



Казахский Национальный Исследовательский Технический  
Университет,  
Институт Геологии и Нефтегазового Дела  
Кафедра “Геофизики”

# Сейсмогеофизические предвестники и стратегия прогнозирования землетрясений

## Лекция 14

Сейсмические предвестники. Характеристика  
сейсмических волн и состояние среды очагов  
землетрясений Северного Тянь-Шаня

По материалам: Мамбетсадыкова А.А., Омуралиева А. М.,  
Омуралиев М. (2019)

Преподаватель: Абетов Ауэз Егембердыевич – профессор,  
доктор геол.-мин. наук, академик НАН РК

# Введение

## Характеристика сейсмических волн и состояние среды очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня

На территории Северного Тянь-Шаня в области сочленений Тянь-Шаньского орогена и Казахского щита расположен ряд устойчивых поднятий: Кыргызское, Суусамыртооское, Заилийское, Кунгейское, Терскойское, разделённых межгорными впадинами - Чуйская, Кемино-Чиликская, Иссык-Кульская, Кочкорская, Суусамырская.

В данном регионе проявились такие сильные землетрясения, как Беловодское (1885 г.,  $M=6.9$ ), Верненское (1887 г.,  $M=7.3$ ), Чиликское (1889 г.,  $M=8.3$ ), Кеминское (1911 г.,  $M=8.2$ ), Кемино-Чуйское (1938 г.,  $M=6.9$ ), Сарыкамышское (1970 г.,  $M=6.8$ ), Жаланаш-Тюпское (1978 г.,  $M=6.6$ ), Суусамырское (1992 г.,  $M=7.3$ ). Все эти сейсмособытия изучались на основе данных аналоговых станций.

В 1991 г. на территории Кыргызстана были установлены 10 цифровых сейсмических станций сети KNET (Kyrgyzstan Telemetered Network, США), а в 2011 г. зарегистрирована новая сеть цифровых станций KRNET (Kyrgyz Republic Digital Network), принадлежащая Институту сейсмологии НАН КР (ИС НАН КР), что позволило улучшить уровень обработки данных по землетрясениям (рисунок 1).

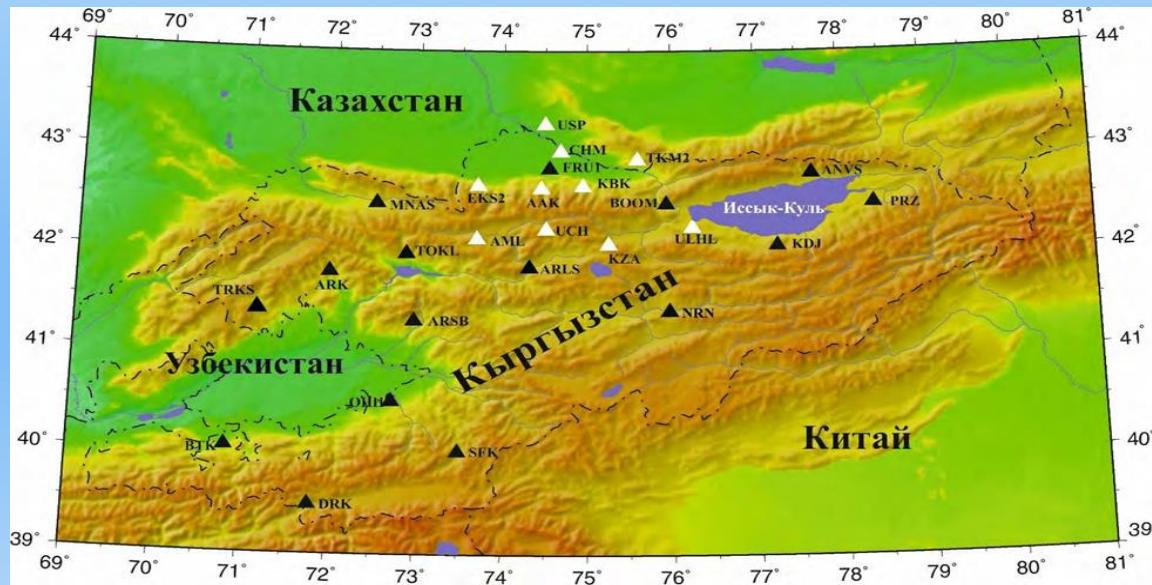


Рисунок 1. Карта-схема сети сейсмического мониторинга ИС НАН КР. Сейсмические станции сети KNET (НС РАН) обозначены белыми треугольниками, а станции сети KRNET - чёрными треугольниками

# Введение

Сейсмические волны являются фундаментальными характеристиками состояния среды в области источника. Так, амплитуда и период сейсмических волн позволяют определить магнитуду и энергию землетрясений. Полярность первого импульса продольной (Р) волны является основой изучения механизма очага.

Разработана теория излучения упругих волн точечными источниками. Построены теоретические модели с разными системами сил в точечном источнике.

Бениофф, Пресс, Смит [1961] отметили, что в очаге происходит распространение разрушения. При этом сейсмические волны генерировались движущимся очагом конечных размеров, и предельная скорость распространения разрушения зависела от скорости сдвиговых волн.

В спектрах объёмных волн выделена угловая частота и установлен масштабный закон спектральной плотности сейсмических смещений в дальней зоне от землетрясений с различными магнитудами.

Брюн Д.Н (1970) изучил временную зависимость смещения в очаге и получил формулу:

$$u(t) = (\sigma/\mu) \beta \tau (1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

где  $\sigma$  - эффективное напряжение,  $\mu$  - жёсткость (модуль сдвига),  $\beta$  - скорость сдвиговых волн,  $\tau$  - константа времени.

Константа времени представляет собой:

$$\tau \sim a/\beta, \quad (2)$$

где  $a$  - эквивалентный радиус поверхности разлома. Величина  $(\sigma/\mu) \beta = u_0$  представляет собой начальную скорость частицы. Следует отметить, что отношение  $(\sigma/\mu)$  связано отношением сейсмической энергии (Е) и сейсмического момента (М<sub>0</sub>) по формуле:

$$E/M_0 = 1/2(\sigma/\mu). \quad (3)$$

В дальнейшем на основе разработки Брюна определялись динамические параметры очага землетрясения.

В очаговых спектрах отмечены два типа [Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Кунакова О.К., 1990]: простые с одной угловой частотой и вторые, где выделяются две угловые частоты. При этом спектр второго типа выражает главную часть очага и субочага.

# Введение

одной угловой частотой и вторые, где выделяются две угловые частоты. При этом спектр второго типа выражает главную часть очага и субочага.

Результаты работ многих исследователей обобщены в создании физической основы моделей прогноза землетрясений: модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. (1975)] и дилатантно –диффузионной (ДД) модели [Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwai J.P., 1973; Anderson L.D., Whitcomb J.H., 1973].

В ДД-модели изменение давления внутрипоровой жидкости в дилатирующей области является обязательным условием возникновения землетрясения. В ЛНТ модели при подготовке землетрясения происходит постепенный переход от объёмного дисперсного разрушения к локализованному независимо от наличия или отсутствия внутрипоровой жидкости.

Эти модели показывают, что существуют неопределённости в физических состояниях среды и их динамики. Касахара К [1985] отметил, что при построении будущих более совершенных моделей должны быть учтены основные физические свойства среды очага. Соответственно, изучение физических состояний среды и динамики этих состояний является актуальной проблемой сейсмологии.

## Методика исследований и фактический материал

По данным цифровых сейсмических станций сетей KRNET и KNET в Центре обработки данных ИС НАН КР определяются основные параметры сейсмических волн: продольной волны - по записям Z-вертикальной компоненты, поперечной волны - по записям одной из компонент.

Кроме того, оцениваются значения rms- среднеквадратическое отклонение времени пробега наблюдённых и вычисленных (погрешность), se-стандартное отклонение от времени вступления, d- класс точности определения эпицентра, she – 68% -ный доверительный интервал в определении положения эпицентра и т.д.

Составляются карточки (буллетень) каждого землетрясения. Но следует отметить, что в оценке глубины ещё существует неопределённость.

При проведении исследований нами были выбраны такие землетрясения, для которого в окружении находилось не менее 3-х цифровых станций, среднеквадратическое отклонение времени пробега «rms»

# Методика исследований и фактический материал

равнялось 0.1, класс точности определения эпицентра «d» равнялся 1, массивы горных пород были близки по составу. При этом должно быть соблюдено условие, что ближайшая станция должна быть расположена на расстоянии менее 55-60 км.

Основой методики исследований являются нижеследующие положения:

- землетрясение приурочено к активному разлому, где происходит динамическая сегментация;
- очаг землетрясения формируется в области между аномальными территориями с большой концентрацией (плотностью) сейсмогенных разрывов;
- очаги землетрясений разной величины в определённом геодинамическом районе взаимосвязаны и, в их последовательности проявления, отмечается иерархия сейсмических циклов (относительно короткопериодным циклам характерны землетрясения малой величины, а циклам относительно длинным – крупные события);
- на спектрах сейсмических волн очага землетрясения выделяются наряду с угловой частотой множество характерных частот с относительно высокими спектральными плотностями (характерные частоты выражают системы разрывов в очаге со свойственными величинами сейсмического момента);
- скорости сейсмических волн очага  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  выражают проявления, в частности, флюидов, частичного плавления, высокого давления (малые значения  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  выражают проявление флюидов, малые значения  $V_p$ ,  $V_s$ , но большое значение  $V_p/V_s$  – частичное плавления, большие значения  $V_p$ ,  $V_s$  – высокое давление в дискретной среде очага);
- сейсмический параметр Адамс-Вильямсона позволяет определить вероятную величину приращения давления при заданном приращении плотности среды в очаге;
- слежение очагов землетрясений со свойственными особенностями сейсмических волн во времени и пространстве дает возможность изучить взаимосвязь физических состояний среды в очагах в новом измерении.

# Результаты исследований и обсуждение

Рассмотрим последовательность очагов землетрясений, произошедших с 01 по 28 января 2013 г. и с 28 января по 28 февраля 2013 г., т.е. до и после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.  $K=15.1$ ), произошедшего на Северном Тянь-Шане.

Количество рассмотренных очагов землетрясений составляло 42 - до события и 40 - после. Составлены индивидуальные годографы с достоверностью аппроксимации  $R^2>0.98$ , определены скорости  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  сейсмических волн очагов землетрясений.

На рисунке 2 приведён график изменения скорости  $V_p$  во времени для 42 сейсмособытий за период с 1 по 28 января 2013 г. Значения  $V_p$  изменялись от 5.73 км/сек до 7.3 км/сек. При этом среднее значение составляло около  $C=6.35$  км/сек, а стандартное отклонение -  $S=0.41$  км/сек (табл.1).

