

УДК 541.126: 551.14 ] (574.41)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ ВЗРЫВОВ НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

<sup>1</sup>Беляшова Н.Н., <sup>2</sup>Шацлов В.И., <sup>1</sup>Михайлова Н.Н., <sup>1</sup>Комаров И.И.,  
<sup>1</sup>Синева З.И., <sup>1</sup>Беляшов А.В., <sup>1</sup>Малахова М.Н.

<sup>1</sup>Институт геофизических исследований

<sup>2</sup>Институт сейсмологии Министерства образования и науки  
Республики Казахстан

В статье описано использование калибровочных взрывов, произведённых на Семипалатинском испытательном полигоне в 1997 и 1998 г.г., для создания годографа и обобщённых скоростных одномерных моделей земной коры и верхней мантии платформенной части Казахстана. Приведены таблицы времен пробега P, Pn, Pg, S, Sn, Lg-волн в диапазоне от 0 до 740 км, скоростные модели: земной коры - до глубины 44 км, верхней мантии - до глубины 120 км. Новый годограф сравнен с годографами, полученными ранее КСЭ ИФЗ АН СССР и IASPEI-91.

В 1997 г. и 1998 г. на Семипалатинском испытательном полигоне проведены химические взрывы, основной целью которых было уничтожение ядерной инфраструктуры и калибровка сейсмических станций международной системы мониторинга [1]. После проведенных в 1997 г. 25-тонных взрывов был построен сводный схематический годограф для расстояния до 400 км и определен в первом приближении одномерный скорост-

ной разрез исследуемого блока земной коры Центрального Казахстана [2].

Настоящая работа посвящена уточнению полученного годографа и распространению его на большие расстояния путем дополнения данными, полученными в результате регистрации сейсмических волн от взрывов, произведенных в 1998 г. – 25-тонного на площадке Балапан и 100-тонного на горном массиве Дегелен. Общие сведения об этих взрывах приведены в табл. 1.

Таблица 1. Общие сведения об использованных калибровочных взрывах 1998 г.

№ скважины	Дата	Время взрыва по GMT	Масса заряда, кг	Глубина основания заряда в м от поверхности земли	Координаты	
					Широта	Долгота
214	22.08.1998	05.00.18,904	100 000	146	49°46'00,0"	77°59'27,0"
1071-бас	17.09.1998	07.19.40,55	25 000	28	49°58'51,7"	78°45'21,2"

Для построения годографа использовались записи стационарных сейсмических станций Национального ядерного центра Республики Казахстан Курчатов, Маканчи, Восточное, Боровое, Чкалово и Зеренда. Кроме того, была организована регистрация взрывов на близких расстояниях - от 0.1 км до 15 км специальной сейсмической сетью из четырех временных станций, а также регистрации взрывов еще двумя временными станциями, расположенными в районе селений Баянаул и Каркаралинск (эти станции функционировали при проведении советско-американского эксперимента в 1988 году). Сейсмические сигналы на близких расстояниях (от 0.1 км до 15 км) регистрировались с использованием оборудования лаборатории Los-Alamos и при сотрудничестве с учёными этой лаборатории. Доктора В.Ё.Ким и М.Хаггерти (Ламонт-Дохертская земная обсерватория (LDEO), Колум-

бийский Университет США) принимали участие в записи региональных сигналов на временных и постоянных сейсмических станциях в рамках соглашения между Консорциумом университетов (IRIS) и Национальным Ядерным Центром Республики Казахстан. Оборудование, использованное на временных станциях, являлось собственностью LDEO.

Регистрация взрывов производилась цифровой сейсмической аппаратурой по трем компонентам – Z, N-S и E-W. На временных станциях регистрацию вели станции PASSCAL, на стационарных – сейсмоприемники STS-2, REFTEK, на станциях Чкалово и Восточное – сейсмоприемники CMG-3, REFTEK, что обеспечило высокую точность определения времен, широкий частотный и большой динамический диапазон регистрации сейсмических сигналов. В табл. 2, в порядке возрастания эпицен-

тральных расстояний, приведен перечень станций, записи которых использованы в данной работе.

