

Славина Л.Б.¹, Пивоварова Н.Б.¹, Левина В.И.²¹ Институт физики Земли РАН РФ, Москва, *slavina@ifz.ru*² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский**Введение**

Оценка состояния среды в очаговой зоне сильного землетрясения в период его подготовки, развития афтершокового процесса, а также восстановление состояния среды после затухания афтершоков мало изученная проблема. В работе рассматриваются результаты изучения трехмерного скоростного строения очаговой области Кроноцкого землетрясения за длительный период времени.

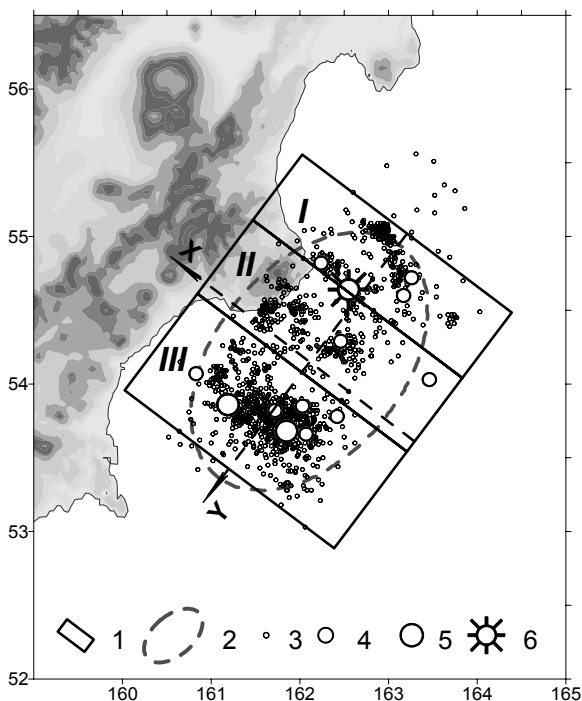
Нами впервые предпринята попытка восстановления поля скорости внутри очаговой зоны по временам пробега Р- и S-волн от афтершоков, зарегистрированных сейсмической сетью КФ ГС РАН. Авторы восстановили скоростное поле Р-волн в рассматриваемой зоне форшоков и афтершоков Кроноцкого землетрясения, используя методику обратимой волны [1-2]. Данная методика позволяет определять скорости сейсмических волн внутри области сгущения очагов по данным времен пробега от группы очагов до ряда сейсмических станций региона. Особенности методики расчета представлены в работах [3-5].

Согласно разработанной авторами методике были восстановлены и исследованы значения скорости V_p в очаговой зоне Кроноцкого землетрясения за длительный период времени. Рассматривались: период времени, предвещающий сильное событие, период развития афтершоков и их затухания; поле скоростей в последующие годы 1998 – 2004 гг.

Поле скоростей в очаговой зоне оказалось неоднородным. Выделены три участка: северо-восточный - область главного толчка и форшоков, центральный и юго-западный – область основных афтершоков, отличающиеся не только по характеру сейсмической активности, но и по значениям поля скоростей. Обнаружена также динамика скоростного поля Р-волн в выделенные периоды. В областях форшоков и сильных афтершоков в декабре 1997 г. скорость Р-волн оказалась ниже стандартных значений, в дальнейшем скорость возрастала.

Скоростное поле в очаговой области Кроноцкого землетрясения.

В работе использовалась декартова система координат с центром, совпадающим с центром эллипса облака афтершоков Кроноцкого землетрясения по данным работы [6]: $\varphi=54.15^\circ N$, $\lambda=162.1^\circ E$, оси системы координат совпадают с осями эллипса афтершоков. Положительное направление оси ОХ - на северо-запад, оси ОУ – на юго-запад.



В процессе изучения особенностей сейсмической активности и строения скоростного поля, были выделены три области, в которых определялась скорость Р-волн: I - северо-восточная, II - центральная, III - юго-западная. На рис 1 показано пространственное положение главного толчка, форшоков и афтершоков с $K_s \geq 13$, а также выделенные области. Рассмотрим результаты расчета поля скорости V_p в период развития форшоков, главного толчка и афтершоков в декабре 1997 г.

Рис. 1. Карта-схема района исследования очаговой зоны Кроноцкого землетрясения.