Значение	$V_p$	$V_s$	$V_p/V_s$	Коэффициент Пуассона	Сейсмический параметр
<b>C</b>	6.35	3.68	1.72	0.245	<b>22.355</b>
<b>S</b>	0.41	0.22	0.06	0.025	<b>3.728</b>
<b>C+S</b>	6.76	3.90	1.78	0.27	<b>26.113</b>
<b>C-S</b>	<b>5.94</b>	<b>3.46</b>	<b>1.66</b>	<b>0.22</b>	<b>18.657</b>

Таблица 1. Средние значения (C) скоростей сейсмических волн ( $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ ), коэффициента Пуассона  $\sigma$ , сейсмического параметра  $\Phi(\text{км}^2/\text{с}^2)$  очагов землетрясений и стандартное отклонение (S) их вариаций за 01-28 январь 2013 г.

Длительность периода циклов третьего порядка составляет 1.4 - 5.4 сутки, циклов второго порядка – 9.5 - 10.4 сутки. Максимальные пики скорости цикла второго порядка проявились: 8, 18 и 22 января 2013 г., а в 01 час 27 января 2013 г. зафиксирована аномально низкая пика скорости –  $V_p = 5.73$  км/с, а через 39 часов (28 января 2013 г. в 16 часов) произошло сильное землетрясение Сарыджаз-Каркыра ( $K=15.1$ ), продольная скорость волны очага которого составила  $V_p = 5.86$  км/с.

# Результаты исследований и обсуждение

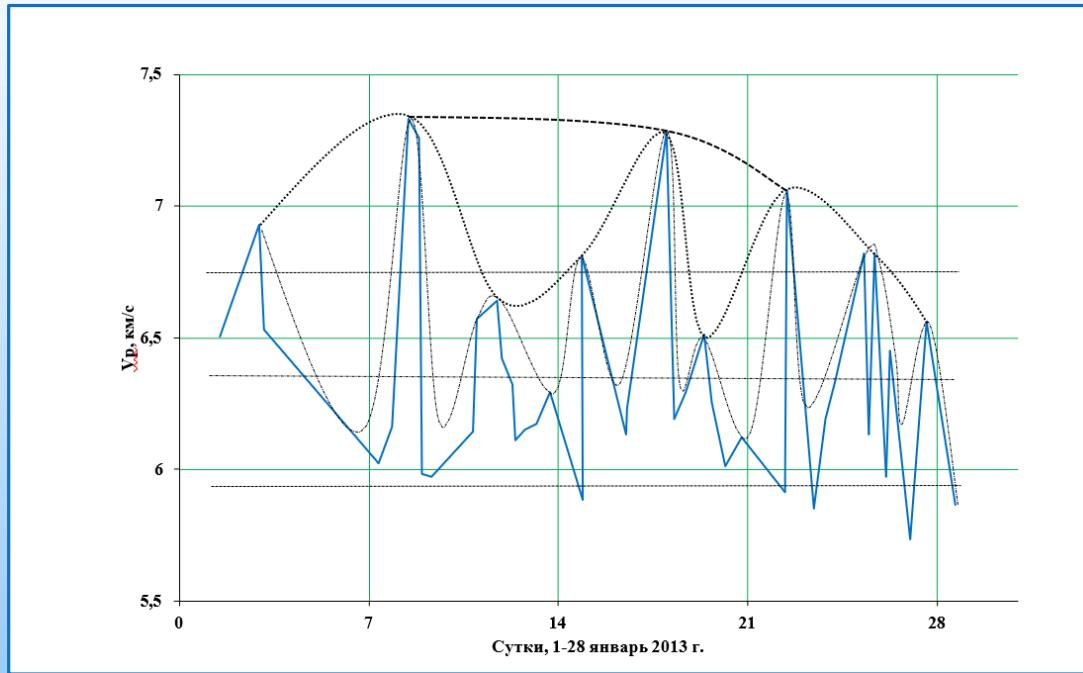


Рисунок 2. График вариации скорости продольных сейсмических волн  $V_p$  очагов Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\varphi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ). Горизонтальной линией обозначено среднее значение - С. Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка; пунктирной линией – цикл вариации первого порядка.

Результаты слежения скорости поперечной волны  $V_s$  очагов Северного Тянь-Шаня за период 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) приведено на рисунке 3.

# Результаты исследований и обсуждение

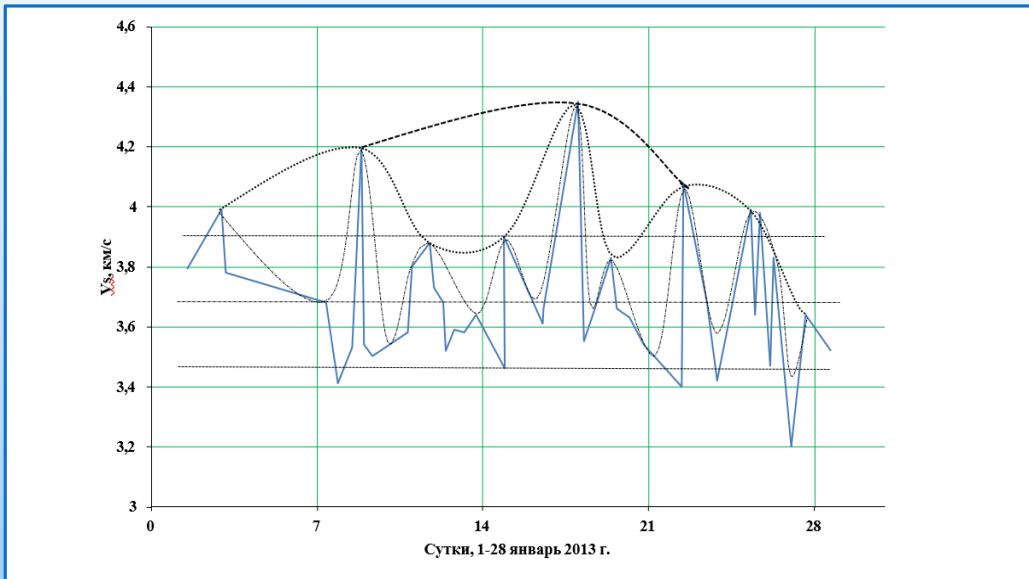


Рисунок 3. График вариации скорости поперечных сейсмических волн  $V_s$  очагов Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ). Горизонтальной линией обозначено среднее значение - С. Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка; пунктирной линией – цикл вариации первого порядка.

Значения  $V_s$  изменялось от 3.20 км/сек до 4.35 км/сек. При этом среднее значение - около  $C=3.68$  км/сек и стандартное отклонение -  $S=0.226$  км/с (см. табл.1). На графике вариации  $V_s$  отмечается иерархия асимметричных циклов. Сначала определяются циклы, в частности третьего порядка, при значении  $V_s \geq 3.5$  км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ).

По пикам циклов третьего порядка  $V_s \geq 3.52$  км/с выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка  $V_s \geq 4.08$  км/с аналогично отмечается цикл первого порядка.

Длительность периода циклов третьего порядка составляет около 1.6 - 5.9 сутки, циклов второго порядка – 4.5 - 9.2 сутки. Максимальные пики цикла второго порядка проявились 8, 18 и 22 января 2013 г. В 01 час 27 января 2013 г. отмечалась аномальная низкая скорость  $V_s = 3.2$  км/с, а при землетрясении Сарыджаз-Каркыра ( $K=15.1$ ) скорость поперечной волны его очага составляла  $V_s = 3.52$  км/с.

# Результаты исследований и обсуждение

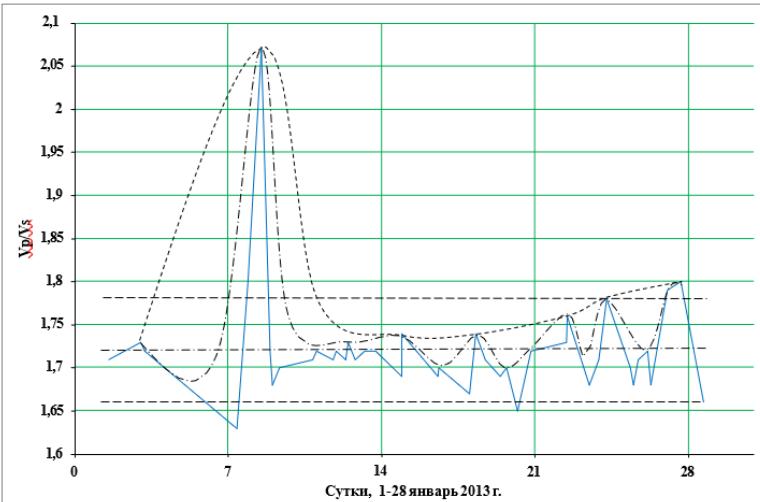


Рисунок 4. График вариации величины  $V_p/V_s$  очагов Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\varphi=41.5^\circ-43.5^\circ$  с.ш.,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$  в.д. за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ). Горизонтальной линией обозначено среднее значение - С. Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка.

На рисунке 4 приведено изменение величины  $V_p/V_s$  во времени. Значения  $V_p/V_s$  изменялись от 1.63 до 2.07. При этом среднее значение составило около  $C=1.72$ , стандартное отклонение –  $S = 0.065$  (см. табл.1).

На графике вариации  $V_p/V_s$  сначала определяются циклы третьего порядка при значении  $V_p/V_s \geq 1.68$  на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ). По пикам циклов третьего порядка  $V_p \geq 1.74$  выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда.

Аномальная максимальная величина  $V_p/V_s = 2.07$  отмечалась 08.01.2013 г. Длительность периода циклов третьего порядка составляет около 1.8-5.4 сутки, циклов второго порядка - около 20.2 сутки

Малые значения  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  выражают проявление флюидов, малые значения  $V_p$ ,  $V_s$ , но большое значение  $V_p/V_s$  – частичное плавление, большие значения  $V_p$ ,  $V_s$  – высокое давление в среде.

Результаты оценки состояния среды очагов землетрясений (проявление флюидов, частичное плавление, высокое давление в дискретной среде очагов) на территории Северного Тянь-Шаня за период с 1 по 27 января 9

# Результаты исследований и обсуждение

2013 г., т.е. перед сильным землетрясением Сарыджаз-Каркыра, приведены на рисунке 5 и в таблице 2.