Таблица 2. Временные и стационарные сейсмические станции, регистрировавшие калибровочные взрывы 1998 г., и соответствующие эпицентральные расстояния ( $\Delta$ , км).

Станция	Код	$\Delta$ , км.
Взрыв 100 тонный, Дегелен.		
Выносная	S <sub>3</sub>	3,3
Выносная	S <sub>6</sub>	5,9
Выносная	S <sub>4</sub>	11,5
Выносная	S <sub>5</sub>	13,6
Курчатов	KUR	102
Каркаралинск	KKL	194
Баянаул	BAY	210
Маканчи	MAKZ	442
Восточное	VOS	589
Боровое	BRV	652
Чкалово	CHK	670
Зеренда	ZRN	719
Взрыв 25 тонный, Балапан.		
Каркаралинск	KKL	254
Баянаул	BAY	246

На рис.1 приведены записи Z-компоненты сейсмического поля 100- тонного взрыва, выполненные наиболее близкими станциями S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub> (табл.2), на которых по результатам анализа выделены продольные, поперечные и поверхностные волны. На рис.2 дана аналогичная запись станции Курчатов на удалении 102 км. На записи этой станции четко выделяются два вступления от 100-тонного взрыва продольных P - волн с разницей во времени 3,3с, причем второе из них по интенсивности превосходит первое. В поперечных S -волнах также выделяются два вступления, после которых наблюдаются очень интенсивные поверхностные волны. В записях 25-тонного взрыва 1997г. вторые P и S вступления выделены не были. Как выяснилось, это отраженные от границы Мохоровичича волны  $P_M^{omp}$  и  $S_M^{omp}$ , которые чрезвычайно редко удается столь отчетливо наблюдать на сейсмических записях.

К наиболее интересной части годографа в пределах расстояний 180-250км, где происходит смена типов волн, вступающих на записи первыми, относятся записи станций Каркаралинск и Баянаул. Трехкомпонентные записи 100-тонного взрыва этих станций приведены на рис.3. Зарегистрированные продольные волны имеют сложную структуру. Начало группы продольных волн связано с малоинтенсивными низкочастотными колебаниями, продолжительностью 0,6с – 0,8с. Вслед за ними вступает высокочастотная Pn-волна, превосходящая их по интенсивности. Максимальные колебания в P-волнах связаны с P<sub>g</sub>-волной. Их интенсивность в несколько раз превосходит интенсивность Pn-

волны и ее низкочастотного предшественника. В группе S волн удается выделить Sn-волну, характеризующуюся смещением доминантных периодов в более длиннопериодную область и некоторым ростом амплитуд по сравнению с P-кодой. Затем отмечается L<sub>g</sub>-волна, с которой связан максимум интенсивности этой части записи.

На записи станции Маканчи волновая картина в P-волнах также сложная. В течение первой секунды отмечены низкочастотные колебания слабой интенсивности. Затем четко выделено вступление высокочастотной Pn-волны. Через 8,8 с отмечено начало P<sub>g</sub>-волны - наиболее интенсивной в группе продольных волн. В группе поперечных волн отмечены два типа волн – Sn и L<sub>g</sub>.

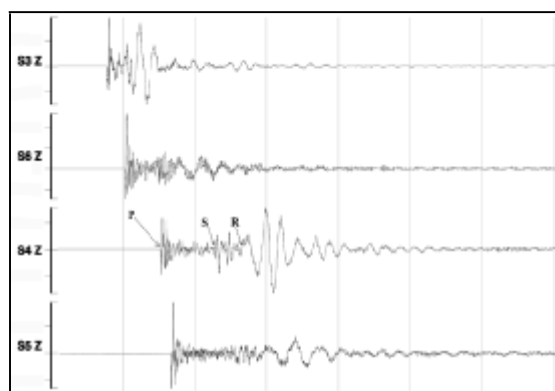


Рис.1. Записи 100-тонного взрыва выносными станциями. Вертикальная компонента. (между вертикальными линиями 2 сек).

