

УДК 550.348.435

**ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 1980–1982 ГОДАХ:  
РУЧНАЯ ОБРАБОТКА И РАСЧЕТ ПО АЛГОРИТМУ НА ОСНОВЕ  
АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ПРЯМЫХ ВОЛН**

*Костинский А. С.*

*Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия  
E-mail: kostinsky@yahoo.com*

Для землетрясений Крыма 1980–1982 гг. года ручная обработка по данным крымских станций сопоставлена с результатами расчета в среде Maple времени в очаге, координат гипоцентра и скорости волн по алгоритму на основе аналитического решения уравнений прямых волн. В случае комплексного решения для глубины гипоцентра прямое использование аналитических выражений дополняется пошаговым поиском на равномерной сетке в окрестности 5-точки, образуемой совокупностью времен вступлений. Отмечено хорошее согласие восстановленных координат эпицентра и времени в очаге и возможность, по крайней мере для данного ряда наблюдений, получить разумную оценку глубины.

**Ключевые слова:** сейсмичность, сейсмическая станция, эпицентр, гипоцентр, время в очаге, уравнения прямых волн, аналитическое решение

**ВВЕДЕНИЕ**

В 80-х годах прошлого века обработка наблюдений на сейсмических станциях Крыма отличалась очень высоким качеством, уровень был задан Иннокентием Ивановичем Поповым. Кадры действительно решают все, обращаясь к благодарной стороне памяти, следует вспомнить Илью Борисовича Дубинского и Викторию Дмитриевну Уханову.

Примерно в это же время автор этих строк, столкнувшись с задачей восстановления координат точечного источника внутри Земли по временам пробега или временам вступлений на нескольких станциях, обнаружил, что программировать здесь, собственно, нечего, аналитическое решение задачи, старше которой, может быть, только евклидова геометрия, даже в предположении постоянной скорости распространения волн, отсутствует в литературе. Восполняющее пробел решение тогда было выписано в двух вариантах [1], исходя из известных времен пробега на четырех станциях, для чего требовалось знание времени в очаге, и, в более последовательной постановке, по заданным временам вступлений на пяти станциях. Соответствующую программу на языке ФОРТРАН пришлось "разбавить" полуэмпирическими соображениями, сколько-нибудь полный анализ поведения параметрического решения, содержащего определители четвертого и пятого порядков, был невозможен в обстановке, когда данные приходилось набивать на перфокартах, а программу печати графиков писать самим. Тем не менее, удалось внести некоторую ясность в вопрос о комплексном, вообще говоря, характере решения, получить даже общее представление о геометрии области вещественности в виде "выеденного яйца" [2].

В современных реалиях вычисление определителя любого порядка достигается с помощью встроенной функции, например, в пакете Maple, но это, несомненное,

продвижение вперед соседствует с осознанием, также несомненного, факта, именно, того, что с распространением повсеместной практики цифровой регистрации связаны очень большие потери в "сейсмологическом канале" информации об окружающем мире. Мы можем свидетельствовать, как словам "ручная обработка" постепенно возвращается их изначальный смысл и ценность, однако исходные данные о крымских и карпатских землетрясениях прошлого века сейчас можно найти только в стремительно ветшающих выпусках Сейсмологического бюллетеня, практически недоступных вне крымских станций. Представляется поэтому не только разумным, но и необходимым создать своего рода электронное хранилище решений задачи расчета координат гипоцентров, преимущественно землетрясений Крыма, где были бы упорядочены и объединены, с одной стороны, сведения о временах вступлений и ручной обработке, и с другой, – результаты расчета, в том числе времени в очаге, по пятеркам времен вступлений прямых волн, исходя из общего варианта аналитического решения [3].

