

УДК 550.34

КАРЬЕРНЫЕ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ВЗРЫВЫ В РАЙОНЕ ГОРОДА АЛМАТЫ КАК ЭТАЛОННЫЕ СОБЫТИЯ В ЗАДАЧАХ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Аристова И.Л., Соколова И.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

На основе данных по эталонным взрывам (с хорошо определенными параметрами), произведенными в районе г. Алматы, построен новый годограф основных сейсмических региональных фаз. Проведено сравнение годографа с другими скоростными моделями, которые используются для локализации событий на территории Северного Тянь-Шаня. Показано, что при использовании нового годографа размеры эллипсов ошибок локализации сейсмических событий меньше, чем при использовании других годографов.

ВВЕДЕНИЕ

Для задач мониторинга сейсмических событий важное значение имеют базы данных по так называемым эталонным событиям. Это события с хорошо известными параметрами источника, такими как: время в очаге t_0 , координаты эпицентра (широта и долгота), глубина (если это взрывы в скважинах – то глубина заложения заряда), а также мощность взрыва. В зависимости от полноты сведений об источнике, эталонные события разделяются на классы по точности определения параметров очага. Эталонные события, с одной стороны, служат основой изучения скоростных характеристик среды, построения годографов сейсмических волн. С другой стороны, по эталонным событиям производится оценка точности локализации по различным скоростным моделям и различным методам, это наиболее реальная характеристика возможной погрешности решения при поиске источника по записям сейсмических сетей.

Вопрос сбора данных об эталонных взрывах постоянно находится в сфере внимания в Центре данных ИГИ МЭ РК. В частности, к эталонным взрывам относились калибровочные взрывы на территории бывшего Семипалатинского полигона, произведенные на площадках Балапан и Дегелен в 1997–2002 гг. [1]. Данные по этим взрывам систематизированы, по ним построены обобщенные годографы для большой территории Казахстана, рассчитаны энергетические и магнитудные характеристики [2, 3]. В КНЦД на регулярной основе составляется оперативный бюллетень для территории Центральной Азии, обрабатываются сильные удаленные события. В связи с этим, в рутинной практике для определения положения гипоцентра сейсмического события по всей сети станций, для далеких и региональных событий, используется универсальный годограф IASPEI91 (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) [4]. Для решения различных практических задач и научных исследований применяются другие, региональные годографы и скоростные модели, позволяющие получать более точные решения по источникам сейсмических волн [3]. В ряде случаев, например, для оценки сейсмической опасности г. Алматы, функционирования системы раннего преду-

ждения о землетрясениях и др., необходимо точное знание положения гипоцентра, для локализации источника нужно использовать региональный годограф, более точно отражающий особенности глубинного строения территории, локальные неоднородности в литосфере. В статье приведены данные об эталонных взрывах в районе города Алматы, построенные с использованием этих данных годографы различных фаз сейсмических волн, а также примеры сравнительного анализа использования разных годографов при локализации эталонных взрывов. По литературным источникам были установлены хорошо описанные взрывы при строительстве селезащитной плотины в Медео и взрывы в карьере Котур-Булак близ г. Алматы, по записям которых на сейсмических станциях можно построить локальный годограф.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Селезащитная плотина Медео в русле реки Малая Алматинка (в высокогорном урочище Медео вблизи г. Алматы) создавалась в 1966–1967 гг. с использованием уникальных направленных взрывов большой мощности. Большое внимание было уделено исследовательской работе, сопровождающей эти взрывы. Регистрацию взрывов вели как в ближней, средней так и в дальней зоне. Все взрывы в Медео можно считать эталонными, для них известно точное время проведения, координаты, имеются записи по многим станциям. В таблице 1 представлены параметры взрывов, записи которых могут быть использованы для построения годографов.

Таблица 1. Параметры взрывов в Медео для создания плотины

Дата	Время	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	mb	Мощность заряда, т	Кол-во зарядов
21.10.1966	04:59:59.1	43,1512	77,0665	5,2	1689	4
21.10.1966	05:00:02.7	43,1513	77,0676	5,3	3604	1
14.04.1967	05:00:08.6	43,1514	77,0589	5,0	1121	5
14.04.1967	05:00:10.8	43,1514	77,0582	5,0	2825	5
20.11.1973	05:00:21.5	43,1467	77,0575	-	200	—

Примечание – координаты взрывов уточнены Великановым А.Е. по космоснимкам с большим разрешением.