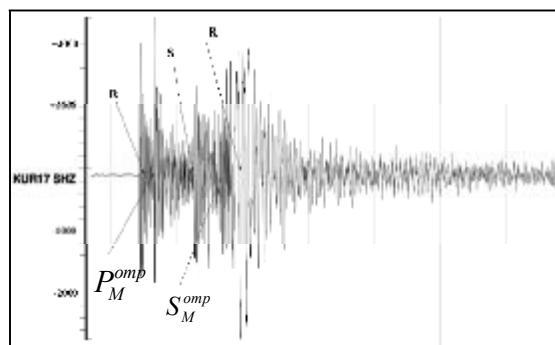


Рис.2. Запись 100-тонного взрыва. Станция Курчатов. Вертикальная компонента. (между вертикальными линиями 5 сек)

На наибольшем удалении - в сейсмической группе Боровое (рис. 4) структура записей сходна для всех станций. В P-волнах в основном наблюдаются три вступления: низкочастотное первое, после него примерно через секунду - высокочастотное второе (Pn) и, наконец, через 10-12 секунд P<sub>g</sub>-волна. Соотношение интенсивностей P<sub>g</sub> и Pn волн изменилось в пользу Pn-волны. В группе S-волн

выделены Sn- и Lg- волны. Максимальные колебания относятся к Lg- волне.

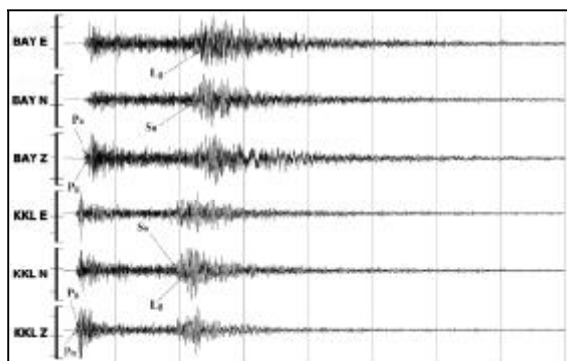


Рис.3. Записи 100-тонного калибровочного взрыва. Станции Баянаул, Каркаралинск. Вертикальная и горизонтальные компоненты. (между вертикальными линиями 15 сек).

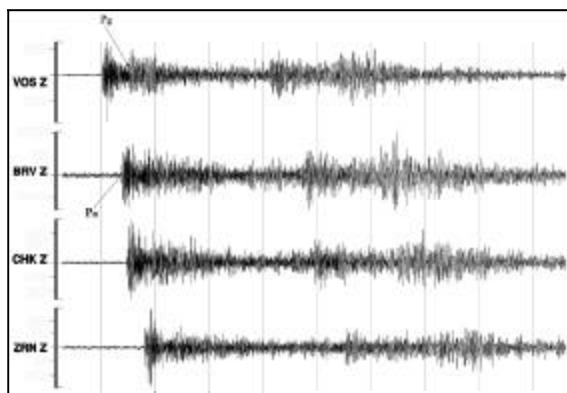


Рис.4. Записи 100-тонного взрыва. Станции сейсмической группы Боровое. Вертикальная компонента. (между вертикальными 20 сек).

Сейсмограммы всех станций были использованы для пополнения годографа, составленного по данным калибровочных взрывов 1997 г.[2]. Новые данные позволили построить годограф СК-98, приведенный на рис. 5. При его построении заполнены диапазоны расстояний, в которых у первого варианта годографа оставалась неопределенность - в области выхода в первые вступления Pn-волн (до и после). Удалось продолжить годограф до 740 км с волной Pn в первых вступлениях примерно с равномерным шагом по расстоянию. Поле дискретных значений вступлений всех типов P и S волн переводится в систему времен пробега при помощи метода графической интерполяции соответствующих сейсмических фаз.