### 1. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нижеследующие таблицы представляют первый опыт в этом направлении, сопроводим их некоторыми пояснениями. Следуя [3], время в очаге  $t_0$  как функция "истинных" (без учета ошибок измерения) времен вступлений  $t_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, 5$ , есть

$$t_0 = \frac{d_t(t_1, t_2, \dots, t_5)}{2d(t_1, t_2, \dots, t_5)}, \quad (1)$$

символы  $d_t$  и  $d$  означают определители 5-го порядка

$$d(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_5) \equiv \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \xi_1 & \xi_2 & \xi_3 & \xi_4 & \xi_5 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \end{vmatrix}, \quad (1_1)$$

$$d_t(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_5) \equiv \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \xi_1^2 & \xi_2^2 & \xi_3^2 & \xi_4^2 & \xi_5^2 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \end{vmatrix}, \quad (1_2)$$

через  $x_m, y_m, z_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, 5$ , обозначены декартовы координаты сейсмических станций. Начало координат помещено в центр Земли, точка  $(0, 0, R)$  совпадает с Северным полюсом, точка  $(R, 0, 0)$  – с точкой пересечения нулевого меридиана и

экватора, здесь  $R$  – радиус Земли. Функции (1<sub>1</sub>) и (2<sub>1</sub>) могут, отвлеченно, рассматриваться на множестве точек  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_5)$  пятимерного арифметического пространства, пространства пятерок вещественных чисел. Добавим еще, что функция (1) сохраняет возможность выбора начала отсчета времени, если времена вступлений смещаются на некоторую постоянную, время в очаге смещается на ту же постоянную.

Глубина гипоцентра и "эффективная" постоянная скорость волн восстанавливаются по временам вступлений, но в случае ненулевых ошибок наблюдений не всегда вещественны,

$$\frac{h}{R} = 1 - \alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1}, \quad (2)$$

$$V^2 = \frac{2R|d|}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}} \left( \alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1} \right), \quad (3)$$

$$\alpha \equiv \frac{1}{4R|d|} \frac{d_t^2 + 4d_1 d}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}}, \quad (4)$$

чисто математическое условие вещественности означает  $\alpha^2 - 1 \geq 0$ . Вообще, в системе обозначений добавление к символу  $d$  нижнего индекса 1,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$  означает замену в нем соответственно каждого из элементов  $1_n$ ,  $x_n$ ,  $y_n$ ,  $z_n$ ,  $t_n$  на  $t_n^2$  ( $n$  – номер столбца), подробности в статье автора [3].

Как поступать, если глубина источника получается комплексной? Пятерка исходных времен вступлений, или 5-точка арифметического пространства, превращается в центр некоторого 5-куба, смещенного относительно начала координат, если мы принимаем, что времена вступлений измерены с ошибкой (в данном случае принята равной 0.2 с). Тогда с неизбежностью следует признать, что все точки 5-куба для нас одинаково ценны (но, может быть, не эквивалентны) в смысле информации о координатах источника. Не будем делать упрощающих предположений о распределении ошибок в пределах 5-куба, просто устроим пошаговый поиск на достаточно мелкой сетке с проверкой вещественности глубины в каждом узле сетки. Может случиться, что, хотя в центре куба значение глубины комплексное, найдется хотя бы небольшое число внутренних точек куба с вещественным значением (заметим, что, очевидно, вещественное значение глубины в центре не гарантирует вещественности во всех точках куба). Возможно, что таким способом получается некоторая оценка глубины (предпоследняя строка таблиц, минимальное и максимальное значения в круглых скобках, то есть интервал, в ситуации комплексного значения в центре). Только слово "комплексное" в строке означает, что в 5-кубе нет точек с вещественными значениями  $h, V$ . Если

вещественное значение в центре существует, приводится просто тройка чисел, означающая последовательность:

минимум в 5-кубе, значение в центре 5-куба, максимум в 5-кубе, аналогично и для постоянной скорости волн. В таблицах можно встретить значения вроде  $h = 0.14$  км, но, если вспомнить, что алгоритм основан на модели источника в виде геометрической точки и представлении об однородном изотропном полупространстве, все становится на свои места. Вообще, не отбрасываются и не "замалчиваются" никакие значения, все полученные в расчетах оценки без исключения перенесены в таблицы.

Обозначения традиционны для прежних выпусков Сейсмологического бюллетеня [4, 5], рассчитанные значения  $t_0$ ,  $\varphi$ ,  $\lambda$  в каждой строке приводятся в последовательности:

- разность минимального значения в 5-кубе и значения в центре 5-куба,
- значение в центре 5-куба,
- разность максимального значения в 5-кубе и значения в центре 5-куба.

Таблица 1.