Условные обозначения: 1 – границы исследуемых областей,
2 – очаговая область землетрясения;
3 – эпицентры очаговой зоны;
4 – сильные афтершоки с $13.0 \leq K_s \leq 13.8$;
5 – сильнейшие афтершоки с $K_s \geq 13.9$;
6 – эпицентр главного толчка

Значения средней скорости и количество очагов, для которых удалось рассчитать скорость по выделенным областям, приведены в Таблице 1. Видны значительные различия в значениях средних скоростей, при практически одинаковой точности определения скорости - $\sigma(V_{sr})$. Наиболее низкие скорости - 6.05 км/с наблюдаются в области I. Напомним, что это область содержит форшоки и главный толчок.

Таблица 1. Количество точек n , средние скорости V_{sr} и их точность $\sigma(V_{sr})$ в слое 15÷35 км в период 3.12.97÷31.12.97 г.

	Область I	Область II	Область III
Кол-во точек n	121	147	229
Средняя скорость V_{sr} , км/с	6.05	6.34	6.25
Кол-во точек n	121	147	229
Точность определения скорости, $\sigma(V_{sr})$, км/с	0.06	0.05	0.04

В выделенных областях в различные интервалы времени, построены вертикальные разрезы. Данные о скорости V_p в области I в период с 3 по 20 декабря 1997 г. из-за мозаичности в распределении афтершоков и форшоков приведены в таблице 2. Значения скорости в слоях 5÷15 км 15÷35 км, как для форшоков, так и для афтершоков в выделенные временные периоды низкие.

Таблица 2. Значения средней скорости V_p и числа очагов n , в которых определена скорость в период 3.12.97÷20.12.97 в области I

Глубина	5÷15 км		15÷35 км	
	V_p , км/с	n	V_p , км/с	n
Форшоки 3.12.97 – 5.12.97	5.48	49	6.01	46
Афтершоки 5.12.97 – 20.12.97	5.72	8	6.06	26

Результаты расчета скорости V_p в области II по данным за период 3.12.97-20.12.97 показали типичное для фокальной зоны строение скоростного поля. В виде наклонной под углом в 45° структуры с близгоризонтальными изолиниями, с изменением скорости от 4.2 км/сек, до 6.5 км/сек на глубине около 30 км.

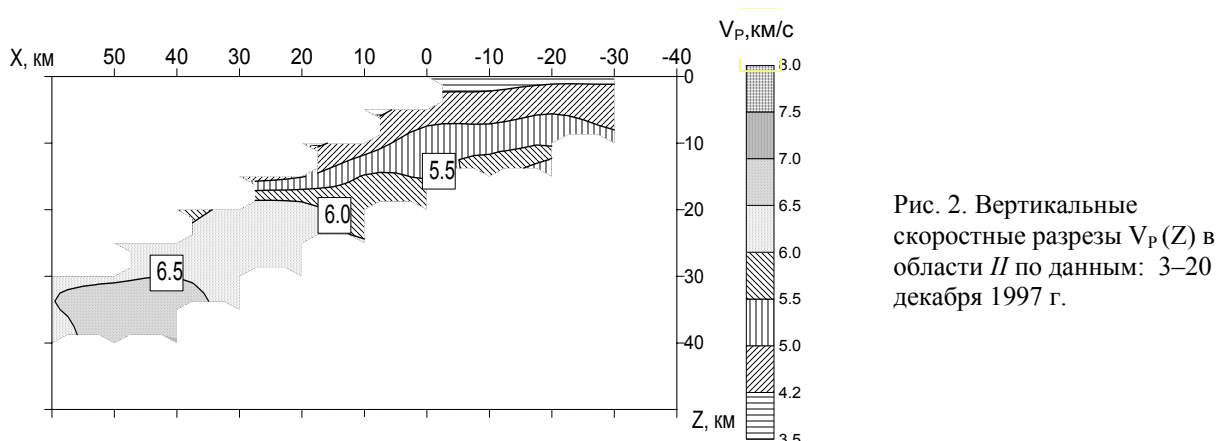


Рис. 2. Вертикальные скоростные разрезы $V_p(Z)$ в области II по данным: 3–20 декабря 1997 г.

Наиболее интересно проследить изменение поля скоростей в области III, где произошло максимальное количество афтершоков Кроноцкого землетрясения, а также здесь были зарегистрированы наиболее сильные афтершоки. На рис. 3 представлены результаты расчета поля скоростей в различные периоды времени:

- 1976÷1986 гг. – период, предшествовавший активизации очага Кроноцкого землетрясения;

б) декабрь 1997 г. – период наибольшей активности очага;

с) 1999÷2004 гг. – период спадания активности и выхода на фоновый режим.