В начальной части годографа СК-98, на расстоянии 0-160км (станции S<sub>3</sub>-S<sub>6</sub>, Курчатов) получена уникальная для района информация о докритических отражениях волн P<sub>M</sub><sup>отр</sup> и S<sub>M</sub><sup>отр</sup> по так называемой "начальной точке", которая разделяет годо-

граф отраженной волны на части - докритическую и закритическую, а также контролирует начало волн Pn и Sn во вторых вступлениях. Уникальность полученных данных заключается в том, что благодаря значительной мощности взрыва и преимуществам используемой сейсмологической аппаратуры, реализованы условия выделения докритических отраженных волн от границы M, которые практически никогда не регистрируются на малых эпицентральных расстояниях при наблюдениях типа ГСЗ из-за неблагоприятных характеристик регистрирующих каналов (малый динамический диапазон, узкополосная частотная характеристика). Эти волны обычно подменяются экстравагантным набором спорадических осей синфазностей, регистрируемых на ожидаемых временах. Выделение абсциссы начала волн Pn и Sn также весьма важно и информативно, поскольку дает возможность раздельно и корректно вычислять скоростные модели земной коры и мантии.

Полученный годограф основных сейсмических волн для расстояний 0-740 км - СК-98, в цифровом виде представлен в табл. 3. Здесь с шагом 10км-20км приведены численные значения времен пробега волн P, Pn, Pg, S, Sn, Lg.

Таблица 3. Обобщенные годографы основных сейсмических волн СК-98

$\Delta$ , км	P, Pg	Pn	S, Lg	Sn
0	0,0		0,0	
10	1,8		3,3	
20	3,5		6,3	
30	5,2		9,3	
40	7,0		12,1	
60	10,4		17,4	
80	13,6		22,9	
100	16,7	20,2	28,3	35,6
120	20,0	22,3	34,0	39,1
140	23,2	24,8	39,6	43,2
160	26,4	27,3	45,4	47,5
180	29,6	29,9	51,0	51,9
200	32,8	32,6	56,8	56,4
220	35,8	35,2	62,2	60,9
240	39,0	37,9	68,0	65,6
260	42,2	40,5	73,4	70,1
280	45,4	43,1	78,8	74,5
300	48,5	45,6	84,2	79,0
320	51,7	48,2	89,5	83,5
340	54,7	50,9	94,9	87,9
360	57,8	53,5	100,3	92,4
380	60,8	56,2	105,6	97,0
400	63,8	58,8	110,9	101,3
420	66,8	61,4	116,2	105,6
440	69,9	63,8	121,6	109,9

$\Delta$ , км	P, Pg	Pn	S, Lg	Sn
460	73,0	66,3	126,8	114,0
480	76,0	68,6	132,0	118,2
500	79,0	71,1	137,4	122,5
520	82,0	73,5	142,8	126,6
540	85,0	75,9	148,1	130,9
560	88,0	78,3	153,3	135,0
580	91,1	80,7	158,5	139,0
600	94,1	83,0	163,7	142,8
620	97,1	85,4	168,9	146,5
640	100,2	87,6	174,3	150,2
660	103,3	90,0	179,6	154,1
680	106,2	92,4	184,6	158,3
700	109,2	95,0	189,4	162,4
720	112,2	97,5	194,1	166,6
740	115,3	100,0		

Было проведено сопоставление полученного годографа СК-98 с используемым для исследуемого района годографом, составленным в Комплексной сейсмологической экспедиции (КСЭ) Института Физики Земли АН СССР в 1964 г. [3], а также с годографом IASPEI-91.