Времена вступлений, ручная обработка и результаты расчета по алгоритму аналитического решения уравнений прямых волн (секунды времени вступления и секунды времени  $t_0$  добавляются к  $(t_0)_{hm}$ )

	прямые волны $P$	прямые волны $S$
1	2	3
<b>Событие 1(1) 04.01.1980, <math>\varphi=44^\circ.56</math> N, <math>\lambda=34^\circ.5</math> E, <math>h = 20</math> км, <math>t_0 = 14^h 13^m 10.5^s</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 14^h 13^m</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф	21.4 $ePg$	28.5 $iSg$
Ялт	18.0 $ePg$	22.5 $iSg$
Алш	15.4 $iPg$	18.7 $iSg$
Свс	23.0 $iPg$	31.3 $eSg$
Фдс	27.3 $iPg$	38.6 $eSg$
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>	- 1.59 15.0 + 0.92	- 2.02 16.88 + 1.27
<i><math>\varphi</math>, град</i>	- 0.02 44.57 N + 0.02	- 0.01 44.57 N + 0.01
<i><math>\lambda</math>, град</i>	- 0.04 34.43 E + 0.04	- 0.02 34.44 E + 0.03
<i><math>h</math>, км</i>	комплексное, в 5-кубе (0.61, 6.67)	комплексное, в 5-кубе (0.30, 7.93)
<i><math>V</math>, км/с</i>	комплексное, в 5-кубе (6.36, 6.62)	комплексное, в 5-кубе (3.75, 3.93)

ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 1980-1982 ГОДАХ: РУЧНАЯ  
ОБРАБОТКА И РАСЧЕТ ПО АЛГОРИТМУ НА ОСНОВЕ...

Продолжение таблицы 1.

<b>Событие 2(2) 04.01.1980, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.58</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.5</math> E, <math>h = 20</math> км, <math>t_0 = 14^{\text{h}} 19^{\text{m}} 56.7^{\text{s}}</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 14^{\text{h}} 20^{\text{m}}</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф	07.0 <i>ePg</i>	14.3 <i>iSg</i>
Ялт	03.8 <i>ePg</i>	08.2 <i>iSg</i>
Алш	01.3 <i>iPg</i>	04.4 <i>iSg</i>
Свс	09.1 <i>iPg</i>	17.7 <i>eSg</i>
Фдс	12.8 <i>iPg</i>	23.9 <i>eSg</i>
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>	-2.92   -0.41   +1.32	-3.155   0.515   +1.86
$\varphi$ , град	- 0.02 44.59 N + 0.02	- 0.01 44.57 N + 0.01
$\lambda$ , град	- 0.04 34.47 E + 0.04	- 0.02 34.49 E + 0.02
$h$ , км	комплексное, в 5-кубе (0.14, 22.81)	0.07 3.34 18.64
$V$ , км/с	комплексное, в 5-кубе (5.47, 6.96)	3.32 3.73 3.88
<b>Событие 3(6) 04.01.1980, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.55</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.53</math> E, <math>h = 20</math> км, <math>t_0 = 22^{\text{h}} 48^{\text{m}} 31.0^{\text{s}}</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 22^{\text{h}} 48^{\text{m}}</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф		48.4 <i>eSg</i>
Ялт		42.2 <i>iSg</i>
Алш		38.6 <i>iSg</i>
Свс		51.7 <i>eSg</i>
Фдс		57.0 <i>eSg</i>
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>		- 3.66   34.19   + 2.06
$\varphi$ , град		- 0.02 44.56 N + 0.01
$\lambda$ , град		- 0.02 34.51 E + 0.02
$h$ , км		0.27 3.13 21.13
$V$ , км/с		3.31 3.78 3.94
<b>Событие 4(26) 18.03.1980, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.61</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.96</math> E, <math>h = 25</math> км, <math>t_0 = 17^{\text{h}} 02^{\text{m}} 21.1^{\text{s}}</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 17^{\text{h}} 02^{\text{m}}</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф	34.3 <i>ePg</i>	44.3 <i>iSg</i>
Ялт	33.4 <i>ePg</i>	42.2 <i>iSg</i>
Алш	29.8 <i>ePg</i>	36.3 <i>iSg</i>
Свс	38.1 <i>ePg</i>	50.7 <i>eSg</i>
Фдс	31.8 <i>iPg</i>	39.5 <i>iSg</i>
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		

