на десять тектоно-географических зон, детально описанных в работах (Левина и др., 2013, Чебров и др., 2013). В частности, Курило-Камчатская зона субдукции разделена по простиранию на два сегмента, имеющих существенно различные характеристики сейсмичности и возраст: Курило-Южно-Камчатскую и Северо-Камчатскую части сейсмофокальной зоны. Граница между ними проходит в районе поперечной Авачинской вулcano-тектонической структуры и далее по падению погружающейся Тихоокеанской плиты.

Жупановское землетрясение произошло в Северо-Камчатской части сейсмофокальной зоны в промежуточном диапазоне глубин, где регистрируется ~20% землетрясений и выделяется ~64% энергии указанной зоны (Левина и др., 2013). Оно является сильнейшим из землетрясений, локализованных под Камчаткой на глубине от 150 до 250 км. В соответствии с положением гипоцентра, Жупановское землетрясение произошло в толще погружающейся под Камчатку Тихоокеанской плиты, маркируемой землетрясениями (рис. 1б).

В КФ ГС РАН механизм очага Жупановского землетрясения был определен двумя способами: по знакам первых вступлений объемных волн и на основе инверсии волновых форм широкополосных сейсмических записей (табл. 2).

В первом случае при расчете механизма использовались записи 43 станций Камчатской сети и 15 удаленных станций, записи которых доступны в режиме реального времени в РИОЦ «Петропавловск». Станции находились в интервале эпицентральных расстояний от 0.3° до 22.1° . Для расчетов использовалась программа А.В. Ландера.

Во втором случае для определения механизма очага применялась методика, изложенная в работах (Абубакиров и др., 2015; Павлов,

Таблица 2. Оценки параметров механизма очага Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. $M_w = 7.2$.

Агентство (использованные данные)	Главные оси ³						Механизм очага ⁴						Диаграмма механизма в стереографической проекции нижней полусферы
	<i>T</i>		<i>N</i>		<i>P</i>		<i>NP1</i>			<i>NP2</i>			
	<i>pl</i>	<i>azm</i>	<i>Pl</i>	<i>azm</i>	<i>Pl</i>	<i>azm</i>	<i>stk</i>	<i>Dip</i>	<i>slip</i>	<i>stk</i>	<i>dip</i>	<i>slip</i>	
КФ ГС РАН (знаки первых вступлений объемных волн)	14	192	40	90	47	297	72	70	-133	321	47	-29	
КФ ГС РАН (полные сейсмограммы)	19	190	32	88	51	306	75	71	-124	320	39	-31	
Global CMT ¹ (объемные, мантийные и поверхностные волны)	19	192	34	89	49	306	76	72	-126	324	40	-28	
NEIC ² (W-фаза)	21	192	29	90	52	313	79	72	-121	323	35	-32	
NEIC ² (объемные волны)	22	181	22	82	58	311	73	70	-113	305	30	-43	

Примечание. ¹ <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

² <http://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>

³ Ориентация оси задается двумя углами — углом погружения *pl* и азимутом *azm*.

⁴ Ориентация нодальных плоскостей *NP1*, *NP2* задается двумя углами — азимутом простираения *stk* и углом падения *dip*. Угол подвижки *slip* — угол в плоскости очага между направлением простираения и вектором подвижки (отсчитывается против часовой стрелки от направления простираения).

Абубакиров, 2012). Оценивались следующие параметры: глубина *h* эквивалентного точечного источника, длительность τ временной функции источника (длительность движения в очаге) и тензор сейсмического момента (ТСМ), удовлетворяющий условию нулевого следа. По ТСМ был определен механизм очага и рассчитаны значения скалярного сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w . В качестве исходных данных использованы волновые формы, зарегистрированные двадцатью семью региональными широкополосными сейсмическими станциями в диапазоне эпицентральных расстояний от 3° до 25° и профильтрованные в полосе периодов от 50 до 350 с. По фрагментам этих волновых форм во временном окне [*tp*, *tp* + 600 с], где *tp* — время вступления *P*-волн, получены следующие оценки: $h = 160$ км, $\tau = 16$ с, $M_0 = 7.82 \cdot 10^{19}$ Н·м, $M_w = 7.2$.