Все три модели практически одинаковы для Pn- и Sn- волн во всём изучаемом диапазоне расстояний. Для Pg волны существуют значительные отклонения вычисленных времён пробега годографов IASPEI и КСЭ. Скорость этой волны по годографу СК-98 превышает соответствующие значения в двух других моделях. В меньшей степени, но это также свойственно и Lg –волне. Расхождения в годографах становятся понятными, если учесть, что годографы, составленные по землетрясениям, характеризуют орогенную нижнюю часть земной коры, где по сравнению с платформой скорости  $V_p$  и  $V_s$  имеют меньшие значения. Новый годограф, построенный по калибровочным взрывам, является характеристикой именно платформенной коры. Совпадение годографов Pn свидетельствует о примерно равных значениях  $V_p$  в диапазоне глубин 45-120 км мантии на платформе и в орогенах.

Достигнутой длины годографов с избытком хватает для того, чтобы изучать скоростную модель земной коры на платформе на всю ее мощность по годографам P+Pg и S+Lg, описывающим «прямые»

рефрагированные волны, проникающие до ее подошвы. Так, на Семипалатинском испытательном полигоне, где средняя глубина границы М - 44 км (по данным МОВЗ и ГСЗ), для ее изучения достаточно длина годографа порядка 600 км. Далее прослеживаются кулисообразные оси синфазностей, напрямую соответствующие типам волн Pg и Lg и генезису, приписываемому им в экспериментальной сейсмологии. Таким образом, реализована возможность изучения скоростных характеристик платформенной коры, а также, что особенно важно, мощного слоя верхней мантии (80км), что недоступно ГСЗ с обычной длиной годографа до 250-300км, а также сейсмологии в связи с отсутствием на платформе сильных землетрясений для ее детального изучения.

При вычислениях одномерной обобщенной скоростной модели отдельно для соответствующих годографов земной коры и мантии применено решение обратной задачи рефрагированных волн «ИНВЕРС» [4]. Алгоритм позволяет вычислить участки сечения с положительными и отрицательными значениями градиента  $\partial V / \partial z$ . В нашем случае среда для получения одномерного сечения была представлена в виде плоскопараллельных скоростных слоёв. Это позволило использовать алгоритм решения двумерной обратной задачи для вычисления скоростной модели. Полученные скоростные модели представлены на рис. 6 и в табл. 4, 5, 6. На рис. 6, для сравнения, показаны обобщённые модели продольных и поперечных волн земной коры, полученные ранее методом ГСЗ.

В ближайшем будущем предполагается провести проверку новой модели на тестовых примерах, в качестве которых предполагается использовать следующие данные, полученные на территории Семипалатинского испытательного полигона: новых калибровочных взрывов, проведенных в 1999 -2000 г.г., подземных ядерных и химических взрывов, проведенных в советское время; землетрясений с эпицентрами вблизи полигона. Результаты тестирования позволят оценить, насколько новая модель улучшит локализацию сейсмических событий при использовании записей различно расположенных сейсмических станций.