Первый, правобережный взрыв, произведен 21 октября 1966 г. Он был двойным. Вначале взорваны 4 заряда общим весом 1690 т, через 3,6 с – основной заряд весом 3600 т (рисунок 1). Второй, левобережный взрыв, осуществлен 14 апреля 1967 г. Заряды взрывчатого вещества размещались в 10 камерах. Взрыв также был двойным, первый из них состоял из пяти зарядов общим весом 1117 т (все пять зарядов взорваны практически одновременно), второй взрыв состоял также из пяти зарядов весом 2825 т (произведен через 2,2 с после первого).



Рисунок 1. Медео. Первый направленный взрыв 21 октября 1966 г.

В течение 1972–1976 гг. вблизи плотины, для ее наращивания, было проведено большое количество относительно слабых взрывов. Самый сильный из них, мощностью ~200 т, зарегистрирован 23 ноября 1973 г. (с $K=10,8$) [6].

Карьер Котур-Булак вблизи Алматы (рисунок 2) очень компактный, размером в длину ~800–900 м, в ширину ~450 м (координаты 43,27804 с.ш. и 77,0779 в.д.). Взрывы, произведенные на карьере, можно считать эталонными событиями GT1. Рядом с карьером на расстоянии 4,6 км находится сейсмическая станция KOTS (Котур-Булак) СОМЭ МОН РК, которая работает с 2003 г., поэтому записи взрывов отбирались с 2003 г. Для построения годографа взрывов карьера Котур-Булак были использованы данные совместного бюллетеня KNDC и СОМЭ МОН РК. В предыдущих работах время взрыва t_0 было рассчитано от опорной станции Котур-Булак, что привело к завышению скоростей [5]. Были уточнены координаты взрывов на карьере по космоснимкам (рисунок 2). Для задачи построения годографа выбирались те взрывы, которые были зарегистрированы станцией Котур-Булак и большим количеством других сейсмических станций. Всего для построения годографа были отобраны и обработаны записи 66 Котур-Булакских взрывов за 2003–2016 гг. (таблица 2).

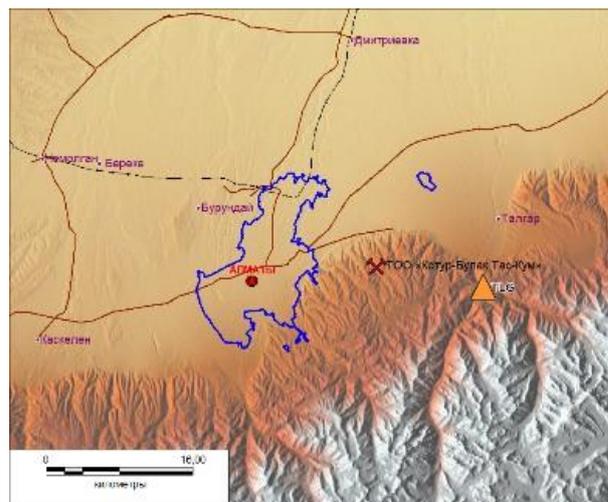


Рисунок 2. Геоморфологическая карта и космоснимок района карьера Котур-Булак

Таблица 2. Взрывы в карьере Котур-Булак, использованные для построения годографа

Дата	Время	Дата	Время	Дата	Время
08.05.2003	6:31:00	07.10.2005	7:31:17	24.08.2007	7:31:47
23.07.2003	11:31:13	05.11.2005	10:31:12	29.08.2007	7:31:32
09.08.2003	7:31:07	10.11.2005	10:31:16	20.09.2007	7:31:05
21.08.2003	7:31:14	06.12.2005	11:31:02	15.10.2007	9:31:04
10.09.2003	9:31:02	26.12.2005	10:31:13	30.10.2007	10:31:44
11.10.2003	11:31:00	06.04.2006	13:31:10	14.04.2008	8:31:22
30.10.2003	10:31:51	16.05.2006	11:31:25	16.07.2008	7:31:44
11.12.2003	7:31:49	31.05.2006	12:31:25	29.10.2008	3:31:29
24.01.2004	8:31:45	03.07.2006	15:31:13	12.12.2008	9:31:16
25.02.2004	10:31:28	06.07.2006	7:31:38	25.04.2009	7:31:50
31.03.2004	10:31:22	30.11.2006	10:31:03	21.07.2009	11:31:55
06.05.2004	13:31:14	05.12.2006	6:31:45	28.10.2009	10:31:26
16.06.2004	10:31:14	29.12.2006	6:31:07	17.08.2010	6:31:35
29.06.2004	8:31:04	07.02.2007	6:31:53	21.12.2010	9:31:45
06.10.2004	12:31:54	07.03.2007	6:31:27	21.04.2011	8:31:26
11.02.2005	9:31:25	07.05.2007	12:31:22	26.09.2011	9:31:29
17.03.2005	7:31:29	29.06.2007	6:31:03	19.01.2013	7:31:23
21.06.2005	6:31:44	06.07.2007	7:31:29	21.05.2013	13:31:33
15.09.2005	6:31:58	12.07.2007	7:31:57	30.07.2013	10:31:46
16.09.2005	6:31:33	03.08.2007	7:31:36	16.05.2014	10:31:55
26.09.2005	8:31:14	07.08.2007	12:31:58	31.10.2014	9:31:07
30.09.2005	6:31:02	20.08.2007	9:31:46	31.08.2016	3:31:46