секунды времени $t_0$	-3.844    26.32    + 1.80	-3.83    29.08    + 2.40
$\varphi$ , град	- 0.04 44.66 N + 0.04	- 0.02 44.64 N + 0.02
$\lambda$ , град	- 0.03 34.93 E + 0.04	- 0.02 34.95 E + 0.02
$h$ , км	комплексное, в 5-кубе (0.48, 26.41)	комплексное, в 5-кубе (0.64, 10.82)
$V$ , км/с	комплексное, в 5-кубе (6.45, 7.21)	комплексное, в 5-кубе (3.94, 4.01)
<b>Событие 5(27) 18.03.1980, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.63</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.95</math> E, <math>h = 25</math> км, <math>t_0 = 19^{\text{h}} 36^{\text{m}} 07.5^{\text{s}}</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 19^{\text{h}} 36^{\text{m}}</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф	19.6 <i>iPg</i>	29.2 <i>iSg</i>
Ялт	18.7 <i>ePg</i>	27.7 <i>iSg</i>
Алш	15.1 <i>iPg</i>	21.5 <i>iSg</i>
Свс	23.4 <i>iPg</i>	36.7 <i>eSg</i>
Фдс	16.2 <i>Pgi</i>	24.0 <i>iSg</i>
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
секунды времени $t_0$	- 3.96    11.55    + 1.83	- 5.43    11.33    + 3.23
$\varphi$ , град	- 0.04 44.66 N + 0.04	- 0.02 44.67 N + 0.02
$\lambda$ , град	- 0.04 34.97 E + 0.04	- 0.02 34.94 E + 0.02
$h$ , км	комплексное, в 5-кубе (1.51, 23.83)	комплексное, в 5-кубе (0.45, 32.98)
$V$ , км/с	комплексное, в 5-кубе (6.58, 7.15)	комплексное, в 5-кубе (3.42, 3.93)
<b>Событие 6(29) 18.03.1980, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.7</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.9</math> E, <math>h = 20</math> км, <math>t_0 = 20^{\text{h}}</math> <math>31^{\text{m}} 29^{\text{s}}</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 20^{\text{h}} 31^{\text{m}}</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф	40.7 <i>ePg</i>	50.6 <i>eSg</i>
Ялт	40.5 <i>ePg</i>	49.5 <i>eSg</i>
Алш	36.4 <i>ePg</i>	42.6 <i>iSg</i>
Свс	44.8 <i>ePg</i>	58.3 <i>eSg</i>
Фдс	38.2 <i>ePg</i>	46.1 <i>iSg</i>
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
секунды времени $t_0$	- 2.44    34.09    + 1.32	- 3.41    35.22    + 2.27
$\varphi$ , град	- 0.04 44.72 N + 0.03	- 0.02 44.69 N + 0.02
$\lambda$ , град	- 0.03 34.91 E + 0.04	- 0.02 34.92 E + 0.02
$h$ , км	комплексное	комплексное, в 5-кубе (2.34, 6.74)
$V$ , км/с	комплексное	комплексное, в 5-кубе (3.70, 3.72)
<b>Событие 7(31) 18.03.1980, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.7</math> N, <math>\lambda=35^{\circ}.0</math> E, <math>h = 20</math> км, <math>t_0 = 22^{\text{h}} 58^{\text{m}} 03.0^{\text{s}}</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 22^{\text{h}} 58^{\text{m}}</math></b>		

ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 1980-1982 ГОДАХ: РУЧНАЯ  
ОБРАБОТКА И РАСЧЕТ ПО АЛГОРИТМУ НА ОСНОВЕ...

Продолжение таблицы 1.