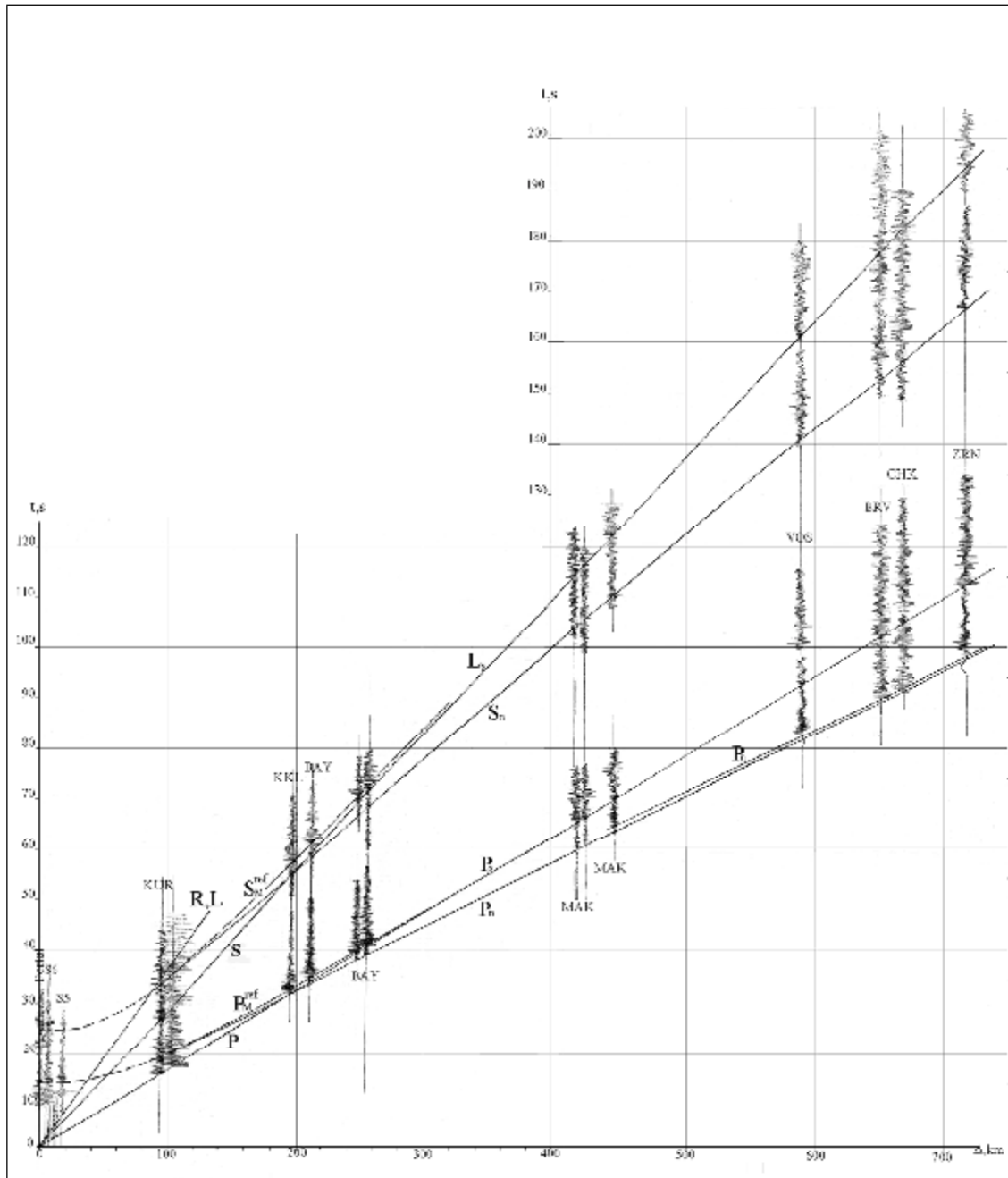


Рис.5. Обобщенный годограф продольных и поперечных волн для Центрального Казахстана по записям калибровочных взрывов