ПОСТРОЕНИЕ ГОДОГРАФА ПО ЭТАЛОННЫМ ВЗРЫВАМ

Для построения годографа были использованы аналоговые сейсмограммы из архива КСЭ ИФЗ АН СССР взрывов в Медео, описанные в [5]. Для первого взрыва 1966 г. проведены 47 замеров различных фаз, для взрыва 1967 г. – 50 замеров и для третьего, наиболее слабого, – 26. Определенную сложность в обработке создавали двойные взрывы из-за невозможности в некоторых случаях выделить фазы второго взрыва. Были уточнены координаты станций, что позволило улучшить качество годографа. Так, например, у станции Рыбачье до 1962 г. координаты станции были: широта – 42,45 с.ш., долгота – 76,0833 в.д., а в период взрывов станция имела следующие координаты: широта – 42,127, долгота – 77,183.

На рисунке 3 приведено расположение эпицентров взрывов и зарегистрировавших их сейсмических станций, на рисунке 4 – графики зависимости времени пробега региональных фаз от расстояния по результатам регистрации взрывов в Медео. Из рисунка 4 видно, что не все расстояния являются предста-

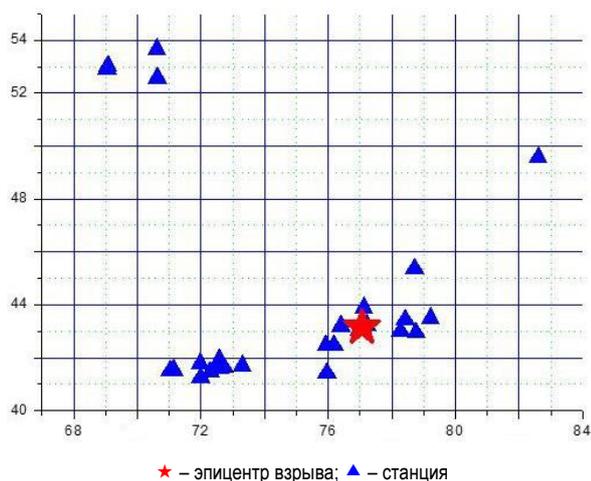


Рисунок 3. Расположение станций, записи которых использованы для построения годографа сейсмических волн по взрывам в Медео

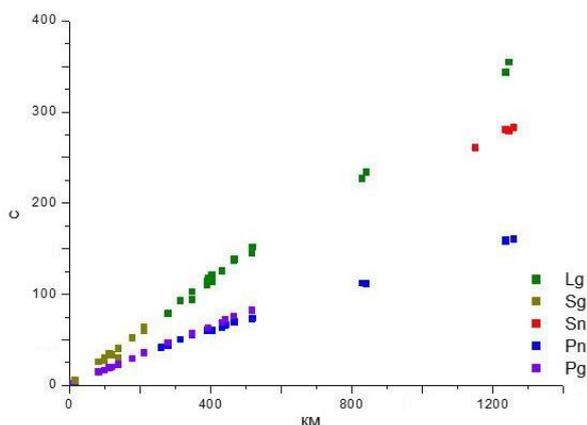


Рисунок 4. Годограф сейсмических волн по взрывам в Медео

вительными, так, только по информации от взрыва Медео невозможно построить надежный годограф для фазы Sn. Поэтому годографы необходимо было дополнить результатами измерений времен пробега по другим эталонным взрывам, для чего и использованы взрывы карьера Котур-Булак, расположенного вблизи г. Алматы.