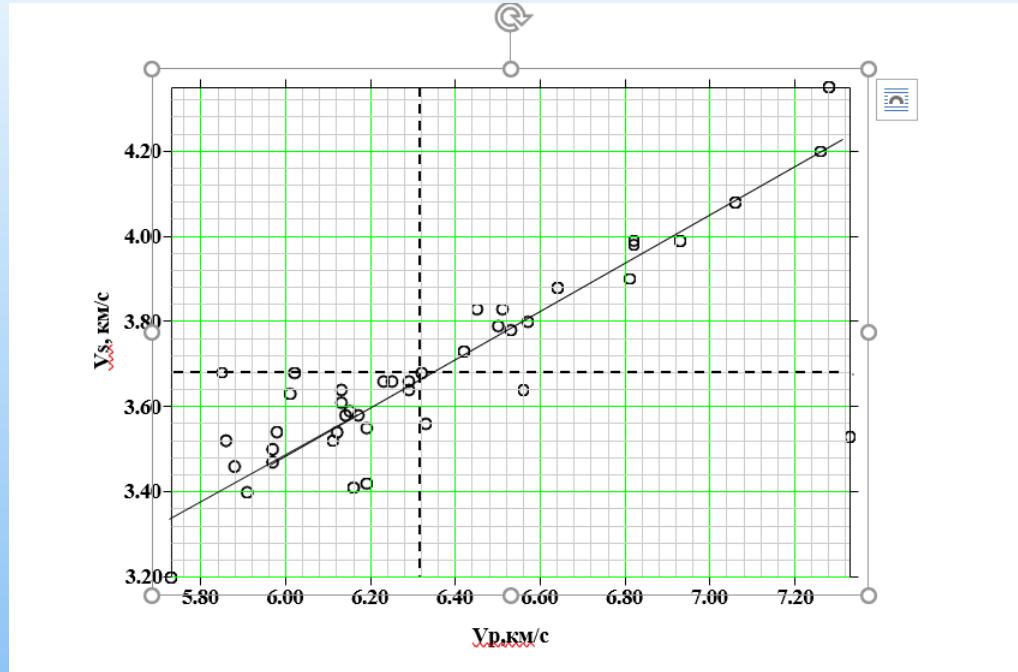


Рисунок 5. Соотношение между VP, VS, VP/VS очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\varphi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. до землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г., K=15.1) за 01-28 январь 2013 г. Кружочками обозначены наблюдённые значения VP/VS. Значение VP/VS = 1.72 выделено диагональной сплошной линией. Выше этой линии выделяются параллельные линии, где кружочки имеют малые значения  $VP/VS < 1.72$ , а ниже данной линии отмечаются параллельные линии, где кружочки имеют большие значения  $VP/VS > 1.72$ . Среднее значение VP = 6.35 км/с обозначено вертикальной штрихованной линией. Среднее значение VS = 3.68 км/с обозначено горизонтальной штрихованной линией.

# Результаты исследований и обсуждение

Таблица 2. Состояние среды, в частности проявление флюидов, частичного плавления, высокого давления в очагах землетрясений Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^\circ - 43.5^\circ$  с.ш.,  $\lambda=72^\circ - 80^\circ$  в.д. за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз- Каркыра (28.01.2013 г., K=15.1).

Год	Месяц	Число	Час	Минута	Секунда	Vp, км/с	Vs, км/с	Vp/Vs	Состояние среды
2013	1	1	12	42	31	6.5	3.79	1.71	
2013	1	2	23	45	45	6.93	3.99	1.73	Высокое давление
2013	1	3	4	5	25	6.53	3.78	1.72	
2013	1	7	9	4	25	6.02	3.68	1.63	Флюиды
2013	1	7	21	34	35	6.16	3.41	1.8	Частичное плавление
2013	1	8	11	58	41	7.33	3.53	2.07	
2013	1	8	21	14	39	7.26	4.2	1.72	
2013	1	9	0	4	59	5.98	3.54	1.68	Флюиды
2013	1	9	8	24	57	5.97	3.5	1.7	Флюиды
2013	1	10	20	39	16	6.14	3.58	1.71	Флюиды
2013	1	11	0	30	42	6.57	3.8	1.72	
2013	1	11	18	34	32	6.64	3.88	1.71	
2013	1	11	22	24	17	6.42	3.73	1.72	
2013	1	12	8	16	24	6.32	3.68	1.71	
2013	1	12	10	53	32	6.11	3.52	1.73	Частичное плавление
2013	1	12	19	1	26	6.15	3.59	1.71	
2013	1	13	5	25	46	6.17	3.58	1.72	
2013	1	13	17	14	45	6.29	3.64	1.72	
2013	1	14	22	4	5	5.88	3.46	1.69	Флюиды
2013	1	14	21	50	29	6.81	3.9	1.74	
2013	1	16	13	11	3	6.13	3.61	1.69	Флюиды
2013	1	16	14	4	16	6.23	3.66	1.7	
2013	1	18	0	22	59	7.28	4.35	1.67	
2013	1	18	7	11	9	6.19	3.55	1.74	Частичное плавление
2013	1	18	17	44	43	6.29	3.66	1.71	
2013	1	19	9	54	32	6.51	3.83	1.69	
2013	1	19	16	29	53	6.25	3.66	1.7	

# Результаты исследований и обсуждение

2013	1	20	4	31	39	6.01	3.63	1.65	Флюиды
2013	1	20	19	41	11	6.12	3.54	1.72	
2013	1	22	10	5	45	5.91	3.4	1.73	Частичное плавление
2013	1	22	11	21	16	7.06	4.08	1.76	
2013	1	23	22	1	59	6.19	3.68	1.68	
2013	1	23	11	5	44	5.85	3.42	1.71	Флюиды
2013	1	24	6	13	58	6.33	3.56	1.78	Частичное плавление
2013	1	25	8	17	16	6.82	3.99	1.7	
2013	1	25	11	57	22	6.13	3.64	1.68	Флюиды
2013	1	25	17	15	32	6.82	3.98	1.71	
2013	1	26	3	16	20	5.97	3.47	1.72	Флюиды
2013	1	26	7	7	31	6.45	3.83	1.68	
2013	1	27	1	9	0	5.73	3.2	1.79	Частичное плавление
2013	1	27	15	22	19	6.56	3.64	1.8	
2013	1	28	16	38	53	5.86	3.52	1.66	Флюиды

Из таблицы 2 следует, что проявление высоких давлений отмечалось 02.01.2013 г. Далее в последовательности очагов землетрясений рассматриваемого региона наблюдались чередования проявлений флюидов и частичного плавления. 27.01.2013 г. проявилось частичное плавления в среде очага землетрясения западной части Сарыджазского активного поднятия ( $\phi=42.14^\circ$  с.ш.,  $\lambda=79.18^\circ$  в.д.). В 16 час 28.01.2013 г. в среде очага землетрясения Сарыджаз-Каркыра на восточной части Восточно- Терскойского активного поднятия проявились флюиды.

Пространственное распределение проявления флюидов, частичного плавления и высоких давлений в квадрате  $\phi=41.5^\circ$ - $43.5^\circ$  с.ш.,  $\lambda=72^\circ$ - $80^\circ$  в.д. Северного Тянь-Шаня за 01-28 января 2013 г. приведён на рисунке 6.

# Результаты исследований и обсуждение

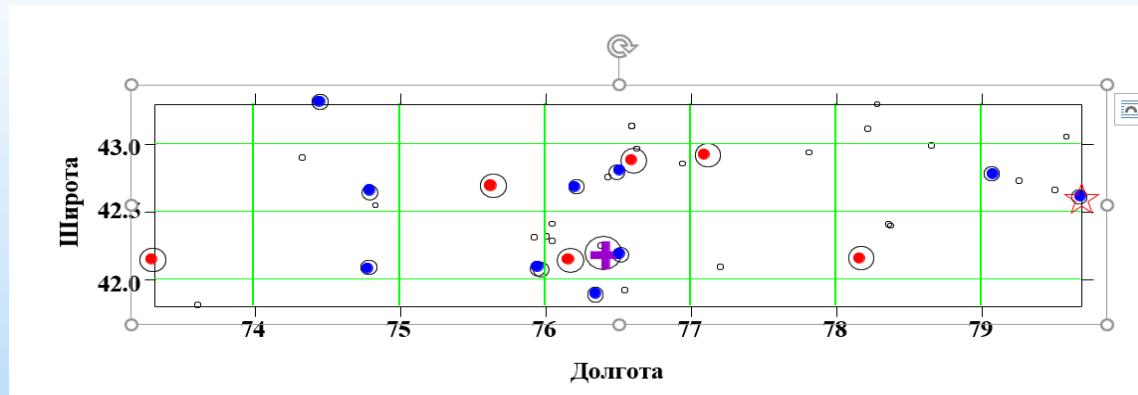


Рисунок 6. Пространственное распределение очагов с проявлениями флюидов, частичного плавление и высоких давлений в квадрате  $\varphi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. Северного Тянь-Шаня за 01-28 январь 2013 г. Очаг с проявлением флюидов обозначен кругом синего цвета. Очаг с проявлением частичного плавление отмечен кругом красного цвета. Очаг с проявлением высоких давлений обозначен окружностью с крестиком фиолетового цвета. Очаг землетрясения без заметных изменений состояний среды отмечен кругом чёрного цвета с малым радиусом.

Имеющиеся данные скорости  $V_p$ ,  $V_s$  сейсмических волн очагов землетрясений позволяют определить коэффициент Пуассона (физическая величина среды без размерности) на основании формулы:

$$\sigma=1/2((V^2p-2V^2s)/(V^2p-V^2s)). \quad (4)$$

Следует отметить, что максимальная величина коэффициента Пуассона является характеристикой более эластичных материалов. Минимальное значение его относится к хрупким веществам. Изменение коэффициента Пуассона среды в очагах землетрясений приведено на рисунке 7.