Параметры главных осей ТСМ и механизма ближайшего к ТСМ двойного диполя без момента приведены в табл. 2 вместе с независимыми оценками, полученными мировыми агентствами. Все решения, полученные различными способами, близки.

Землетрясение возникло под действием напряжения растяжения, ориентированного в субмеридиональном направлении. Ось напряжения сжатия направлена на запад-северо-запад. Нодальная плоскость *NP1* имеет субширотное простираение ($stk = 72-79^\circ$) и довольно крутой угол падения ($dip = 70-72^\circ$); по ней произошел сброс с компонентами правостороннего сдвига. Плоскость *NP2* имеет северо-западное простираение ($stk = 305-324^\circ$) и залегает более полого ($dip = 30-47^\circ$); тип движения по ней — левосторонний сдвиг с элементами сброса.

За годы детальных сейсмологических наблюдений (с 1961 г.) в непосредственной близости от гипоцентра Жупановского землетрясения произошли лишь два сильных землетрясения с магнитудой $M_w > 6.0$: 24.07.1983 г. $M_w = 6.2$ и 22.05.2006 г. $M_w = 6.2$ (рис. 1). Оба сейсмических события ощущались на восточном побережье Камчатки с интенсивностью до 5 баллов. Движения в очагах трех этих землетрясений разнообразны (рис. 1, табл. 2), что характерно для промежуточного слоя сейсмофокальной зоны: наблюдаются как сбросовые (Жупановское землетрясение и

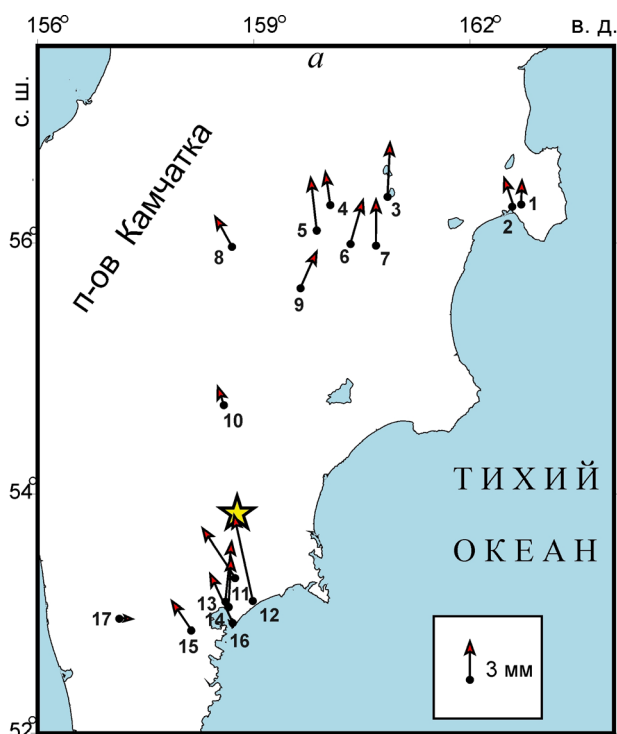
землетрясение 22.05.2006 г.), так и взбросовые подвижки (землетрясение 24.07.1983 г.).

Для выбора одной из возможных плоскостей разрыва Жупановского землетрясения был проведен анализ пространственного распределения афтершоков. Были построены проекции гипоцентров афтершоков на вертикальные плоскости, ориентированные перпендикулярно нодальным плоскостям $NP1$ и $NP2$. В первом случае (рис. 7а) азимут вертикальной плоскости $\alpha = 79^\circ - 90^\circ = -11^\circ$. Слабо выраженная тенденция к заглублению афтершоков в северном направлении (коэффициент детерминированности $R^2 = 0.03$) не соответствует углу падения нодальной плоскости $NP1$. Во втором случае (рис. 7б) азимут вертикальной плоскости $\alpha = 323^\circ - 90^\circ = -127^\circ$. Здесь тенденция к заглублению афтершоков в северо-восточном направлении более яркая (коэффициент детерминированности $R^2 = 0.22$) и соответствует углу падения плоскости $NP2$.