На рисунках 5, 6 показаны расположение карьера Котур-Булак и сейсмических станций, записи которых использованы для построения годографа и график времен пробега основных региональных сейсмических фаз в зависимости от эпицентрального расстояния для Котур-Булакских взрывов.

Для расчета сводных годографов были собраны все записи сейсмических станций, как для взрывов Медео, так и Котур-Булакских взрывов для эпицентральных расстояний от 10 до 1450 км (рисунок 7). В таблице 3 приведены уравнения времен пробега от расстояний для основных типов сейсмических волн Pn, Pg, Sg, Lg Sn и их скорости для совместного годографа Медео и Котур-Булак.

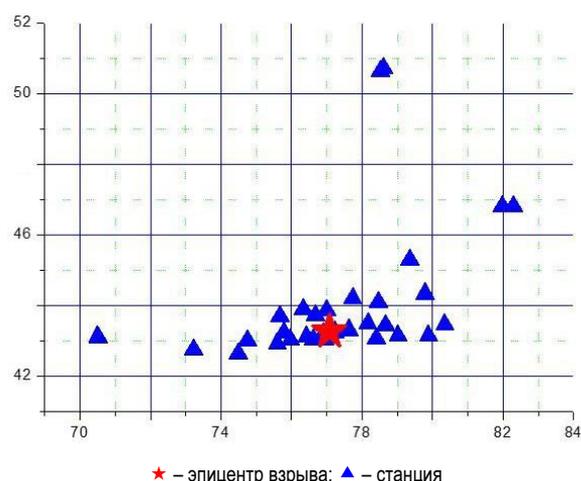


Рисунок 5. Расположение сейсмических станций, записи которых использованы для построения годографа, относительно карьера Котур-Булак

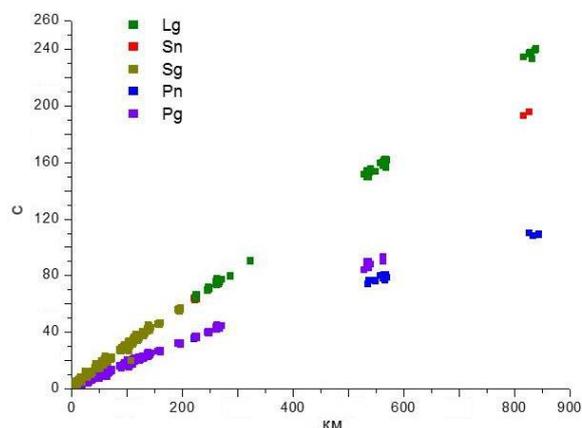


Рисунок 6. Годограф по сейсмограммам взрывов в карьере Котур-Булак

Таблица 3. Зависимость времен пробега от расстояний для основных типов сейсмических волн по взрывам в Медео и карьере Котур-Булак

Фаза	Расстояние, км	Уравнение	Средняя скорость, км/с
Pn	220–1400	$11,935+0,118 \cdot \Delta$	8,44
Pg	10–850	$0,727+0,163 \cdot \Delta$	6,15
Sg	10–220	$1,639+0,285 \cdot \Delta$	3,51
Lg	220–850	$1,713+0,280 \cdot \Delta$	3,57
Sn	220–1450	$1,187+0,212 \cdot \Delta$	4,71

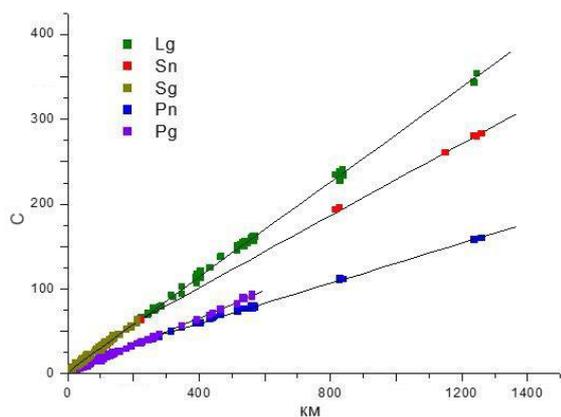


Рисунок 7. Сводный годограф по результатам регистрации взрывов в Медео и карьере Котур-Булак

СРАВНЕНИЕ ИЗВЕСТНЫХ И НОВОЙ СКОРОСТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для рассматриваемого района созданы и используются в разных задачах различные скоростные сейсмические модели [3, 5, 7–9]:

1. Скоростная модель, разработанная в Институте сейсмологии АН КазССР по результатам интерпретации и обобщения ретроспективных фондовых и опубликованных данных о глубинных сейсмических зондированиях по системе профилей (Шацлов В.И. [7]), используется в СОМЭ МОН РК с 1980 г. для определения координат гипоцентров (рисунки 8 и 9). Годограф (рисунок 9) рассчитан для глубин от 0 до 70 км.