# Результаты исследований и обсуждение

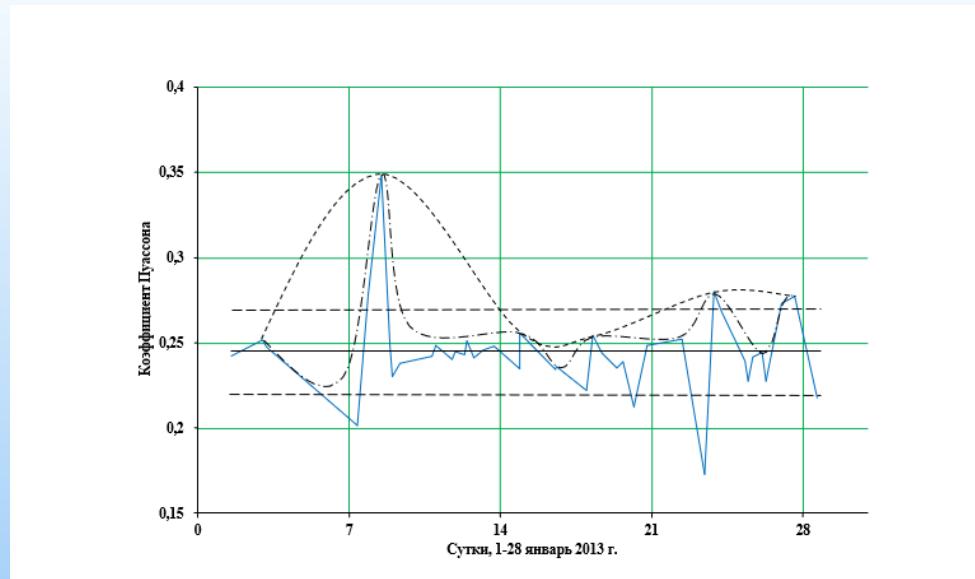


Рисунок 7. График вариации величины коэффициента Пуассона очагов Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\varphi=41.5^{\circ}\text{--}43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}\text{--}80^{\circ}$  в.д. за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ). Горизонтальной линией обозначено среднее значение -  $C$ . Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка.

Значения коэффициента Пуассона  $\sigma$  изменялись от 0.17 до 0.35. При этом среднее значение составляло около  $C=0.24$ , стандартное отклонение  $- S=0.026$  (см. таблица 1). На графике вариации  $\sigma$  сначала определяются циклы, в частности третьего порядка при значении  $\sigma \geq 0.225$  на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ).

По пикам циклов третьего порядка  $\sigma \geq 0.25$  выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Длительность периода циклов третьего порядка составляет около 3.4 - 6.5 суток, циклов второго порядка - около 15.5 суток.

# Результаты исследований и обсуждение

Аномальная максимальная величина  $\sigma = 0.35$  отмечалась 08.01.2013 г., среда очага с проявлением высоких давлений (см. таблица 2) вела как «эластичная система». Аномально минимальное значение  $\sigma = 0.17$  проявилось 23.01.2013 г. и среда очага с проявлением флюидов (см. табл.2) вела как «хрупкая система».

Повышенные значения около  $\sigma = 0.28$  23.01.2013 г. и 27.01.2013 г. показывают, что среда очагов также вели себя как «эластичная система». Можно сказать, что среда очагов со значениями  $\sigma$  около  $C+S=0.27$  вероятно была «квазиэластичной», а среда очагов со значениями  $\sigma$  около  $C-S=0.22$  была «квазихрупкой». Важно отметить, что на основании формулы Адамса-Вильямсона:

$$\Phi = V_p^2 - 4/3 V_s^2 = \Delta P / \Delta \rho, \quad (5)$$

где  $\Phi$  - сейсмический параметр,  $V_p$ ,  $V_s$  - скорости сейсмических волн очага землетрясения,  $\Delta P$  – приращение давления (кбар),  $\Delta \rho$  – приращение плотности среды ( $\text{г}/\text{см}^3$ ), можно определить вероятные величины приращения давления в очаге при определённом приращении плотности его среды.

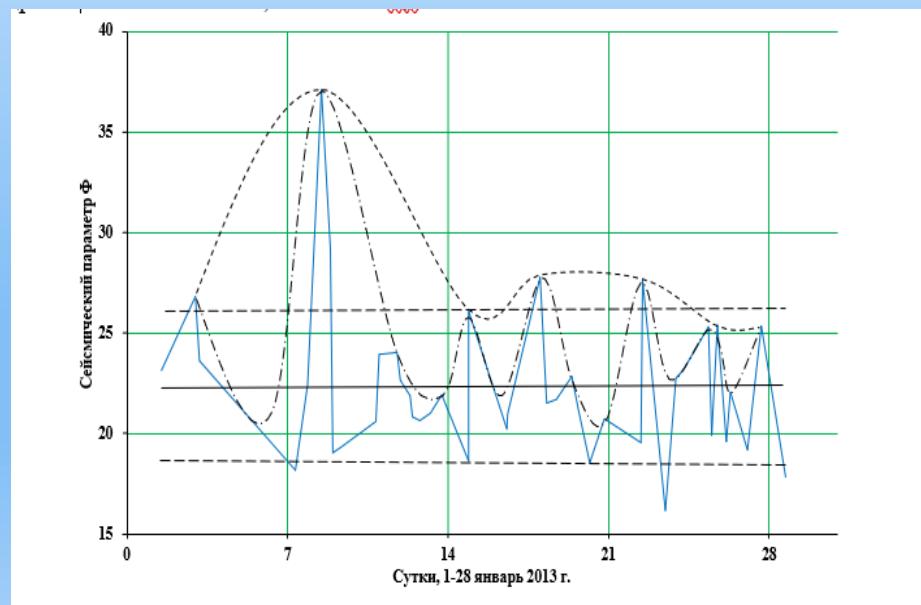


Рисунок 8. График вариации величины сейсмического параметра  $\Phi$  (км<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>) очагов Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^\circ - 43.5^\circ$  с.ш.,  $\lambda=72^\circ - 80^\circ$  в.д. за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ). Горизонтальной линией обозначено среднее значение - С. Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка.

# Результаты исследований и обсуждение

На рисунке 8 приведено изменение сейсмического параметра  $\Phi$  в последовательности проявления очагов землетрясений Северного-Тянь-Шаня за 01-28 января 2013 г.

Значения сейсмического параметра  $\Phi$  изменялись от  $16.1 \text{ км}^2/\text{с}^2$  до  $37.1 \text{ км}^2/\text{с}^2$ . При этом среднее значение составляло около  $C=22.35 \text{ км}^2/\text{с}^2$ , а стандартное отклонение-  $S=3.73 \text{ км}^2/\text{с}^2$  (см. табл.1). На графике вариации  $\Phi$  сначала определяются циклы, в частности третьего порядка при значении  $\Phi \geq 20.7$  на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ). По пикам циклов третьего порядка  $\Phi \geq 25.3$  выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Длительность периода циклов третьего порядка составляет около 1.9 - 6.5 суток, а циклов второго порядка - около 9.9 суток.

Аномальная максимальная величина  $\Phi = 37.1 \text{ км}^2/\text{с}^2$  отмечалась 08.01.2013 г. (8.49 суток), а минимальное значение  $\Phi=16.1 \text{ км}^2/\text{с}^2$  – 23.01.2013 г. По формуле (5) для приращения  $\Delta\rho=0.1 \text{ г/см}^3$  приращение давления  $\Delta P$  составляли:  $\Delta P=\Phi^* \Delta\rho=37.1*0.1=37 \text{ кбар}$  и  $16.1*0.1=16 \text{ кбар}$ , соответственно.

В очаге землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) величина сейсмического параметра составляла  $\Phi = 17.82 \text{ км}^2/\text{с}^2$ . Здесь для приращения плотности  $0.1 \text{ г/см}^3$  приращение давления составляло около 17.8 кбар.

Следует отметить, как отмечено выше, среда очага землетрясения от 08.01.2013 г. (11 час 58 мин 41 сек) находилась в состоянии высокого давления, вела как «эластичный материал» и для приращения плотности на  $0.1 \text{ г/см}^3$  потребовалось относительно высокое значение приращения давления около 37 кбар.

Среда очага 23.01.2013 г. (11 час 5 мин 44 сек) находилась в состоянии частичного плавления, она вела себя, как «хрупкий материал», и для приращения плотности  $0.1 \text{ г/см}^3$  потребовалось относительно низкое значение приращения давления около 16 кбар.

Среда очага землетрясения Сарыджаз-Каркыра 28.01.2013 г. (16 час 38 мин 44 сек) находилась в состоянии проявления флюидов, вела как «хрупкий материал» и для приращения плотности  $0.1 \text{ г/см}^3$  потребовалось среднее значение приращения давления около 17-18 кбар.

Теперь рассмотрим сейсмические волны очагов землетрясения после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за 28 января - 28 февраля 2013 г. Количество рассмотренных очагов землетрясений - 40. При изучении очагов землетрясения были составлены индивидуальные гидографы с достоверностью аппроксимации  $R^2 > 0.98$ , определены скорости  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  сейсмических волн землетрясений.

# Результаты исследований и обсуждение

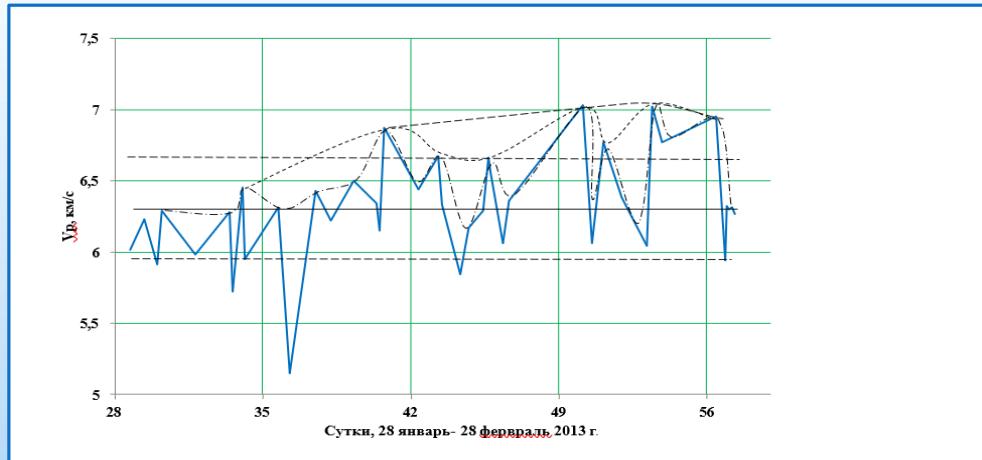


Рисунок 9. Вариация скорости продольных сейсмических волн  $V_p$  очагов Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\varphi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за 28 января - 28 февраля 2013 г. Горизонтальной линией обозначено среднее значение - С. Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка; пунктирной линией – цикл вариации первого порядка.

На рисунке 9 приведено изменение скорости  $V_p$  во времени. Значения  $V_p$  изменялись от 5.15 км/с до 6.06 км/с. При этом среднее значение составляло  $C=6.31$  км/с, а стандартное отклонение -  $S=0.37$  км/сек (таблица 3).