Предварительные результаты проведенного анализа эффектов направленности излучения P - и SH -волн Жупановского землетрясения также указывают на то, что разрыв произошел по второй (более пологой) плоскости $NP2$.

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ СМЕЩЕНИЯ ПО ДАННЫМ GNSS НАБЛЮДЕНИЙ

Камчатской региональной сетью постоянных GNSS (Global Navigation Satellite System)



наблюдений КФ ГС РАН (Левин и др., 2014) зафиксированы значимые статические косейсмические смещения, вызванные Жупановским землетрясением. Обработка GNSS наблюдений выполнялась пакетом GAMIT/GLOBK. Координаты пунктов региональной сети определялись по 110 опорным пунктам глобальной сети IGS (International GNSS Service). В результате были получены временные ряды среднесуточных координат GNSS пунктов с ошибками определения 1.5–2.5 мм в плане и 4–6 мм по высоте. Величина косейсмического смещения каждого GNSS пункта определялась как разность ординат концов прямых линейной регрессии, вычисленных по 10 суточным отсчетам до и после землетрясения (рис. 8, табл. 3). Для GNSS пунктов № 11–16, расположенных в 100–150 км к югу от эпицентра, направления и величины косейсмических смещений в целом согласуются с моделью дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве (Okada, 1985). Смещения более удаленных пунктов № 1–9, находящихся в ≥ 200 км к северу, хорошо соответствуют модели по горизонтальной компоненте, но для вертикальной компоненты результаты на таких эпицентральных расстояниях менее устойчивы.

МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

Службой сбора макросейсмических данных КФ ГС РАН было собрано и систематизировано

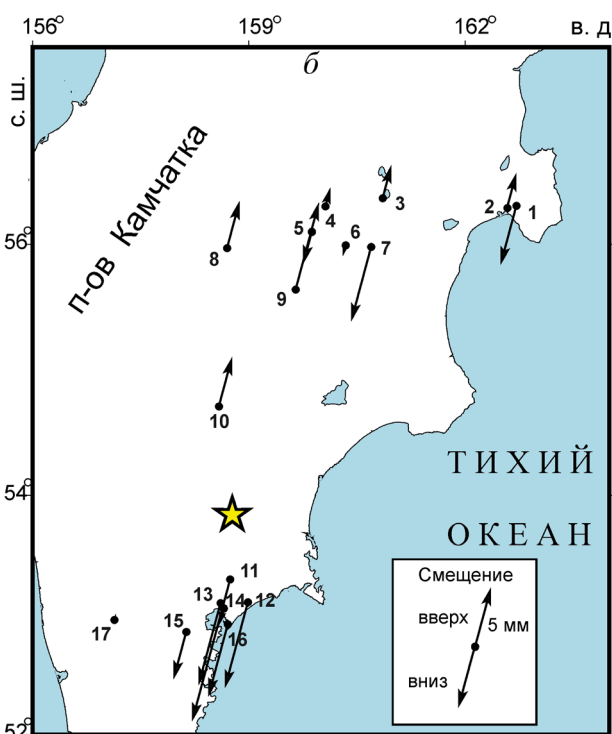


Рис. 8. Статические горизонтальные (а) и вертикальные (б) косейсмические смещения пунктов GNSS, вызванные Жупановским землетрясением $M_w = 7.2$. Для лучшего визуального представления вертикальные смещения повернуты. Звезда — эпицентр Жупановского землетрясения. Нумерация пунктов GNSS соответствует табл. 3.