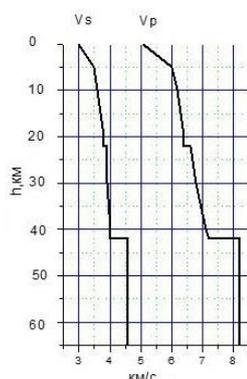


Рисунок 8. Сейсмический скоростной разрез земной коры, созданный в ИС АН КазССР (Шацлов В.И. [7])

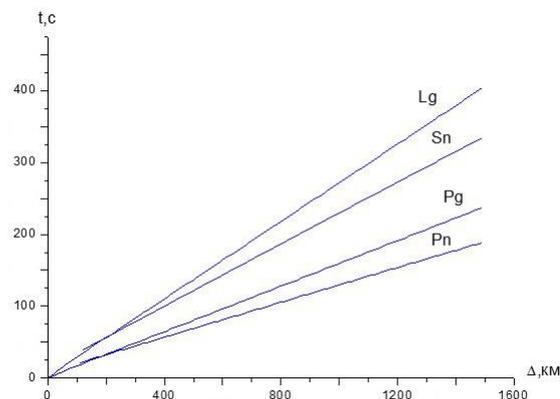
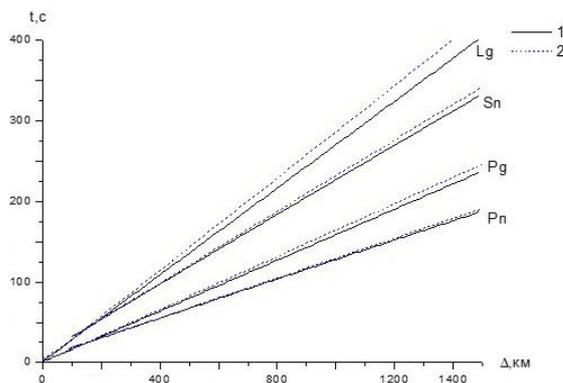


Рисунок 9. Годограф, созданный в ИС АН КазССР (Шацлов В.И. [7]) для глубины $h=0$ км

Сравнение регионального годографа Шацлова В.И. и осредненного для всей земли годографа IASPEI-91 показано на рисунке 10. Наблюдается значительное отличие годографа Шацлова от IASPEI-91, особенно для Lg-волн. Скорость волн по годографу Шацлова В.И. значительно превышает скорость волн по годографу IASPEI-91.



годографы: 1 – Шацлова В.И. [7], 2 – IASPEI-91 [4]

Рисунок 10. Сопоставление годографов для глубины $h=15$ км

2. Годограф для территории Казахстана создан в Центре данных Института геофизических исследований для региональных эпицентральных расстояний 0–1500 км (Михайлова Н.Н. и др. [3]), по данным калибровочных химических взрывов, произведенных на территории Семипалатинского испытательного полигона (1997–2000 гг.) и ядерных (1964–1975 гг.). Обработка данных включала интерпретацию волновой структуры записей, определение времен вступления различных сейсмических фаз в диапазоне расстояний от 0 до 1000 км. Анализ проведен по трем группам данных, различающихся эпицентральными расстояниями и соответственно волновой картиной на сейсмограммах. Первая группа – ближняя зона, $\Delta = 0–30$ км. Вторая группа – промежуточная зона, $\Delta = 50–300$ км, третья группа – дальняя зона (до 1000 км). Наиболее интересная и сложная часть годо-

графа относится к диапазону расстояний 100–250 км, где происходит смена типов волн, вступающих первыми. На этих расстояниях расположены станции Каркаралинск и Баян-Аул. В Р-волнах наблюдается очень сложная картина: сначала – малоинтенсивное низкочастотное вступление, затем – высокочастотная Pn, максимальные колебания в Р-волнах связаны с P_g-волной. В группе S-волн сначала вступает волна Sn, отличающаяся в основном спектром от коды Р, и самая интенсивная L_g-волна. Годограф построен для основных региональных фаз Р, Pn, P_g, Sn, S, L_g для глубины 0 км (рисунок 11). На основе годографа для глубины 0 км были рассчитаны скоростные модели для разных глубин (рисунок 12). Этот годограф [3] широко применяется в практике создания сейсмического бюллетеня Центра данных для событий из районов Центрального и Восточного Казахстана.