Значение	$V_p$	$V_s$	$V_p/V_s$	Коэффициент Пуассона	Сейсмический параметр
$C$	6.31	3.68	1.71	0.24	<b>21.78</b>
$S$	0.37	0.24	0.04	0.02	<b>2.65</b>
$C+S$	6.67	3.92	1.75	0.26	<b>24.43</b>
$C-S$	<b>5.94</b>	<b>3.44</b>	<b>1.66</b>	<b>0.22</b>	<b>19.13</b>

Таблица 3. Среднее значение (С) скоростей сейсмических волн ( $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ ), коэффициента Пуассона  $\sigma$ , сейсмического параметра  $\Phi$  (км $^2$ /с $^2$ ) очагов землетрясений и стандартное отклонение (S) их вариаций после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) Северного Тянь-Шаня за 28 января - 28 февраля 2013 г.

# Результаты исследований и обсуждение

Аномальное минимальное значение 5.15 км/с отмечалось 05.02.2013 г. На графике вариации  $V_p$  отмечается иерархия асимметричных циклов. Сначала определяются циклы, в частности третьего порядка, при значении  $V_p \geq 6.17$  км/сек на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ). По пикам циклов третьего порядка  $V_p \geq 6.45$  км/с выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка –  $V_p \geq 6.87$  км/с аналогично предыдущему подходу отмечается цикл первого порядка.

Результаты слежения скорости поперечной волны  $V_s$  очагов Северного Тянь-Шаня в исследуемом регионе за 28 января - 28 февраля 2013 г. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) приведено на рисунке 10.

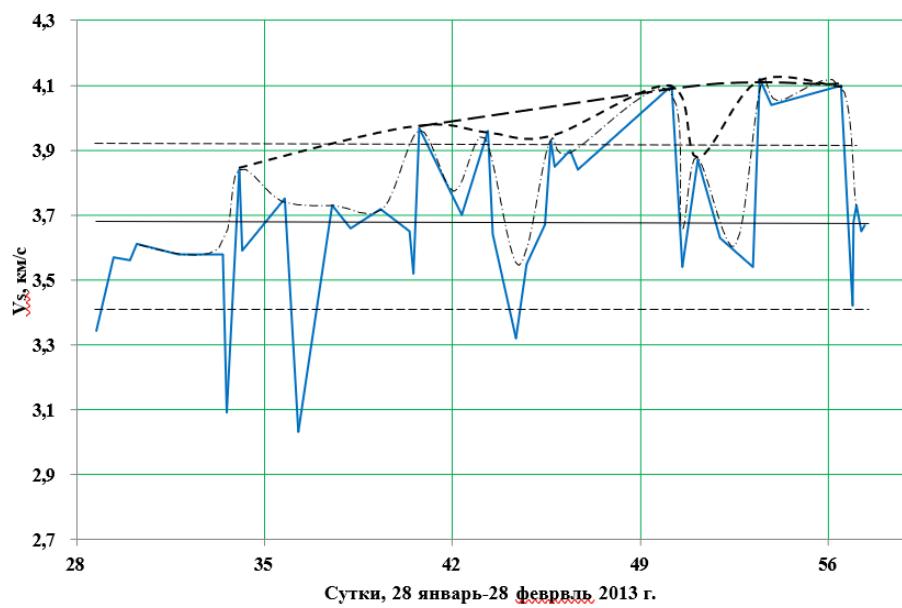


Рисунок 10. График вариации скорости поперечных сейсмических волн  $V_s$  очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за период с 28 по 28 февраля 2013 г. Горизонтальной линией обозначено среднее значение –  $C$ . Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учетом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка; пунктирной линией – цикл вариации первого порядка.

# Результаты исследований и обсуждение

Значения  $V_s$  изменялись от 3.03 км/с до 4.12 км/сек. Аномальное минимальное значение  $V_s = 3.03$  км/с отмечалось 05.02.2013 г. При этом среднее значение составило  $C = 3.68$  км/с, а стандартное отклонение –  $S = 0.24$  км/с (см. табл. 3).

На графике вариации  $V_s$  отмечается иерархия асимметричных циклов. Сначала определяются циклы, в частности третьего порядка, при значении  $V_s \geq 3.58$  км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ).

По пикам циклов третьего порядка  $V_s \geq 3.84$  км/с выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка  $V_s \geq 3.97$  км/с аналогично предыдущему подходу отмечается цикл первого порядка.

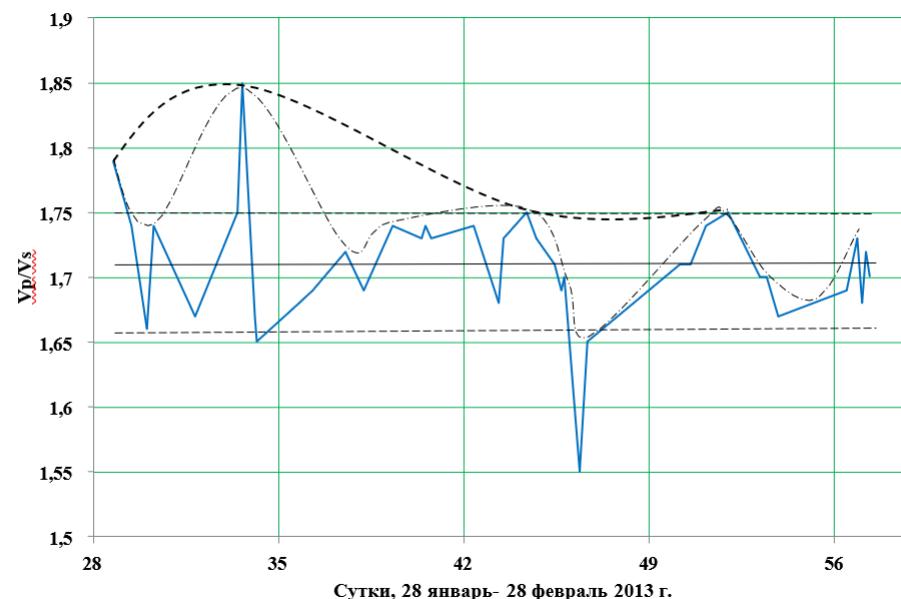


Рисунок 11. График вариация величины  $V_p/V_s$  очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^\circ-43.5^\circ$  с.ш.,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$  в.д. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за период 28 января - 28 февраля 2013 г. Горизонтальной линией обозначено среднее значение –  $C$ . Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка; пунктирной линией – цикл вариации первого порядка.

# Результаты исследований и обсуждение

На рисунке 11 приведено изменение величины  $V_p/V_s$  во времени. Значения  $V_p/V_s$  изменялись от 1.55 до 1.85. Аномальная максимальная величина отмечалась 02.02.2013 г., аномальная минимальная величина - 15.02.2013 г. При этом среднее значение составляло около  $C=1.71$ , а стандартное отклонение -  $S=0.04$  (см. табл.3).

На графике вариации  $V_p/V_s$  сначала определяются циклы, в частности третьего порядка, при значении  $V_p/V_s \geq 1.65$  на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ). По пикам циклов третьего порядка  $V_p \geq 1.75$  выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Аномальная максимальная величина  $V_p/V_s = 1.85$  отмечалась 02.02.2013 г. Длительность периода циклов третьего порядка составляет около 4.9 - 11.1 сутки, циклов второго порядка - около 18.3 сутки.

На основании имеющихся данных  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  оценены состояния дискретной среды очагов землетрясений, в частности проявление флюидов, частичное плавления, высокое давление, Северного Тянь-Шаня в регионе исследований за 28 января - 28 февраля 2013 г. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра(28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ). Результаты оценки приведены на рисунке 12 и в таблице 4.

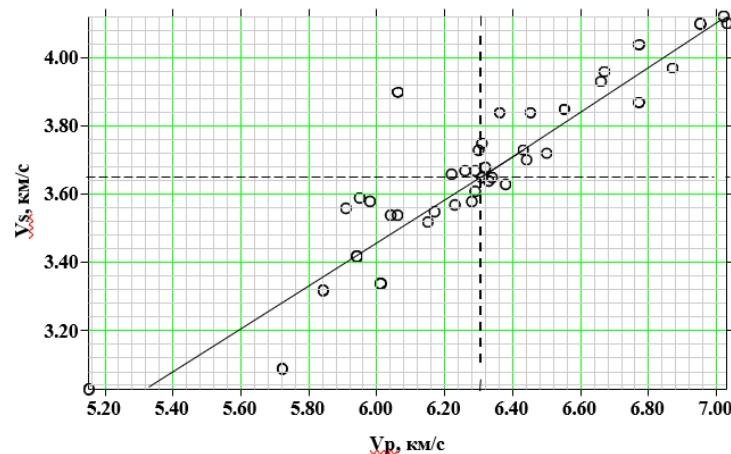


Рисунок 12. Соотношение между  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^\circ-43.5^\circ$  с.ш.,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$  в.д. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за период 28 января - 28 февраля 2013 г.

# Результаты исследований и обсуждение

Кружочками обозначены наблюдённые значения  $V_p/V_s$ . Значение  $V_p/V_s=1.72$  выделено диагональной сплошной линией. Выше этой линии выделяются параллельные линии, где кружочки имеют малые значения  $V_p/V_s < 1.72$ , а ниже данной линии отмечаются параллельные линии, где кружочки имеют большие значения  $V_p/V_s > 1.72$ . Среднее значение  $V_p = 6.31$  км/с обозначено вертикальной штрихованной линией. Среднее значение  $V_s = 3.68$  км/с обозначено горизонтальной штрихованной линией.

Таблица 4. Состояния среды, в частности проявление флюидов, частичного плавления, высоких давлений в очагах землетрясений Северного Тянь-Шаня за период 28 января - 28 февраля 2013 г. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ).