Таблица 3. Статические косейсмические смещения камчатских GNSS пунктов, вызванные Жупановским землетрясением.

№	GNSS пункт	Широта, град. с. ш.	Долгота, град. в. д.	Направление смещения		
				на север, мм	на восток, мм	вверх, мм
1	_KBG	56.258	162.711	1.8 ± 2	0.1 ± 2	-4.9 ± 7
2	UKAM	56.264	162.592	2.0 ± 1	-0.7 ± 2	2.6 ± 8
3	KLUI	56.318	160.856	4.2 ± 2	0.2 ± 1	2.7 ± 4
4	MAYS	56.254	160.061	2.5 ± 2	-0.4 ± 2	1.4 ± 10
5	KOZS	56.057	159.872	4.1 ± 2	-0.5 ± 2	-2.4 ± 8
6	BZ07	55.952	160.342	3.4 ± 1	1.0 ± 1	-0.5 ± 6
7	BZGD	55.939	160.695	3.6 ± 2	0.0 ± 1	-6.2 ± 7
8	_ESI	55.930	158.696	2.3 ± 2	-1.3 ± 2	4.0 ± 5
9	ATLS	55.606	159.648	2.8 ± 1	1.3 ± 1	7.6 ± 8
10	MILI	54.679	158.584	1.4 ± 2	-0.5 ± 2	4.2 ± 17
11	AVCH	53.264	158.739	3.9 ± 2	-2.5 ± 2	-12.3 ± 10
12	RADZ	53.073	158.986	6.7 ± 2	-1.5 ± 2	-7.3 ± 6
13	PETR	53.066	158.606	4.7 ± 2	0.5 ± 4	-6.9 ± 8
14	PETS	53.023	158.650	3.8 ± 2	0.2 ± 2	-1.1 ± 9
15	KMSH	52.826	158.131	2.3 ± 2	-1.5 ± 2	-3.8 ± 8
16	MYAK	52.889	158.707	3.8 ± 1	-1.8 ± 2	-6.0 ± 6
17	APCI	52.925	157.133	-0.1 ± 1	1.0 ± 1	0.3 ± 4

Примечание. Погрешность соответствует среднеквадратичному отклонению.

216 сообщений респондентов о Жупановском землетрясении, в том числе 91 анкета была получена через интернет-опросник (<http://www.emsd.ru/lsopool/poll.php>). Из г. Петропавловска-Камчатского поступило 74 сообщения.

Наиболее сильные проявления Жупановского землетрясения зафиксированы на восточном побережье Камчатки (рис. 9). Сотрясения интенсивностью 6 баллов наблюдались в ближайшем к эпицентру пункте Калыгирь (место рыбалки, $\Delta = 67$ км), до 6 баллов — на кордоне Кроноки ($\Delta = 161$ км), маяке Круглый ($\Delta = 205$ км) и ГМС Водопадная ($\Delta = 236$ км). В пунктах центральной Камчатки, расположенных от эпицентра на расстоянии $\Delta = 75$ –300 км, сотрясения не превышали 4 баллов. В населенных пунктах западного побережья едва заметные проявления отметили отдельные жители поселков Усть-Большерецк ($\Delta = 218$ км), Октябрьский ($\Delta = 229$ км) и Тигиль ($\Delta = 436$ км).

На территории г. Петропавловска-Камчатского интенсивность сотрясений составила 4–5 баллов. Сообщения поступили от горожан, находившихся на момент землетрясения как в зданиях, на 1–5 этажах, так и на открытом воздухе. Люди отчетливо ощущали колебания различного характера продолжительностью до одной минуты: плавное покачивание, жесткую тряску, дрожание, продолжительные колебания с неравномерными перерывами. Сильно раскачивались висячие предметы, мебель и межкомнатные двери. Сдвигались и падали с полок небольшие легкие предметы. Испуганные покупатели в спешке покидали торговые центры.