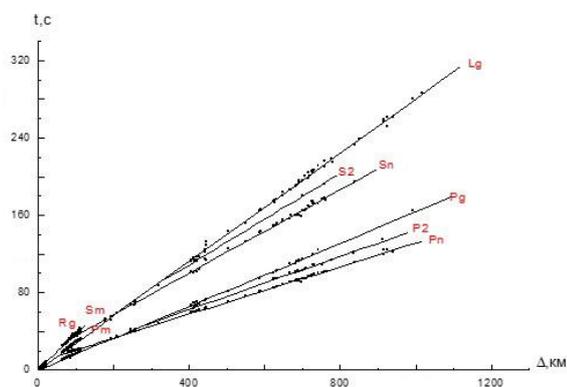


Рисунок 11. Годограф для Центрального Казахстана, созданный в ИГИ МЭ РК (Михайлова Н.Н. и др. [3])

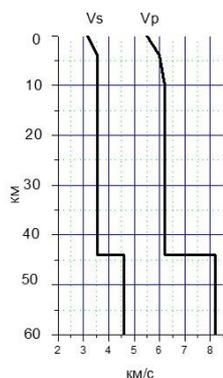


Рисунок 12. Сейсмический скоростной разрез земной коры для Казахстана (Михайлова Н.Н. и др. [3])

3. Трехмерная скоростная модель земной коры и верхней мантии Тянь-Шаня до глубин 200 км создана в Институте сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики (Сабитова Т.М., Адамова А.А. [8]) с использованием методов сейсмографии. Для создания модели использовались данные времен пробега Р- и S-волн от 1977 региональных землетрясений, 3579 телесеизмических землетрясений и от 27 подземных ядерных взрывов. На рисунке 13 показана скоростная модель, на рисунке 14

– годограф для региональных фаз. Скоростная модель Сабитовой Т.М. широко используется в практике для локализации событий из Кыргызстана и близлежащих территорий (юго-востока Казахстана и северо-запада Китая), однако для его построения были использованы данные только трех сейсмических станций на территории Казахстана: Хантау, Талгар и Подгорное [7]. Детально скоростную модель удалось построить для района южнее 43° с.ш., для района г. Алматы и Алматинской области скоростная модель не разрабатывалась.

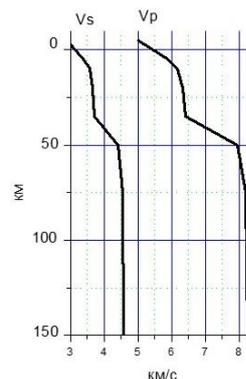


Рисунок 13. Сейсмический скоростной разрез земной коры для территории Тянь-Шаня, созданный в ИС НАН КР

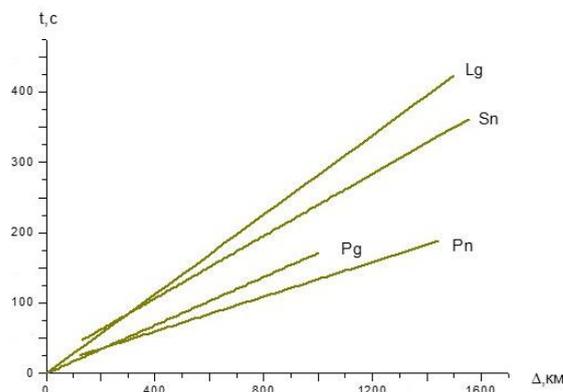


Рисунок 14. Годограф для Тянь-Шаня, созданный в ИС НАН КР (Сабитова Т.М. [8])

4. Годограф КСЭ ИФЗ АН СССР (Нересов И.Л. и Раутиан Т.Г. [9]) построен по так называемому Большому профилю в направлении Памир – р. Лена, протяженностью ~3500 км, пересекающему сейсмоактивные области Средней Азии, Казахстана, Алтая, Саян и Прибайкалья. Использованы данные 54 станций через 70–120 км по профилю, а также станций стационарной сети. Годограф (рисунок 15) построен для эпицентральных расстояний от первых сотен до 3500 км, поэтому волновая картина обработанных записей существенно варьировалась, различался набор типов волн для разных эпицентральных расстояний. Так, например, для расстояний более 2000 км измерялись времена вступления только Р-волн.