Год	Месяц	Число	Час	Минута	Секунда	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	$V_p/V_s$	Состояние среды
2013	1	28	18	5	57	6.01	3.34	1.79	Частичное плавление
2013	1	29	10	3	36	6.23	3.57	1.74	Частичное плавление
2013	1	30	0	41	11	5.91	3.56	1.66	Флюиды
2013	1	30	6	32	4	6.29	3.61	1.74	Частичное плавление
2013	1	31	20	0	15	5.98	3.58	1.67	Флюиды
2013	2	2	10	55	39	6.28	3.58	1.75	Частичное плавление
2013	2	2	14	43	6	5.72	3.09	1.85	Частичное плавление
2013	2	3	2	4	26	6.45	3.84	1.67	
2013	2	3	4	23	12	5.95	3.59	1.65	Флюиды
2013	2	4	18	37	16	6.31	3.75	1.68	
2013	2	5	7	0	6	5.15	3.03	1.69	Флюиды
2013	2	6	12	53	3	6.43	3.73	1.72	
2013	2	7	5	41	13	6.22	3.66	1.69	Флюиды

# Результаты исследований и обсуждение

2013	2	8	7	47	51	6.5	3.72	1.74	Высокое давление
2013	2	9	9	50	22	6.34	3.65	1.73	
2013	2	9	13	20	35	6.15	3.52	1.74	Частичное плавление
2013	2	9	18	32	30	6.87	3.97	1.73	Высокое давление
2013	2	11	9	10	2	6.44	3.7	1.74	Высокое давление
2013	2	12	7	41	54	6.67	3.96	1.68	
2013	2	12	12	28	11	6.33	3.64	1.73	
2013	2	13	9	17	2	5.84	3.32	1.75	Частичное плавление
2013	2	13	18	15	14	6.17	3.55	1.73	Частичное плавление
2013	2	14	10	40	25	6.29	3.67	1.71	
2013	2	14	16	42	12	6.66	3.93	1.69	
2013	2	14	19	19	50	6.55	3.85	1.7	
2013	2	15	9	30	16	6.06	3.9	1.55	Флюиды
2013	2	15	16	36	21	6.36	3.84	1.65	
2013	2	19	4	5	43	7.03	4.1	1.71	Высокое давление
2013	2	19	13	59	1	6.06	3.54	1.71	
2013	2	20	3	28	35	6.77	3.87	1.74	Высокое давление
2013	2	20	23	53	10	6.38	3.63	1.75	
2013	2	22	4	39	52	6.04	3.54	1.7	Флюиды
2013	2	22	10	51	6	7.02	4.12	1.7	
2013	2	22	21	43	4	6.77	4.04	1.67	
2013	2	25	11	16	39	6.95	4.1	1.69	
2013	2	25	21	27	52	5.94	3.42	1.73	Частичное плавление
2013	2	25	23	7	13	6.32	3.68	1.71	

# Результаты исследований и обсуждение

Из таблицы 4 следует, что после главного толчка землетрясения Сарыджаз-Каркыра в очагах Северного Тянь-Шаня за 28.01.2013 г.-02.02.2013 г. отмечалось частичное плавление, за 03.02.-07.02.2013 г.- проявление флюидов, за 08.02.-20.02.2013 г. - высокое давление, 22.02.2013 г. – проявление флюидов и 25.02.2013 г.- частичное плавление.

Пространственное распределение проявления флюидов, частичного плавления и высоких давлений в регионе исследований. Северного Тянь-Шаня за 28 января-28 февраля 2013 г. после главного толчка землетрясения Сарыджаз-Каркыра приведён на рисунке 13.

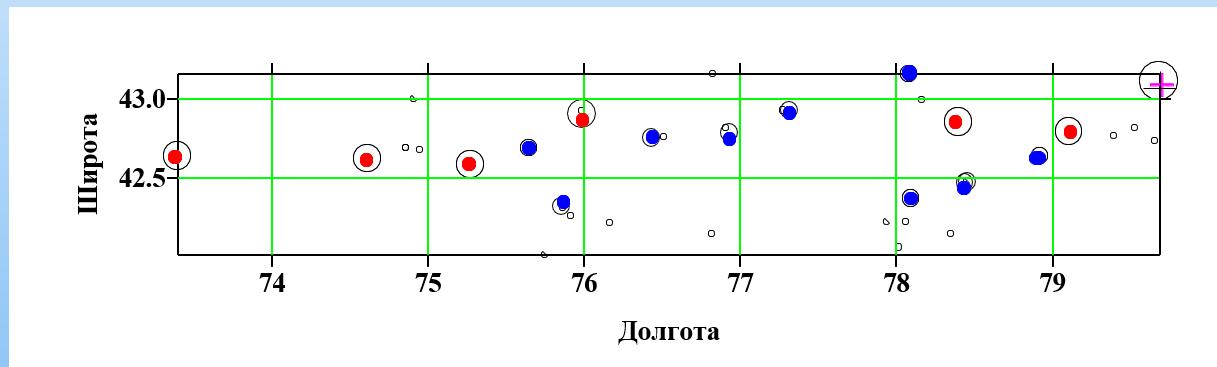
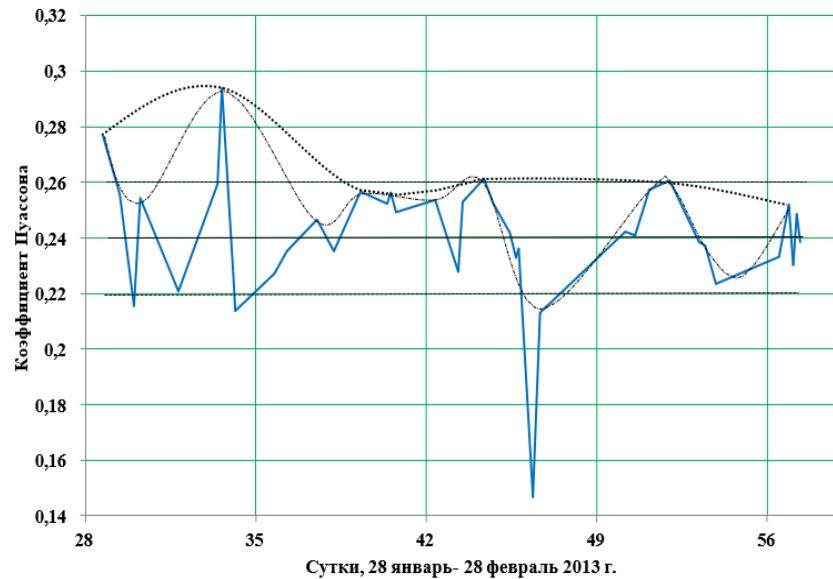


Рисунок 13. Пространственное распределение очагов с проявлениями флюидов, частичного плавления и высоких давлений в квадрате  $\phi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. Северного Тянь-Шаня за 28 января-28 февраля 2013 г. Очаг с проявлением флюидов обозначен кругом синего цвета. Очаг с проявлением частичного плавления отмечен кругом красного цвета. Очаг с проявлением высоких давлений обозначен окружностью с крестиком фиолетового цвета. Очаг землетрясения без заметных изменений состояний среды отмечен кругом чёрного цвета с малым радиусом.

Результаты сложения коэффициента Пуассона среды в очагах землетрясений Северного Тянь-Шаня за период 28 января - 28 февраля 2013 г. приведены на рисунке 14.

# Результаты исследований и обсуждение



Значения  $\sigma$  изменялись от 0.146 до 0.294. Аномально максимальная величина отмечалась 02.02.2013 г., аномально минимальная величина - 15.02.2013 г. При этом среднее значение составляло около  $C = 0.24$ , стандартное отклонение –  $S = 0.02$  (см. табл.3).

На графике вариации  $\sigma$  сначала определяются циклы, в частности третьего порядка, при значении  $\sigma \geq 0.21$  на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ). По пикам циклов третьего порядка  $\sigma \geq 0.25$  выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Длительность периода циклов третьего порядка составляет около 5.0 - 8.8 сутки, циклов второго порядка - около 10.7 сутки.

Аномальная максимальная величина  $\sigma = 0.294$  очага 02.02.2013 г. позволяет сказать, что среда очага с проявлением частичного плавления (см. табл.4) вела себя, как «эластичный материал», а аномально минимальное значение  $\sigma = 0.146$  очага 23.01.2013 г. позволяет предположить, что среда очага с проявлением флюидов (см. таблице 4) вела как «хрупкий материал».

Рисунок 14. График вариация величины коэффициента Пуассона,  $\sigma$  - среды очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за период с 28 января по 28 февраля 2013 г. Горизонтальной линией обозначено среднее значение -  $C$ . Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл вариации второго порядка; пунктирной линией – цикл вариации первого порядка.

# Результаты исследований и обсуждение

На рисунке 15 приведено изменение сейсмического параметра  $\Phi$  очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за 28 января - 28 февраля 2013 г.

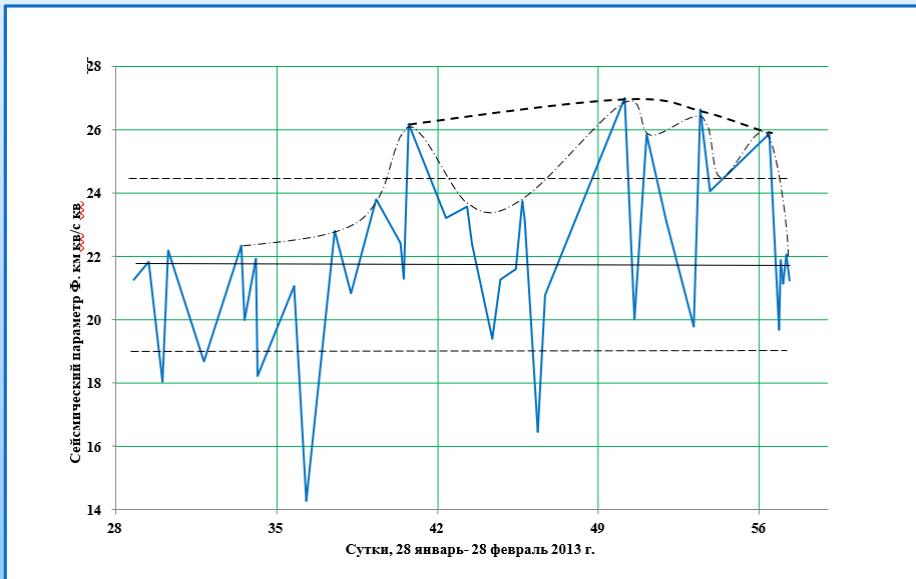


Рисунок 15. Вариация величины сейсмического параметра  $\Phi$  (км $^2$ /с $^2$ ) среди очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^{\circ}-43.5^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=72^{\circ}-80^{\circ}$  в.д. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за 28 января - 28 февраля 2013 г. Горизонтальной линией обозначено среднее значение -  $C$ . Горизонтальными точечными линиями обозначены значения  $(C+S)$  и  $(C-S)$  с учётом стандартного отклонения  $(S)$ . Штрих-пунктирной линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной линией – цикл.

Значения  $\Phi$  изменялись от 14.28 км $^2$ /с $^2$  до 27.0 км $^2$ /с $^2$ . Аномально максимальная величина отмечалась 05.02.2013 г., аномально минимальная величина - 15.02.2013 г. При этом среднее значение составляло около  $C=21.78$  км $^2$ /с $^2$ , а стандартное отклонение -  $S=2.65$  км $^2$ /с $^2$  (см. табл.3).