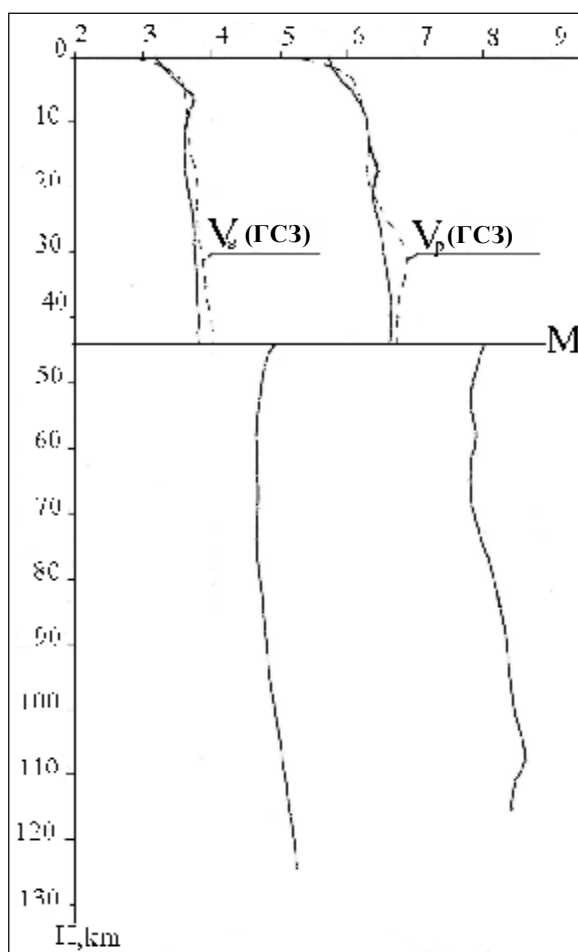


Рис.6. Обобщенная скоростная модель продольных и поперечных волн земной коры и верхней мантии для Центрального Казахстана по записям калибровочных взрывов (сплошная линия) и данным ГСЗ (пунктирная линия).

Таблица 4. Обобщенная скоростная модель земной коры по данным ГСЗ.

Н, км	40	37.5	35	32.5	30	27.5	25	22.5	20	17.5	15	12.5	10	7.5	5	2.5	0	Δ, км
$V_s$	3.99	3.93	3.91	3.89	3.85	3.82	3.79	3.77	3.78	3.77	3.70	3.67	3.64	3.63	3.60	3.45	2.90	$V_s$ , км/с
$V_p$	6.74	6.75	6.80	6.86	6.87	6.75	6.57	6.45	6.35	6.28	6.30	6.30	6.30	6.20	6.15	6.00	5.25	$V_p$ , км/с

Таблица 5. Расчетная скоростная модель земной коры по годографам от калибровочным взрывам.

$V_s$		$V_p$		$V_s$		$V_p$	
Н, км	$V$ , км/с	Н, км	$V$ , км/с	Н, км	$V$ , км/с	Н, км	$V$ , км/с
0.1	3.18	0.1	5.72	32.0	3.76	37.8	6.64
2.6	3.39	1.8	5.78	36.7	3.77	39.7	6.62
6.0	3.73	5.2	6.06	40.4	3.82	41.9	6.62
8.2	3.67	8.6	6.24	42.4	3.78	44.0	6.66
11.0	3.61	10.9	6.29	44.0	3.79		
14.4	3.60	14.3	6.31				
17.3	3.61	17.3	6.45				
21.9	3.68	18.8	6.36				
26.0	3.73	23.6	6.40				
28.6	3.73	32.1	6.52				

Таблица 6. Расчетная скоростная модель мантии по годографам от калибровочных взрывов.

$V_s$			$V_p$		
Н, км от поверхности	Н, км от М	$V_s$	Н, км от поверхности	Н, км от М	$V_p$
44.1	0.1	4.88	44.1	0.1	8.0
44.4	0.4	4.88	44.4	0.4	8.0
47.2	3.2	4.77	45.9	1.9	7.94
52.	8.6	4.70	49.7	5.7	7.84
58.4	14.4	4.65	54.3	10.3	7.81
63.9	19.9	4.67	57.6	13.6	7.88
68.7	24.7	4.67	60.9	16.9	7.82
73.9	29.9	4.65	65.1	21.1	7.80
78.6	34.6	4.70	68.8	24.8	7.82
82.0	38.0	4.74	76.2	32.2	8.05
85.1	41.1	4.75	84.6	40.6	8.24
88.2	44.2	4.77	88.4	44.4	8.31
99.7	55.7	4.93	92.6	48.6	8.35
116.2	72.2	5.16	101.2	57.2	8.47
122.2	80.2	5.25	107.6	63.6	8.62
			110.9	66.9	8.46
			115.4	71.4	8.41