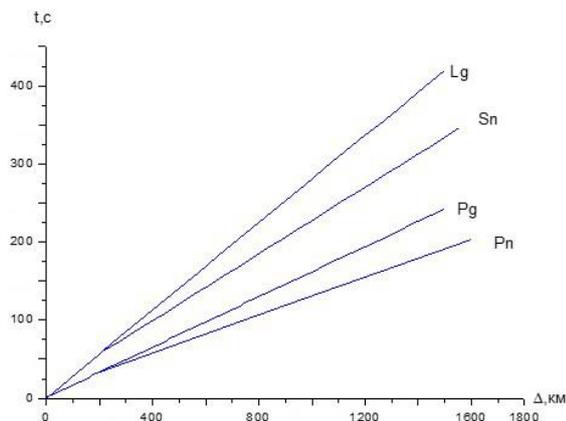
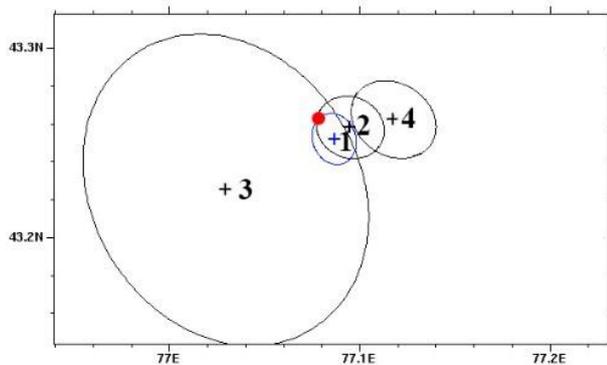


Рисунок 15. Годограф КСЭ ИФЗ АН СССР для глубины $h=0$ км (Нерсесов И.Л. и Раутиан Т.Г. [9])

Для сравнения годографов и выбора наиболее подходящего для исследуемой территории была проведена перелокализация эталонных сейсмических событий. После анализа годографов для тестирования были использованы следующие скоростные модели: годограф по данным эталонных взрывов Медео – Котур-Булак, годограф КСЭ ИФЗ АН СССР, годограф Сабитовой Т.М. для Северного Тянь-Шаня и годограф Михайловой и др. для Казахстана.

На рисунках 16, 17 показаны примеры перелокализации 2-х карьерных взрывов, произведенных на территории карьера Котур-Булак: 19.01.2013 (рисунок 16) и 31.08.2016 (рисунок 17).

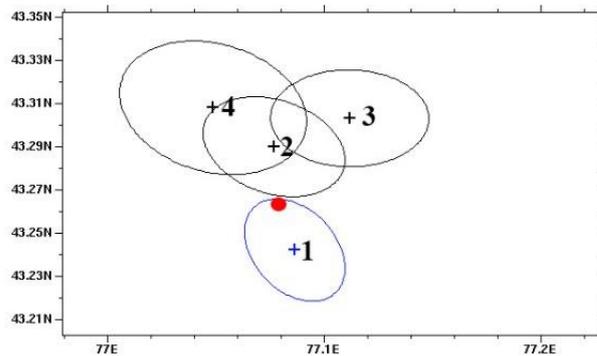


● – эпицентр эталонного взрыва 19.01.2013.
Эпицентры и эллипсы ошибок, полученные при использовании годографов: 1 – новому (по калибровочным взрывам в Медео и карьере Котур-Булак); 2 – по [3]; 3 – по [9]; 4 – по [8]

Рисунок 16. Пример локализации события 19.01.2013 г. с использованием различных годографов

ЛИТЕРАТУРА

1. Leith, W. Калибровочные испытания ДВЗЯИ на Семипалатинском испытательном полигоне. 1997–2000 гг. / W. Leith, I.J. Kluchko, С. Р. Knowles, D.A. Linger, L. Gabriet, Н.Н. Беляшова, Ш.Т. Тухватулин, В.Н. Демин, В.Е. Коновалов // Вестник НЯЦ РК, 2000. – Вып. 2 (2). – С. 31–40.
2. Михайлова, Н.Н. Сравнение калибровочных взрывов Омега-2 и Омега-3 по сейсмическим данным на региональных расстояниях / Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2002. – Вып. 2 (10). – С. 36–45.
3. Михайлова, Н.Н. Годограф сейсмических волн по результатам регистрации сигналов от химических взрывов / Н.Н. Михайлова, И.Л. Аристова, Т.И.Германова // Вестник НЯЦ РК, 2002. – Вып. 2 (10). – С. 46–54.