Вертикальное сечение поля скоростей для первого интервала времени показано на рис. 3а. В диапазоне глубин 15÷40 км изолинии скорости близки горизонтальны. Значение $V_p=6.0$ км/с наблюдается на глубинах 15÷20 км. Далее на глубине 25÷40 км скорость растет до значений $V_p=7.0$ км/с. Глубже 40 км поле мозаично, с отдельными максимумами $V_p>7.5$ км/с

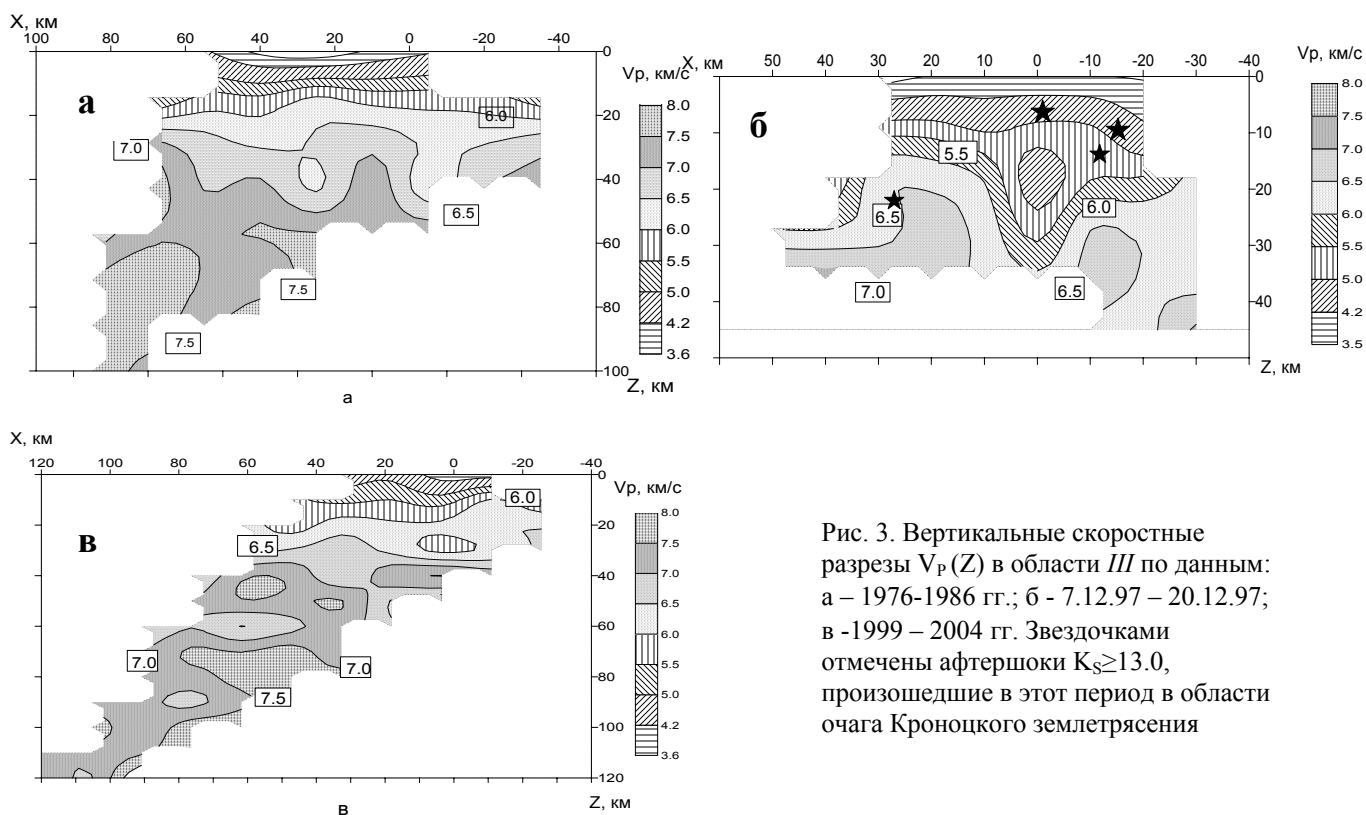


Рис. 3. Вертикальные скоростные разрезы $V_p(Z)$ в области III по данным: а – 1976-1986 гг.; б - 7.12.97 – 20.12.97; в - 1999 – 2004 гг. Звездочками отмечены афтершоки $K_s \geq 13.0$, произошедшие в этот период в области очага Кроноцкого землетрясения