На графике вариации  $\Phi$  сначала определяются циклы, в частности третьего порядка, при значении  $\Phi \geq 22.0$  км $^2$ /с $^2$  на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2 \geq 0.95$ ). По пикам циклов третьего порядка  $\Phi \geq 25.8$  км $^2$ /с $^2$  выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 7.0 и более суток. Особо выделяются относительно низкие значения 16.4 км $^2$ /с $^2$  и сравнительно большие

# Результаты исследований и обсуждение

значения:  $26.18 \text{ км}^2/\text{с}^2$ ,  $25.86 \text{ км}^2/\text{с}^2$ ,  $26.64 \text{ км}^2/\text{с}^2$ ,  $25.88 \text{ км}^2/\text{с}^2$  09.02.2013г., 20.02.2013 г., 22.02.2013 г. и 25.02.2013 г., соответственно.

По формуле (5) для приращения  $\Delta\rho = 0.1 \text{ г/см}^3$  приращения давления  $\Delta P$  при низких значениях  $\Phi = 14.28-16.4 \text{ км}^2/\text{с}^2$  очагов с проявлением флюидов (см. табл. 4) составляли  $\Delta P = 14.28-16.4 \text{ кбар}$ , при высоких значениях  $\Phi = 25.86-27.0 \text{ км}^2/\text{с}^2$  очагов с проявлением высоких давлений (см. табл. 4) могли иметь  $\Delta P = 25.86-27.0 \text{ кбар}$  и при сравнительно больших значениях  $\Phi = 25.88-26.18 \text{ км}^2/\text{с}^2$  очагов с проявлением частичного плавления приращение давления -  $\Delta P = 25.88-26.18 \text{ кбар}$ .

Пространственное распределение скоростей  $V_p$ ,  $V_s$  сейсмических волн очагов перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) приведено на рисунке 16 (а, б). Выделяются относительно высокоскоростные и низкоскоростные неоднородности. При этом системы субширотных активных разломов разделяются на сегменты. Землетрясение Сарыджаз-Каркыра проявилось в районе, где проявилась интенсивная динамическая сегментация.

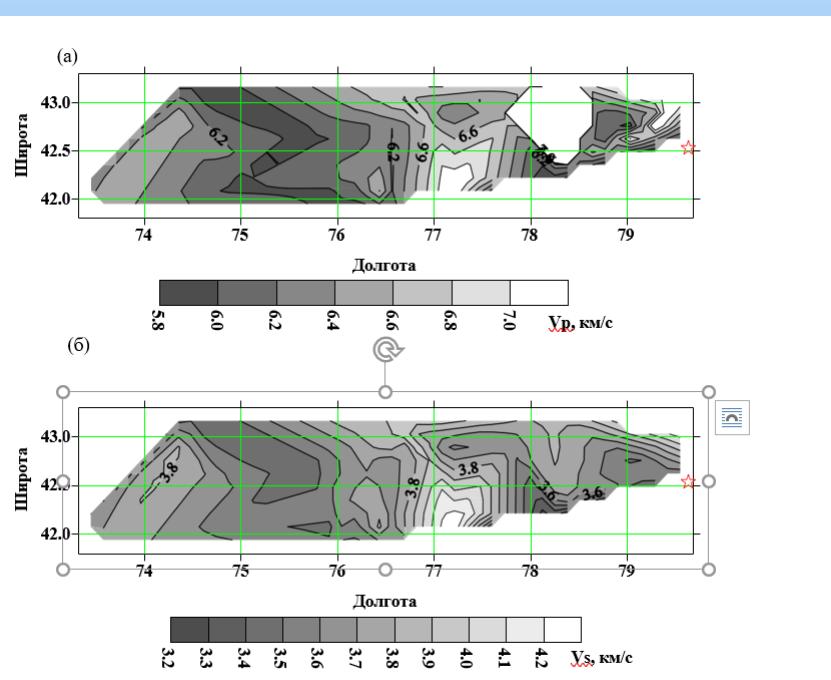


Рисунок 16 (а, б). Пространственное распределение скоростей  $V_p$  (а),  $V_s$  сейсмических волн очагов землетрясений активных разломов в пределах Кунгейского, Заилийского, Терскойского, Кыргызского, Суусамыртоосского и Таласского активных субширотных поднятий (в квадрате  $\varphi=41.5^\circ-43.5^\circ$ ,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$ ). Звёздочкой обозначен эпицентр землетрясения Сарыджаз-Каркыра ( $K=15.1$ , 28.01.2013 г.).

# Результаты исследований и обсуждение

Пространственное распределение коэффициента Пуассона  $\sigma$ , сейсмического параметра  $\Phi$  ( $\text{км}^2/\text{с}^2$ ) среды очагов землетрясений приведено на рисунке 16 (в, г).

Выделяются участки очагов с относительно высокими («эластичными материалами», большими приращениями давления) и низкими («хрупкими материалами», малыми приращениями давления) значениями этих параметров. При этом системы субширотных активных разломов разделяются на сегменты. Землетрясение Сарыджаз-Каркыра проявились в районе, где проявилась интенсивная динамическая сегментация.

Пространственное распределение скоростей  $V_p$ ,  $V_s$  сейсмических волн очагов Северного Тянь-Шаня (в квадрате  $\phi=41.5^\circ-43.5^\circ$ ,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$ ) после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) приведено на рисунке 17 (а, б). Выделяются относительно высокоскоростные и низкоскоростные неоднородности. При этом в системе субширотных активных разломов между  $72^\circ-77^\circ$  отмечается динамическая сегментация, а между  $77^\circ-80^\circ$  наблюдаются динамическая сегментация и секторизация.

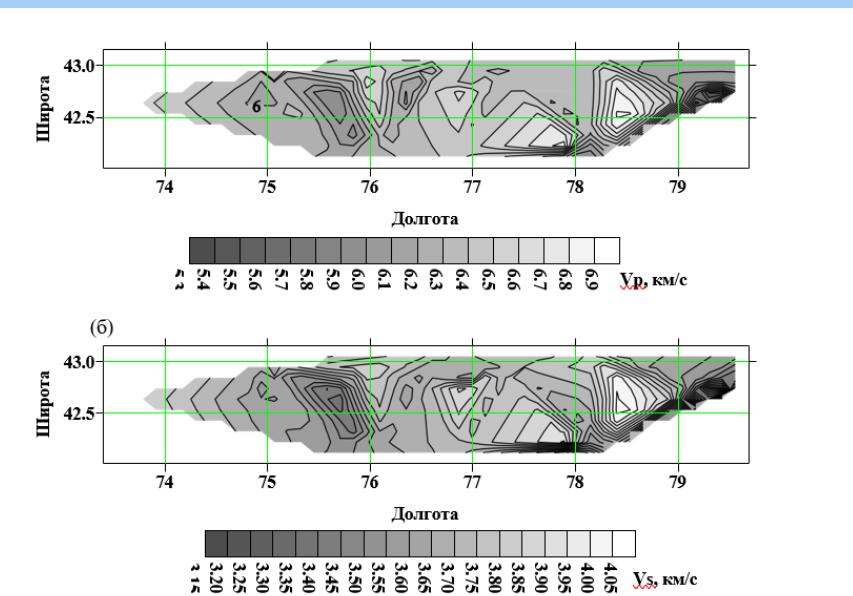


Рисунок 17 (а, б). Пространственное распределение скоростей  $V_p$  (а),  $V_s$  сейсмических волн очагов землетрясений активных разломов в пределах Кунгейского, Заилийского, Терскойского, Кыргызского, Суусамыртоосского и Таласского активных субширотных поднятий в квадрате  $\phi=41.5^\circ-43.5^\circ$ ,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$  Северного Тянь-Шаня.

# Результаты исследований и обсуждение

Пространственное распределение коэффициента Пуассона  $\sigma$ , сейсмического параметра  $\Phi$  ( $\text{км}^2/\text{с}^2$ ) среды очагов Северного Тянь-Шаня (в квадрате  $\varphi=41.5^\circ-43.5^\circ$ ,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$ ) после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) приведено на рисунке 17 (в, г). Выделяются участки очагов с относительно высокими («эластичными материалами», большими приращениями давления) и низкими («хрупкими материалами», малыми приращениями давления) значениями этих параметров. При этом системы субширотных активных разломов разделяются на сегменты и секторы.

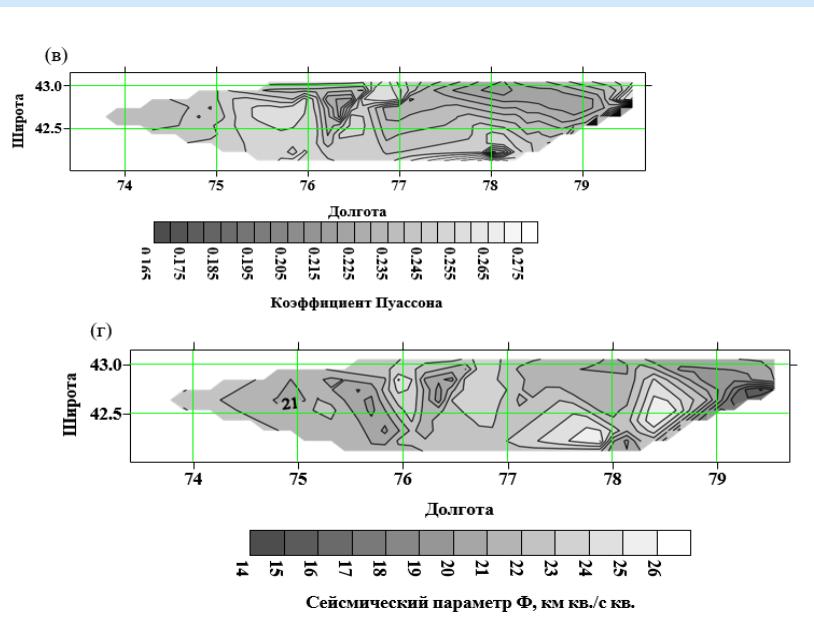


Рисунок 17 (в, г). Пространственное распределение коэффициента Пуассона  $\sigma$ ; (в) - сейсмического параметра  $\Phi$  ( $\text{км}^2/\text{с}^2$ ); (г) - среды очагов землетрясений активных разломов в пределах Кунгейского, Заилийского, Терскойского, Кыргызского, Суусамыртооского и Таласского активных субширотных поднятий в квадрате  $\varphi=41.5^\circ-43.5^\circ$ ,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$  Северного Тянь-Шаня.

Важно провести сравнительный анализ состояния среды очагов землетрясений и механизма этих очагов. В качестве примера выбраны механизмы очагов ряда землетрясений с  $K = 12.2-15.1$  по данным Института сейсмологии НАН Кыргызской Республики (табл.5).