На парковках заметно покачивались машины. Наблюдалось раскачивание кустов, деревьев и недостроенных металлоконструкций. Несколько человек отметили, что слышали подземный гул. Сильно беспокоились домашние животные. Часть респондентов жаловалась на головокружение, тошноту и головную боль. Около половины опрошенных испытали испуг, при этом некоторые в панике покинули помещение. Отметим, что лишь немногие, ощутив землетрясение, вставали в безопасное место.

Представляют интерес сообщения, полученные от двух независимых респондентов из района озера Калыгирь на восточном побережье Камчатки, где Жупановское землетрясение вызвало колебания с интенсивностью 6 баллов. Это ближайшее к эпицентру место ($\Delta = 67$ км), в котором в момент землетрясения находились люди.

Респондент 1 приехал с другими рыбаками на Калыгирь на тяжелом (около 400 кг) снегоходе с нартой. Снегоход стоял на снегу, на берегу, рядом находилась отстегнутая сваренная из металлических труб нарта с грузом. Люди, стоя на берегу, ощутили сильную тряску, неприятные толчки в ноги. С запада был слышен подземный гул. Снегоход и нарта начали подпрыгивать, и подпрыгнули примерно 7 раз сантиметров на 5, не сдвигаясь вбок. Землетрясение ощущалось в течение 1.5–2 мин.: сначала сильные вертикальные толчки в течение ~30 с, потом сильное поперечное раскачивание. Лед (толстый, больше метра) на лагуне Калыгирь пошел волнами, но трещин люди не заметили. Когда после землетрясения

ЖУПАНОВСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

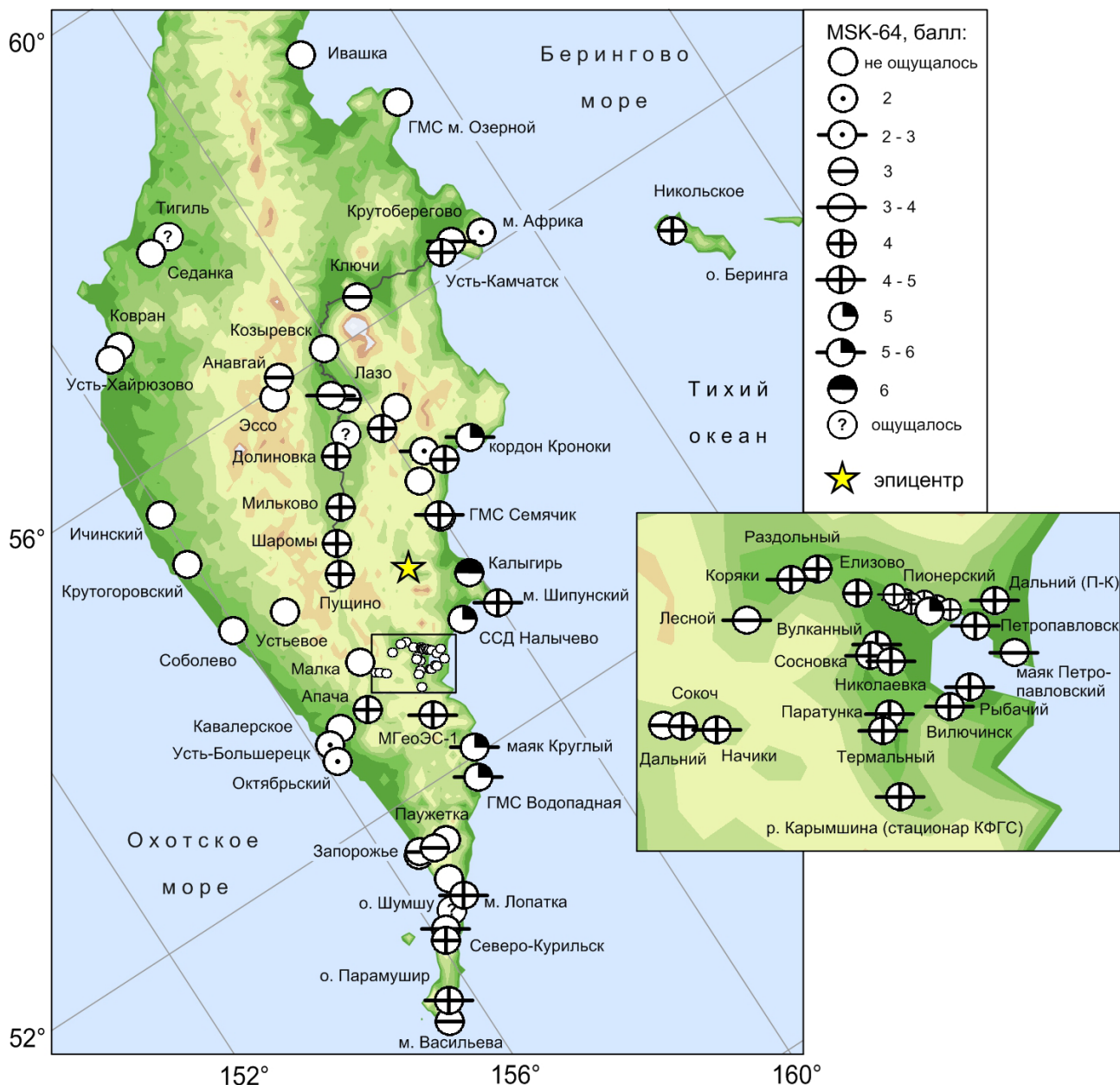


Рис. 9. Карта макросейсмического проявления Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. $M_w = 7.2$ в пунктах сбора макросейсмической информации на территории Камчатского края и Северных Курил по результатам опроса населения. На врезке — район г. Петропавловска-Камчатского.

рыбаки пробурили лунку, из нее ощущался запах сероводорода. Рыба не клевала.

Респондент 2 сначала услышал отчетливый гул, грохот, после ощутил слабые колебания, которые переросли в очень сильные толчки. Он с трудом удерживался на ногах, деревья качало в разные стороны. Землетрясение продолжалось около 2.5–3 мин. После землетрясения были замечены трещины на льду реки.

Таким образом, Жупановское землетрясение ощущалось на площади около 120 000 км² с интенсивностью сотрясений I от 2 до 6 баллов в 82 пунктах Камчатского края и Северных Курил, удаленных от эпицентра на расстоянии $\Delta = 60–500$ км. Оперативные оценки балльности, полученные

по инструментальным данным, находятся в хорошем соответствии с результатами опроса населения.

ПРЕДВЕСТНИКИ ЖУПАНОВСКОГО
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ДАННЫМ
КАМЧАТСКОГО ФИЛИАЛА
РОССИЙСКОГО ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА
ПО ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Жупановское землетрясение может рассматриваться как пример сильного сейсмического события, подготовка которого нашла отражение в параметрах различных геофизических полей. На Камчатке систематизация и экспертиза

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

прогностической информации о возможном сильном землетрясении возложена на Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС), который является структурным подразделением ГС РАН и функционирует с 1998 г. (Чебров и др., 2011).

По данным КФ РЭС перед Жупановским землетрясением в режиме реального времени и ретроспективно были выявлены предвестники, а три прогноза были признаны успешными (табл. 4).

Жупановское землетрясение предвараюсь снижением регионального уровня сейсмичности до экстремально низкого во временном окне 7 дней и до низкого в окне 15 дней в конце декабря 2015 г. — начале января 2016 г. (рис. 4). Такие аномалии перед сильными камчатскими землетрясениями отмечались и ранее, в частности, перед Майским роем 2013 г. $M \sim 6$ и землетрясениями 15.10.2012 г. $M_L = 6.0$, 20.02.2011 г. $M_L = 6.0$, 30.06.2010 г. $M_L = 6.3$ (Салтыков, Кравченко, 2012, 2013, 2014, 2015).