#### Литература.

- 1) Беляшова Н.Н., Тухватулин Ш.Т. и др. Калибровочные испытания ДВЗЯИ на Семипалатинском испытательном полигоне. 1997-2000 гг. Настоящий сборник.
- 2) Шацлов В.И., Беляшов А.В., Малахова М.Н. Использование калибровочных взрывов для уточнения скоростного разреза земной коры бывшего Семипалатинского ядерного полигона. // Тезисы докладов II Международной конференции по проблемам нераспространения ядерного оружия. Курчатов, 14-17 сентября 1998 г. С. 58.
- 3) Нересов И.Л., Раутиан Т.Г. Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500км. Труды Института Физики Земли, М., 1964. Том 32, с. 63-87.
- 4) Мишенькина З. Р., Шелудько И. Ф., Крылов С. В. Использование линеаризованной постановки обратной кинематической задачи для двумерных полей времени  $t(x,1)$  рефрагированных волн. В кн. Численные методы в сейсмических исследованиях. Изд. "Наука". Сиб. Отдел., 1983, Новосибирск, с. 140-152.

#### Жоғарғы мантияның және жер қыртысының шапшандық қабатын дәлдеу үшін, Семей сынақ полигонында калибрлық жарылыстардың пайдалануы

<sup>1</sup>Беляшова Н.Н., <sup>2</sup>Шацлов В.И., <sup>1</sup>Михайлова Н.Н., <sup>1</sup>Комаров И.И.,  
<sup>1</sup>Синева З.И., <sup>1</sup>Беляшов А.В., <sup>1</sup>Малахова М.Н.

<sup>1</sup>Геофизикалық зерттеу институты

<sup>2</sup>ҚР Білім және ғылыми министрлігінің сейсмология институты

1997 және 1998 жылдары бұрынғы Семей полигонында 25 және 100 тонналық зарядпен жасалған дәлдіктеу жарылыстарды, 0-ден бастап 720 км ара қашықта орналасқан Қазақстан аумағында бір қатар сандылық сейсмикалық станциялар тіркеді. Қазақстанның тұғырнамалық бөліміндегі қыртыстың және жоғарғы жақтағы мантияның годографын және бір өлшемдегі жылдамдықтардың жинақталған моделін жасау үшін, сейсмограммалар қолданылған. 0-ден бастап 740 км ауқымда Р, Рn, Рg, S, Sn, Lg толқындардың оту уақыты кестемелері, қыртыстың 44 км тереңдікке шеін және жоғарғы жақтағы мантияның 120 километр тереңдікке шеін жылдамдылық моделі көрсетілген. Жаңадан жасалған годографты қолданып жүрген КСЭ және IASPEI - 91 годографтармен салыстыру жұмысы өткізілді.

**Using Calibration Explosions at Semipalatinsk Test Site for Adjustment of Velocity  
Cross-Section of Earth Crust and Upper Mantle**

<sup>1)</sup>N.N. Belyashova, <sup>2)</sup>V.I. Shatsilov, <sup>1)</sup>N.N. Mikhailova, <sup>1)</sup>I.I. Komarov,  
<sup>1)</sup>Z.I. Sinyova, <sup>1)</sup>A.V. Belyashov, <sup>2)</sup>M.N. Malakhova

<sup>1)</sup>*Institute of Geophysical Research*

<sup>2)</sup>*Institute of Seismology, Ministry of Education and science, Republic of Kazakhstan*

The calibration explosions, conducted at former Semipalatinsk test site in 1997 and 1998, with charge of 25 tons and 100 tons, were recorded by a number of digital seismic stations, located in Kazakhstan at distances varying from 0 to 720 kilometers. The recorded seismograms were used for creation of travel time curves and generalized one-dimensional velocity models of the crust and upper mantle of the platform region of Kazakhstan. The travel time tables were obtained for the P, Pn, Pg, S, Sn, Lg phases for a distance range from 0 to 740 kilometers, and velocity model of the Earth's crust to the depth 44 kilometers and the mantle to the depth up to 120 kilometers. A comparison of compiled hodograph with existing CSE and IASPEI-91 hodographs was made.