● – эпицентр эталонного взрыва 31.08.2016.
Эпицентры и эллипсы ошибок, полученные при использовании годографов: 1 – новому (по калибровочным взрывам в Медео и карьере Котур-Булак); 2 – по [3]; 3 – по [4]; 4 – по [8]

Рисунок 17. Пример локализации события 31.08.2016 с использованием различных годографов

При использовании нового годографа значительно уменьшился эллипс ошибок и улучшилось приближение расчетного положения эпицентра событий к истинному положению взрывов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье демонстрируется пример привлечения исторических материалов по эталонным событиям и современных данных по карьерным взрывам с хорошо известными параметрами для получения новых скоростных моделей для районирования территории по скоростным характеристикам. Это поможет в повышении эффективности мониторинга сейсмических событий, важной частью которого является локализация источников сигналов, зарегистрированных сейсмическими станциями.

Построен новый годограф для г. Алматы и его окрестностей. Проведено сравнение годографа с другими годографами, которые используются для локализации событий на Северном Тянь-Шане. Показано, что при использовании годографа по эталонным взрывам размеры эллипсов ошибок локализации стали меньше, чем при использовании других годографов. Полученные результаты можно будет использовать в практике локализации сейсмических событий, для моделирования системы раннего предупреждения г. Алматы, для оценки сейсмической опасности.

4. Kennett, B. IASPEI 1991. Seismological Tables / B. Kennett (editor) // Terra Nova. – Australian National University, Research Schol of Earth Sciences, 1991 – vol. 3, issue 2. – P. 122–122.
5. Соколова, И.Н. Исторические сейсмические записи взрывов, проведенных для создания селезащитной плотины в Медео / И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 2. – С. 128–137.
6. Гальперин, Е.И. Изучение сейсмического режима крупных промышленных центров / Е.И. Гальперин, И.Л. Нерсесов, Л.М. Воровский, Р.М. Гальперина, А.И. Чесноков. – М.: Наука, 1978. – 188 с.
7. Шацков, В.И. Скоростные модели земной коры Казахстана / В.И. Шацков [и др.]. – Алматы: Евразия, 1993. – 105 с.
8. Бакиров, А.Б. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / А.Б. Бакиров (редактор). – Бишкек: Илим, 2006. – 116 с.
9. Нерсесов, И.Л. Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500 км от эпицентра / И.Л. Нерсесов, Т.Г. Раутиан // Экспериментальная сейсмика. Труды ИФЗ АН СССР. – М.: Наука, 1964. – С. 63–87.

**АЛМАТЫ ҚАЛАСЫ АУДАНЫНДАҒЫ КАРЬЕРЛІК ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС ЖАРЫЛЫСТАРЫ
СЕЙСМИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГ МІНДЕТТЕРІНДЕГІ ЭТАЛОНДЫҚ ОҚИҒАЛАР РЕТІНДЕ**

И.Л. Аристова, И.Н. Соколова

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Алматы қаласы ауданында өндірілген жақсы белгілі параметрлері бар эталондық жарылыстар бойынша деректер негізінде негізгі сейсмикалық аймақтық фазалардың жаңа годографы салынды. Годографты Солтүстік Тянь-Шань аумағында оқиғаларды жергіліктеу үшін пайдаланылатын басқа жылдамдық үлгілерімен салыстыру жүргізілді. Жаңа годографты пайдалану кезінде сейсмикалық оқиғаларды жергіліктеу қателерінің эллипстерінің өлшемдері басқа годографтарды пайдалану кезіндегі мөлшерден төмен екені көрсетілді.

**QUARRY AND CONSTRUCTION EXPLISIONS IN THE VICINITY OF ALMATY CITY
AS GROUND TRUTH EVENTS IN THE TASKS OF SEISMIC MONITORING**

I.L. Aristova, I.N. Sokolova

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

Based on the data on ground truth explosions with well-known parameters conducted in the vicinity of Almaty city, a new time-travel curve of the main seismic regional phases was built. The time-travel was compared with other velocity models, which are used for localization of events on the territory of Northern Tien Shan. It was shown that when using new time-travel curve, the sizes of error ellipse of seismic events localization are smaller than those of during the use of other time-travel curves.