30.01.2016 г. в Северо-Камчатской части Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны на глубине 178 км произошло сильное, не вызвавшее разрушений землетрясение с магнитудой $M_w = 7.2$, ощущавшееся на территории Камчатского края с интенсивностью до 6 баллов по шкале MSK-64 и получившее название «Жупановское землетрясение» в соответствии с географическим положением его эпицентральной области.

В РИОЦ «Петропавловск» параметры Жупановского землетрясения были определены в режиме ССД и СПЦ в течение ~5 мин. в соответствии с регламентами этих служб. Тревога цунами не объявлялась. В течение 10 мин. после начала землетрясения по инструментальным данным была оценена интенсивность сейсмических колебаний в пунктах установки акселерометров, в результате чего МЧС оперативно получило полную картину сейсмического воздействия на территорию Камчатки и Северных Курил.

Таблица 4. Предвестники и успешные прогнозы Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. $M_w = 7.2$ по данным КФ РЭС.

№	Исполнитель, организация,	Методика, ссылки	Заключение КФ РЭС
1.	Г.Н. Копылова, КФ ГС РАН	Мониторинг вариаций уровня воды в скважинах (Копылова, 2009)	Успешный прогноз. Заключение о сейсмической обстановке от 28.01.2016 г.
2.	Г.И. Дружин, ИКиР ДВО РАН	Наблюдения за электромагнитным ОНЧ излучением (Дружин, 2002)	Успешный прогноз. Заключение о сейсмической обстановке от 28.01.2016 г.
3.	В.А. Гаврилов, ИВиС ДВО РАН	Мониторинг вариаций геоакустической эмиссии в глубокой скважине (Гаврилов В.А. и др., 2006)	Успешный прогноз. Заключение о сейсмической обстановке от 29.01.2016 г.
4.	П.П. Фирстов, КФ ГС РАН	Мониторинг концентрации подпочвенных газов (Фирстов, 2014)	Предвестник, выявленный в режиме реального времени. Заключение о сейсмической обстановке от 28.01.2016 г. Ошибка по положению гипоцентра.
5.	В.А. Широков, КФ ГС РАН	Алгоритм М6 (комплексный анализ сейсмологических данных) (Широков, 2001)	Предвестник, выявленный в режиме реального времени. Заключение о сейсмической обстановке от 28.01.2016 г. Ошибка по энергии землетрясения.
6.	Л.Б. Славина, ИФЗ РАН	Вариации отношения скоростей сейсмических волн V_p/V_s (параметр τ) (Славина, Мячкин, 2005)	Предвестник, выявленный в режиме реального времени. Заключение о сейсмической обстановке от 28.01.2016 г. Ошибка по положению гипоцентра.
7.	В.А. Салтыков, КФ ГС РАН	Мониторинг вариаций параметров приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума (Салтыков и др., 2008)	Предвестник, выявленный ретроспективно. Заключение от 25.02.1016 г.

Примечание. КФ ГС РАН — Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский; ИВиС ДВО РАН — Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; ИКиР ДВО РАН — Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край; ИФЗ РАН — Институт физики Земли РАН, г. Москва.

В оперативном режиме была проведена обработка и анализ афтершоков, двумя способами рассчитан механизм очага и собрана детальная макросейсмическая информация о проявлениях землетрясения. Выполнены оценки косейсмических смещений земной коры по данным GNSS наблюдений КФ ГС РАН. По конфигурации облака афтершоков и направленности излучения P - и SH -волн была выбрана плоскость разрыва и проведена оценка размеров очага Жупановского землетрясения (длина ~ 50 км, ширина ~ 25 км, что согласуется с представлениями о масштабах очага при $M \sim 7$).

Макросейсмический эффект Жупановского землетрясения, проявившийся в повышенной балльности на восточном побережье полуострова, характерен для камчатских землетрясений зоны субдукции, зафиксированных на глубине более 150 км. Макросейсмический эпицентр таких событий, как правило, смещен относительно инструментального эпицентра на восток к выходу на поверхность погружающейся Тихоокеанской плиты (Левина и др., 2010).