В декабре 1997 г наблюдается сложно построенная структура поля (рис. 3б), с ядром низких значений скорости 5.5÷6.0 км/с, которые внедряются до глубин 35 км в поле более высоких значений 6.5÷7.0 км/с. Причем, изолинии скорости 5.5 км/с и 6.0 км/с внедряются в поле более высоких скоростей (6.5÷7.0 км/с) до глубины 30 км. По краям области изолиния скорости $V_p=7.0$ км/с наоборот поднимается до глубины 20 км. Именно к этой зоне приурочено самое сильное землетрясение этой области – землетрясение $K_s=14.2$ на глубине $Z=24$ км.

На вертикальном разрезе за период 1999-2004 гг. (рис.3в) мы видим совершенно другую картину поля. Изолиния $V_p=6.0$ км/с близки горизонтальна на глубине ~ 20 км, изолиния $V_p=6.5$ км/с - на глубине 30 км. Далее скорость растет до 7.5 км/с и выше. Приведенные разрезы свидетельствуют о значительной динамике поля скорости, которая вероятно, отражает процессы, происходящие в среде при подготовке и развитии сильных событий.

Представим далее результаты проведенных расчетов скорости Р-волн для всей очаговой области в виде горизонтальных сечений. Был выбран слой глубин 15÷35 км, на который приходится наибольшее количество данных в различные годы.

На рис. 4а приведена карта-срез поля V_p для этого интервала глубин за десятилетний период 1976-1986 гг. Наблюдается протяженная полоса со значениями скорости больше $V_p=6.5$ км/сек. С северо-запада и юго-востока она ограничена полем низких скоростей. Наблюдается мозаичность поля. Будущий главный толчок приурочен позиционно к градиентной зоне. Морфология поля отличается от скоростного поля, приведенного на рис. 4б, полученного в период развития очагового процесса с 5 по 31 декабря 1997 г.

Очаги не заполняют весь прямоугольник в горизонтальной плоскости, поэтому осреднение скорости в горизонтальном сечении требует заполнения пустых узлов сетки средним значением скорости для выделенного слоя. В пустых узлах, там, где не было реальных землетрясений, проставлено значение средней скорости 6.35 км/с, вычисленное по всему массиву данных. Поле скорости Р-волн неоднородно. Выделяются области повышенных и пониженных

скоростей, относительно средней скорости (звездочками отмечены афтершоки $K_s \geq 13$ произошедшие в этот период на глубинах $10 \div 40$ км). Наиболее сильные события приурочены к зонам перехода высоких и низких скоростей, т.е. к градиентным зонам. Ряд афтершоков пространственно связан с областями пониженных скоростей в пределах значений $6.0 \div 6.3$ км/с.