# Результаты исследований и обсуждение

Таблица 5. Параметры механизмов очагов землетрясений с  $K=12.2-15.1$  Северного Тянь-Шаня в квадрате  $\phi=41.5^\circ-43.5^\circ$  с.ш.,  $\lambda=72^\circ-80^\circ$  в.д. за 2006- 2013 гг.

Дата			Координаты				K	Оси главных напряжений						
год	месяц	день	широта		долгота			P		B		T		
			гр.	мин.	гр.	мин.		PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	
2006	12	25	42	5	76	02	14	21	318	48	254	33	214	
2007	6	6	42	34	75	23	12	4	355	84	130	4	265	
2010	3	2	42	42	75	65	12,6	8	150	82	352	4	240	
2013	1	28	42	34	79	46	15.1	5	13	84	250	8	103	
Дата			Координаты				Нодальные плоскости						Вид деформации	
год	месяц	Число	широта		долгота		NP1			NP2				
			гр.	мин.	гр.	мин	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP		
2006	12	25	42	5	76	02	0	50	10	264	82	140	взброс	
2007	6	6	42	34	75	23	40	85	0	310	90	175	сдвиг	
2010	3	2	42	42	75	65	285	82	-177	195	87	-8	сдвиго-сброс	
2013	1	28	42	34	79	46	148	81	178	238	88	9	сдвиг	

Физические параметры геофизической среды очагов данных землетрясений приведены в табл.6.

# Результаты исследований и обсуждение

Таблица 6. Физические параметры геофизической среды очагов ряда значительных землетрясений: Кочкор (25.12.2006 г., K=14.2), Шамси-Тюндюк (06.06.2007 г., K=12.2), Окторкой (02.03.2010 г., K=12.6) и Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г., K=15.1).

№	Год	Месяц	Число	широта	долгота	Vp, км/с	Vs, км/с	Vp/Vs	K= lgE, Дж	Состояние среды
1	2006	12	25	42.17	76.06	5.92	3.45	1.71	14.2	флюиды
2	2007	6	6	42.71	75.36	6.43	3.62	1.77	12.2	высокое давление
3	2010	3	2	42.54	75.74	6.48	3.73	1.73	12.6	высокое давление
4	2013	1	28	42.56	79.77	5.86	3.51	1.67	15.1	флюиды

№	Вероятный состав среды очага	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> [36]	Коэффициент Пуассона $\sigma$	Модуль сдвига $\mu$ , кбар	Модуль сжатия K, кбар	Сейсмический параметр $\Phi$ , км <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
1	гранодиориты ордовика	2.66	0.24	932	510	19.18
2	метаморфические породы рифея	2.8	0.26	1157	668	23.87
3	метаморфические породы рифея	2.8	0.25	1175	656	23.44
4	известняки карбона	2.67	0.22	916	475	17.82

Из таблиц 5 и 6 следует, что в геофизических средах очагов землетрясений: 1-Кочкор (2006) и 4 - Сарыджаз-Тарагай (2013) проявились флюиды и величины физических параметров (модуль сдвига, модуль сжатия, сейсмический параметр) были сравнительно малыми.

Однако, вид деформации в очаге землетрясения Кочкор был взбросовый, а в очаге Сарыкамыш-

# Заключение

Каркыра - сдвиговый. В геофизических средах очагов землетрясений: 2-Шамси-Тюндюк (2007), 3-Окторкай (2010) проявились высокие давления и величины физических параметров были относительно большими.

## Заключение

На основе данных цифровых сейсмических станций сетей KNET и KRNET изучены сейсмические волны коровых землетрясений Северного Тянь-Шаня, определены скорости  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , сейсмический параметр  $\Phi$ , коэффициент Пуассона геофизической среды каждого очага и осуществлено слежение последовательности проявления очагов в регионе исследований.

1. Отмечено, что в изменениях величин  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , сейсмического параметра  $\Phi$ , коэффициента Пуассона очагов во времени выделяется иерархия нелинейных циклов, в частности, третьего, второго, первого порядков в низких, средних и высоких значениях соответственно. Длительность циклов третьего порядка составляет около 1.4-7.0 сутки, второго порядка - около 9.9-20.0 сутки, первого порядка - более 20 суток. Геофизическая среда очагов землетрясений в соответствии с коэффициентом Пуассона ведёт как «эластичный», «хрупкий» и «обычный» материалы. Величина сейсмического параметра позволяет определить значение давления в очагах для одинаково определённого приращения плотности (например, на 0.1 г/см<sup>3</sup>).
2. По имеющимся достоверным данным  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  установлено четыре вида очагов землетрясений: 1- с проявлением флюидов, 2- с проявлением частичного плавления, 3 - с проявлением высоких давлений, 4 - без проявления флюидов, частичного плавления и высоких давлений.
3. На распределении  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , сейсмического параметра  $\Phi$ , коэффициента Пуассона очагов в пространстве очаги землетрясений группируются в скоростные неоднородности, наблюдаются динамическая сегментация и секторизация устойчивых поднятий и активных разломов Северного Тянь-Шаня. Очаг землетрясения, например, Сарыджаз-Каркыра (2013,  $K=15.1$ ), развивался на северном крыле Восточно-Терскойского устойчивого поднятия, в зоне Предтерскойского активного разлома.

# Заключение

4. Сравнительный анализ очагов значительных землетрясений Северного Тянь-Шаня показал, что в геофизических средах очагов землетрясений: 1-Кочкор (2006), 4-Сарыджаз-Тарагай (2013) проявились флюиды и величины физических параметров (модуль сдвига, модуль сжатия, сейсмический параметр) были сравнительно малыми. Однако, вид деформации в очаге землетрясения Кочкор был взбросовый, а в очаге Сарыкамыш-Каркыра - сдвиговый. В геофизических средах очагов землетрясений: 2-Шамси-Тюндюк (2007), 3-Окторкай (2010) проявились высокие давления и величины физических параметров были относительно большими. Вид деформации в очагах этих землетрясений были сдвиговый и сдвиго-сбросовый, соответственно. Геофизическая среда очагов землетрясений: Кочкор, Сарыджаз-Каркыра вела как сравнительно «хрупкий материал», а очагов землетрясений: Шамси-Тюндюк, Окторкай – как относительно «эластичный материал»

# Библиография

- Richter C. F. Elementary Seismology. San Francisco.1958.
- Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration/ Bull. Seismol. Soc. Am.,1956, 46,105-45.
- Kawasumi H. An historical sketch of the development of knowledge concerning the initial motion of an earthquake. Publ. Bur. Cent. Seism. Int. 1937, A15, 258 330.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Maruyama T. Basic Theory of Seismic Waves. Part 1 of Earthquakes, Volcanoes and Rock mechanics. Tokyo. 1968.
- Benioff H., Press F., Smith S.W. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes. J. Geophys. Res. 1961.66, 605-618.
- Aki K. Scaling law of seismic spectrum. J. Geophys. Res.1967. 72, 1217-31.
- Bath M. Spectral Analysis in Geophysics, Developments in Solid Earth Geophysics Series, vol. 7, Elsevier Sci., Amsterdam. 1974. p. 580.
- Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J. Geophys. Res.1970. 75, 26, 4997-5009.
- Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Кунакова О.К. Очаговые спектры и параметры землетрясений Средней Азии, Копетдага, Северного Тянь-Шаня и сопредельных территорий. М.: Землетрясения в СССР в 1990 году, 123-126
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений// Основы физики очага и предвестники землетрясений// Физики очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С.6-29.
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwai J.P. Earthquake prediction: A physical basis. Science. 1973. 181. 803.
- Anderson L.D., Whitcomb J.H. The dilatancy-diffusion model of earthquake prediction. Stanford University Publ. Geol. Sci. 1973. Vol. 13. p.417.
- Соболев К.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов //ДАН СССР. 1980. Т.252. №1. С.69-71.
- Садовский М.А., Болховитдинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987.100 с.

# Вопросы по закреплению содержания лекции 14

- ❑ Характеристика систем наблюдений, сейсмических волн и состояние среды очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня. Понятие ДД-модели и ЛНТ-модели.
- ❑ Методика исследований и фактический материал. Методические основы исследований (приуроченность к активным разломам, спектральные характеристики, интерпретация кинематических характеристик  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , сейсмический параметр Адамс-Вильямсона и др.).
- ❑ Графики вариаций скорости продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) сейсмических волн очагов Северного Тянь-Шаня за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ).
- ❑ График вариация величины  $V_p/V_s$  очагов Северного Тянь-Шаня за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ).
- ❑ Соотношение между  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня до землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за 01-28 январь 2013 г.
- ❑ Состояние среды, в частности проявление флюидов, частичного плавления, высокого давления, график вариация величины коэффициента Пуассона в очагах землетрясений Северного Тянь-Шаня за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ).
- ❑ График вариация величины сейсмического параметра  $\Phi$  ( $\text{км}^2/\text{с}^2$ ) очагов Северного Тянь-Шаня за 01-28 январь 2013 г. перед землетрясением Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ).
- ❑ Вариация скорости продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) сейсмических волн очагов Северного Тянь-Шаня после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за 28 января - 28 февраля 2013 г.
- ❑ График вариация величины  $V_p/V_s$  очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за период 28 января - 28 февраля 2013 г.
- ❑ Соотношение между  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за период 28 января - 28 февраля 2013 г.
- ❑ Состояние среды, в частности проявление флюидов, частичного плавления, высокого давления, график вариация величины коэффициента Пуассона в очагах землетрясений Северного Тянь-Шаня за период 28 января - 28 февраля 2013 г. после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ).
- ❑ График вариация величины коэффициента Пуассона,  $\sigma$  - среды очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за период с 28 января по 28 февраля 2013 г.
- ❑ Вариация величины сейсмического параметра  $\Phi$  ( $\text{км}^2/\text{с}^2$ ) среды очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня после землетрясения Сарыджаз-Каркыра (28.01.2013 г.,  $K=15.1$ ) за 28 января - 28 февраля 2013 г.
- ❑ Пространственное распределение скоростей  $V_p$  (a),  $V_s$  сейсмических волн очагов землетрясений активных разломов в пределах Кунгейского, Заилийского, Терскойского, Кыргызского, Суусамыртооского и Таласского активных субширотных поднятий.
- ❑ Пространственное распределение коэффициента Пуассона  $\sigma$ ; сейсмического параметра  $\Phi$  ( $\text{км}^2/\text{с}^2$ ); среды очагов землетрясений активных разломов в пределах Кунгейского, Заилийского, Терскойского, Кыргызского, Суусамыртооского и Таласского активных субширотных поднятий.

**Благодарю за внимание!**

**Thank you for your attention!**

**Назарларыңызға рахмет!**