Особенностью Жупановского землетрясения является ярко выраженное сильное психофизиологическое воздействие на людей: продолжительные плавные колебания вызывали головокружение, тошноту и головную боль, испуг и даже панику.

По данным КФ РЭС перед Жупановским землетрясением были выявлены предвестники в режиме реального времени, а три прогноза были признаны успешными.

Рассматривая Жупановское землетрясение совместно с сильными землетрясениями 24.07.1983 г. и 22.05.2006 г., можно объединить их в единый пространственно-обособленный кластер на глубине ~ 200 км. Это позволяет поставить вопрос о существовании достаточно компактной сейсмогенерирующей зоны на эпицентральной расстоянии ~ 100 км к северу от Петропавловск-Камчатской городской агломерации.

По имеющимся данным пока нет оснований связывать Жупановское землетрясение с эпизодическими проявлениями активности Жупановского вулкана, наблюдавшимися в январе-феврале 2016 г.

Сейсмическая энергия, выделившаяся при Жупановском землетрясении, составила $5 \cdot 10^{15}$ Дж, что позволяет считать его одним из наиболее сильных сейсмических событий за время детальных наблюдений на Камчатке. Это редкое, но закономерное явление в сейсмическом процессе Северо-Западной Пацифики. Землетрясения с $M \sim 7$ происходят на Камчатке раз в 5–10 лет.

Расчет механизма очага Жупановского землетрясения на основе инверсии волновых форм широкополосных сейсмических записей выполнен за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00621).

- Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Титков Н.Н.* Механизм глубокого Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г. по статическим смещениям и широкополосным сейсмограммам // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 23–39.
- Гаврилов В.А., Власов Ю.А., Денисенко В.П.* и др. Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 44–53.
- Дружин Г.И.* Опыт прогноза Камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ излучением // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 51–62.
- Копылова Г.Н.* Оценка информативности равномерных наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 56–68.
- Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф., Титков Н.Н.* и др. Современные движения земной коры (СДКЗ) на Камчатке // Физика Земли. 2014. № 6. С. 17–36.
- Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю.* Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41–64.
- Левина В.И., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю., Иванова Е.И.* Тумрокское-I землетрясение 16 июня 2003 г. с $M_w=6.9$, $I_0=6$ и Тумрокское-II землетрясение 10 июня 2004 г. с $M_w=6.8$, $I_0=5-6$ (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии, 2004. 2010. С. 314–323.
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.
- Павлов В.М., Абубакиров И.Р.* Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 149–158.
- Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М.* Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения в России в 2010 г. 2012. С. 66–73.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М.* Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения в России в 2011 г. 2013. С. 67–74.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М.* Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения в России в 2012 г. 2014. С. 70–76.

- Салтыков В.А., Кравченко Н.М.* Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения в России в 2013 г. 2015. С. 73–79.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110–124.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В.* Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2005. № 3. С. 24–37.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Акбашев Р.Р.* Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 60–80.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А.* и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.
- Чебров В.Н., Дроздина С.Я., Сеников С.Л.* Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2013 году. 2015. С. 58–65.
- Шировов В.А.* Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996–2000 гг. с магнитудой $M = 6–7.8$ по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 95–116.
- Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // Tectonophysics. 1965. V. 2. № 6. P. 483–514.
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // BSSA. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.

В.Н. Чебров, Ю.А. Кугаенко,
И.Р. Абубакиров, С.Я. Дроздина,
Е.И. Иванова, Е.А. Матвеевко,
С.В. Митюшкина, Д.А. Ототюк,
В.М. Павлов, А.А. Раевская,
В.А. Салтыков, С.Л. Сеников,
Ю.К. Серафимова, А.А. Скоркина,
Н.Н. Титков, Д.В. Чебров
Камчатский филиал
Геофизической службы РАН