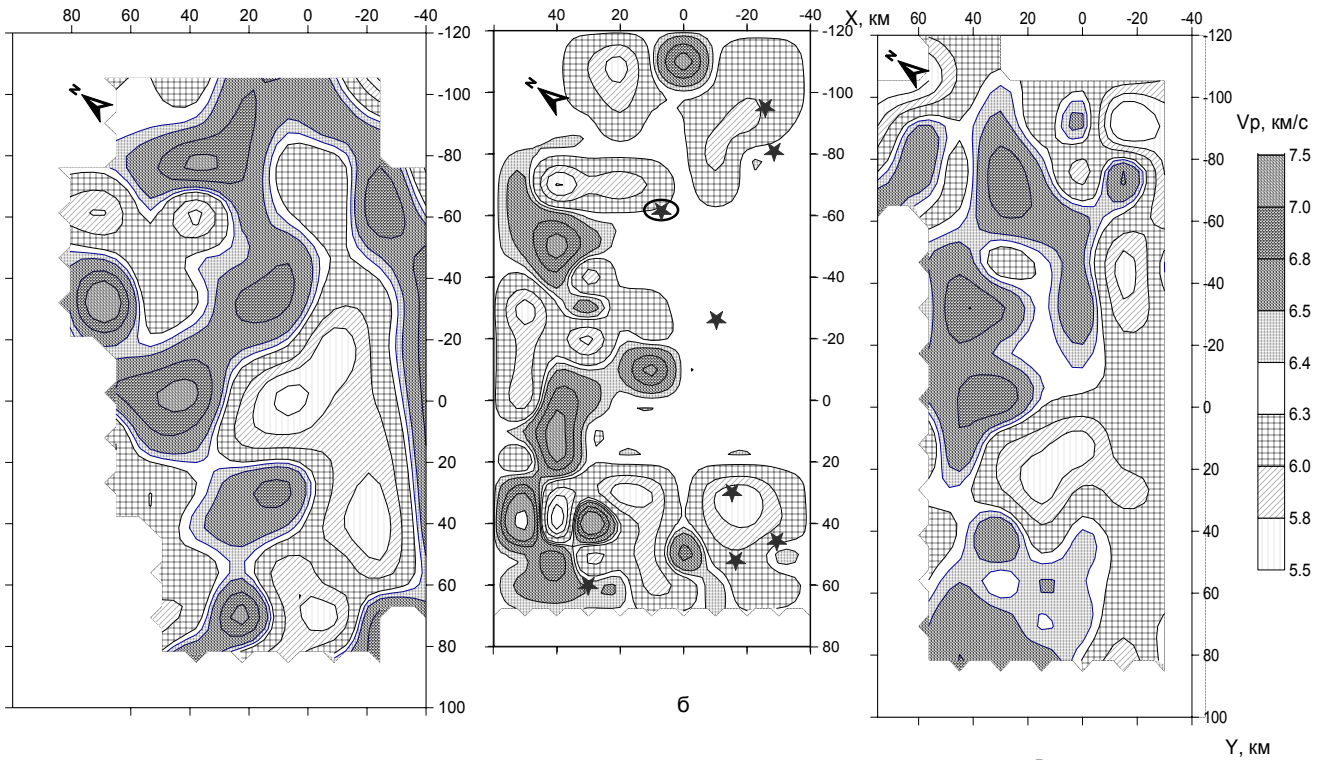


Рис. 4. Изолинии скорости Р-волн в слое $15 \div 35$ км по данным: а – 1976-1986 гг., б – декабрь 1997 г., в – 1999-2004 гг.

Пониженные скорости и небольшое пятно повышенных скоростей на северо-западе области пространственно соотносятся с местоположением форшоков. Главный толчок (звездочка, заключенная в овал) расположен между двумя низкоскоростными полями. Отсутствие значительной афтершоковой активности в его окрестности может быть вызвано сильным разрушением среды в его окрестности и снятием напряжений при землетрясении такой силы.

Для сравнения на рис. 4в приведена карта-срез поля V_p для того же интервала глубин $15 \div 35$ км за период 1999-2004 гг.

Мы видим, что скоростное поле изменилось по сравнению с декабрем 1997 г. Следует отметить, что поле скорости как бы восстанавливается, появляются высокоскоростные области, близкие по структуре к полю скорости за интервал времени 1976-1986 гг.

В связи с выявленной динамикой поля скорости рассчитаны среднегодовые величины скорости для I, II, III областей за период 1971-2005 гг. В качестве примера рассмотрим изменение среднегодовых значений скорости во времени в I области (главного толчка и форшоков) в слое $15 \div 35$ км (рис. 5).

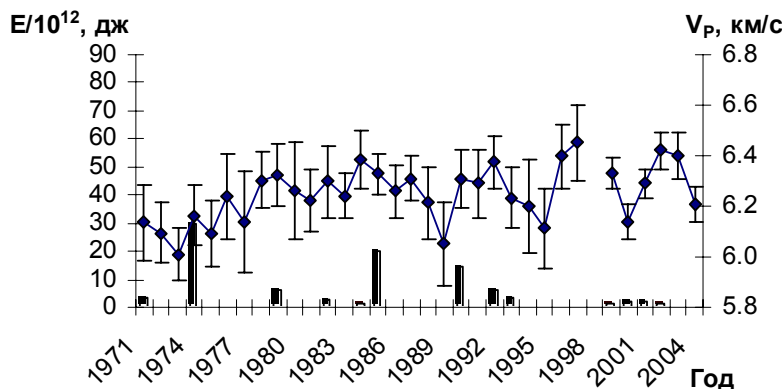


Рис. 5. График изменения среднегодовых значений скорости и выделенной энергии в слое $15 \div 35$ км в I зоне очаговой области Кроноцкого землетрясения. Точками отмечены среднегодовые значения скорости, показаны среднеквадратичные отклонения от среднего. Столбиками показаны среднегодовые значения выделенной в регионе сейсмической энергии.

На рис.5 приведены суммарная выделенная энергия для землетрясений с $K_s \geq 12$ и среднегодовые значения скорости в слое 15÷35 км для области I. Значения скорости дополнены величинами ее среднеквадратического отклонения σ_1 . Среднее значение σ_1 по всему периоду - 0.12 км/с, среднее количество точек в слое 15÷35 км составляло 26 точек в год, однако в отдельные годы среднеквадратический разброс значение скорости достигает 0.2 км/с, при этом количество точек, в которых была определена скорость в эти годы составляло менее 20 штук. Скорость не остается постоянной во времени. Чередуются периоды роста скорости и спада. В 1971–1973 гг. наблюдается падение скорости от 6.15 км/с до 6.0 км/с; в 1974–1984 гг.- медленный рост (величина скорости достигла 6.4 км/с); в 1985–1989 гг. вновь падение скорости до минимального значения 6.05 км/с; 1992 г. - вновь начинается рост кривой до значения 6.4 км/с; далее падение скорости до 6.1 км/с в 1995 г. На фоне описанного изменения кривой скорости, на выходе ее из минимумов в I области происходят землетрясения с $K_s \geq 13$ в 1974, 1985, 1990 гг.

Таким образом, скорость в исследуемой области не остается постоянной во времени. Причина такого поведения скорости требует дальнейших исследований. Возможно, что это реакция среды на изменения поля напряжений.

Заключение

Проведенные исследования скоростного строения очаговой зоны сильного Кроноцкого землетрясения за длительный период времени до его формирования, в период развития афтершокового процесса и после его завершения показали чрезвычайно важный факт изменения скорости V_p во времени. Это важно, как для изучения динамики самого процесса формирования и развития очаговой зоны сильного события, так и для исследования строения и состояния среды.

Скорость претерпевает изменения как за длительный период времени, предварающий сильное событие, так и в период его развития, т.е. в афтершоковый период, а также в последующий временной интервал затухания процесса активизации.

В зонах активизации отмечены низкие, по сравнению со стандартными на этих глубинах значения скорости и их проникновение на большие глубины.

Развиваемая авторами методика восстановления поля скорости по временам пробега P- и S-волн от слабых землетрясений, основанная на инверсии объемных волн, а также использование разностного принципа для восстановления фронта волны и скорости его перемещения дает хорошие результаты в областях концентрации очагов землетрясений в зонах сейсмической и вулканической активизации.

Установлено, что очаговая зона Кроноцкого землетрясения сложно построена и представляет собой три отличающиеся друг от друга области, как по развитию сейсмического режима, так и по морфологии и динамике поля скоростей.

Результаты расчетов поля скоростей свидетельствуют об отсутствии единой очаговой зоны, т.е. единого разрыва. А главный толчок и его два сильнейших афтершока, произошедших на юго-западе через 9 мин. и 7 ч. после главного события, вполне вероятно представляют собой самостоятельные землетрясения, произошедшие на Юго-западной границе подвинувшегося блока Тихоокеанской плиты в процессе перераспределения напряжений после главного толчка. Они не ограничивают, как обычно предполагают, конец разрыва в очаге, а произошли в процессе перераспределения напряжений, после главного толчка и приурочены к поперечной структуре, являющейся самостоятельным разрывом и границей активизировавшегося блока, что вполне соответствует «клавишной модели» фокальной зоны.

Список литературы

1. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Левина В.И. Исследование скоростного строения очаговой области Кроноцкого землетрясения 1997 г. ($M_w=7.8$, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 4. С. 1-10.
2. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Левина В.И. Динамика поля скоростей P-волн в очаговой области Кроноцкого землетрясения 1997г. // Геофизические исследования. М.: ИФЗ РАН, 2006. №6. С 35-45.
3. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Гарагаш И.А., Левина В.И. Трехмерная скоростная модель среды и поле напряжений района Карымского вулканического центра // Физика Земли. 2004. № 7. С. 13-24.
4. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Левина В.И. Использование сейсмологических данных для изучения скоростного строения активной вулканической зоны // Вулканология и сейсмология. 2005. № 2. С. 45-56.
5. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б. Восстановление скоростного поля в областях повышенной сейсмической и вулканической активности // Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 67-72.
6. Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с $M_w=7.8$, $I_0=8$ (Камчатка). // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 251-271.