	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф	16.5 <i>ePg</i>	26.0 <i>eSg</i>
Ялт	15.8 <i>ePg</i>	24.9 <i>eSg</i>
Алш	12.2 <i>iPg</i>	18.7 <i>iSg</i>
Свс	20.7 <i>ePg</i>	33.7 <i>eSg</i>
Фдс	13.1 <i>ePg</i>	20.7 <i>eSg</i>
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>	- 5.85    7.30    + 2.41	- 5.87    8.13    + 3.41
<i>φ, град</i>	- 0.04 44.68 N + 0.03	- 0.02 44.69 N + 0.02
<i>λ, град</i>	- 0.04 34.97 E + 0.04	- 0.02 34.95 E + 0.02
<i>h, км</i>	комплексное, в 5-кубе (1.54, 44.14)	комплексное, в 5-кубе (0.28, 36.84)
<i>V, км/с</i>	комплексное, в 5-кубе (5.75, 7.19)	комплексное, в 5-кубе (3.40, 4.01)
<b>Событие 8(36)* 17.05.1980, Черное море, φ=44<sup>0</sup>.22 N, λ=34<sup>0</sup>.43 E, h = 5 км, <math>t_0 = 22^h 07^m 54.0^s</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 22^h 08^m</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф	6.2 <i>ePg</i>	17.8 <i>eSg</i>
Ялт	- 0.5 <i>iPg</i>	04.1 <i>iSg</i>
Алш	1.5 <i>iPg</i>	08.0 <i>iSg</i>
Свс	4.4 <i>iPg</i>	13.3 <i>iSg</i>
Фдс	12.8 <i>ePg</i>	27.7 <i>eSg</i>
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>	<b>- 10.93</b> -5.17    + 2.73	<b>- 12.34</b> -10.10    + 5.42
<i>φ, град</i>	- 0.09 44.36 N + 0.07	- 0.05 44.23 N + 0.04
<i>λ, град</i>	- 0.05 34.34 E + 0.08	- 0.03 34.43 E + 0.04
<i>h, км</i>	0.14 20.96 <b>63.68</b>	0.79 27.18 <b>56.27</b>
<i>V, км/с</i>	4.45 6.28 7.15	2.59 3.16 3.53
<b>Событие 9(44) 26.07.1980, Черное море, φ=44<sup>0</sup>.39 N, λ=34<sup>0</sup>.35 E, h = 22 км, <math>t_0 = 00^h 19^m 27.5^s</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 00^h 19^m</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф	40.1 <i>iPg</i>	48.6 <i>iSg</i>
Ялт	33.0 <i>iPg</i>	36.8 <i>iSg</i>
Алш	35.2 <i>iPg</i>	40.5 <i>iSg</i>
Свс	38.2 <i>iPg</i>	45.6 <i>eSg</i>
Фдс	47.5 <i>ePg</i>	61.2 <i>iSg</i>

<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>						
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>	- 8.30	28.42	+ 2.56	- 4.96	29.95	+ 2.67
<i><math>\varphi</math>, град</i>	- 0.08	44.37 N	+ 0.06	- 0.04	44.39 N	+ 0.04
<i><math>\lambda</math>, град</i>	- 0.05	34.32 E	+ 0.07	- 0.03	34.31 E	+ 0.03
<i><math>h</math>, км</i>	0.93	20.22	52.78	8.11	18.20	32.07
<i><math>V</math>, км/с</i>	4.50	5.90	6.68	3.18	3.58	3.87
<b>Событие 10(49) 28.07.1980, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.4</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.3</math> E, <math>h = 24</math> км, <math>t_0 = 05^h 16^m 22.7^s</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 05^h 16^m</math></b>						
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>			<i>секунды времени вступления, фаза</i>		
Смф	35.5 <i>iPg</i>			43.8 <i>iSg</i>		
Ялт	28.1 <i>iPg</i>			31.6 <i>iSg</i>		
Алш	30.2 <i>iPg</i>			35.3 <i>iSg</i>		
Свс	33.6 <i>iPg</i>			40.8 <i>eSg</i>		
Фдс	43.5 <i>ePg</i>			57.3 <i>eSg</i>		
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>						
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>	- 12.43	22.26	+ 3.23	- 5.40	24.05	+ 2.89
<i><math>\varphi</math>, град</i>	- 0.08	44.38 N	+ 0.06	- 0.04	44.40 N	+ 0.03
<i><math>\lambda</math>, град</i>	- 0.05	34.33 E	+ 0.07	- 0.03	34.31 E	+ 0.03
<i><math>h</math>, км</i>	7.34	25.01	64.88	10.23	19.84	33.65
<i><math>V</math>, км/с</i>	3.80	5.30	6.12	2.97	3.35	3.63
<b>Событие 11(13) 01.04.1981, Крым, <math>\varphi=44^{\circ}.76</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.31</math> E, <math>h = 20</math> км, <math>t_0 = 16^h 33^m 33.4^s</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 16^h 33^m</math></b>						
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>			<i>секунды времени вступления, фаза</i>		
Смф				43.6 <i>iSg</i>		
Ялт				46.1 <i>iSg</i>		
Алш				40.9 <i>iSg</i>		
Свс				52.1 <i>eSg</i>		
Фдс				59.4 <i>eSg</i>		
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>						
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>				- 8.81	32.92	+ 3.60
<i><math>\varphi</math>, град</i>				- 0.01	44.78 N	+ 0.01
<i><math>\lambda</math>, град</i>				- 0.02	34.36 E	+ 0.02
<i><math>h</math>, км</i>				10.77	24.15	44.10
<i><math>V</math>, км/с</i>				2.69	3.36	3.85



ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 1980-1982 ГОДАХ: РУЧНАЯ  
ОБРАБОТКА И РАСЧЕТ ПО АЛГОРИТМУ НА ОСНОВЕ...

Продолжение таблицы 1.

<b>Событие 12(44) 13.09.1981, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.56</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.52</math> E, <math>h = 11-20</math> <math>t_0 = 07^h 46^m 13.3^s</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 07^h 46^m</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф		31.8 eSg
Ялт		24.1 eSg
Алш		19.2 eSg
Свс		34.8 eSg
Фдс		39.4 eSg
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>		- 0.64    17.44    + 1.17
<i><math>\varphi</math>, град</i>		- 0.02 44.52 N + 0.01
<i><math>\lambda</math>, град</i>		- 0.02 34.55 E + 0.02
<i>h, км</i>		комплексное
<i>V, км/с</i>		комплексное
<b>Событие 13(81)** 09.12.1981, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.54</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.60</math> E, <math>h = 15</math> км, <math>t_0 = 03^h 24^m 03.7^s</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 03^h 24^m</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф		21.9 eSg
Ялт		15.9 eSg
Алш		12.2 iSg
Свс		26.6 eSg
Фдс		31.1 eSg
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
<i>секунды времени <math>t_0</math></i>		<b>-10.40</b> 0.64    + 4.65
<i><math>\varphi</math>, град</i>		- 0.02 44.57 N + 0.01
<i><math>\lambda</math>, град</i>		- 0.02 34.55 E + 0.02
<i>h, км</i>		15.32    28.62 <b>48.43</b>
<i>V, км/с</i>		2.34    2.88    3.30
<b>Событие 14(1) 07.01.1982, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.55</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.55</math> E, <math>h = 15</math> км, <math>t_0 = 04^h 55^m 34.7^s</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 04^h 55^m</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф		52.1 eSg
Ялт		46.7 iSg
Алш		41.8 eSg
Свс		56.3 eSg

Продолжение таблицы 1.		
Фдс		62.6 <sup>s</sup> eSg
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
секунды времени $t_0$		- 2.21 38.55 + 1.48
$\varphi$ , град		- 0.01 44.60 N + 0.01
$\lambda$ , град		- 0.02 34.48 E + 0.02
$h$ , км		0.08 3.34 14.24
$V$ , км/с		3.28 3.58 3.71
<b>Событие 15(4) 15.01.1982, Черное море, <math>\varphi=44^{\circ}.52</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.47</math> E, <math>h = 15</math> км, <math>t_0 = 13^{\text{h}} 01^{\text{m}} 58.7^{\text{s}}</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 13^{\text{h}} 02^{\text{m}}</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф		14.7 eSg
Ялт		07.0 iSg
Алш		04.9 iSg
Свс		16.7 iSg
Фдс		28.6 eSg
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
секунды времени $t_0$		- 4.78 2.81 + 1.93
$\varphi$ , град		- 0.02 44.57 N + 0.01
$\lambda$ , град		- 0.04 34.34 E + 0.05
$h$ , км		комплексное, в 5-кубе (0.11, 17.58)
$V$ , км/с		комплексное, в 5-кубе (3.14, 3.56)
<b>Событие 16(7) 15.02.1982, Крым, <math>\varphi=44^{\circ}.76</math> N, <math>\lambda=34^{\circ}.25</math> E, <math>h = 10</math> км, <math>t_0 = 14^{\text{h}} 00^{\text{m}} 25.9^{\text{s}}</math> по годографу, <math>(t_0)_{hm} = 14^{\text{h}} 00^{\text{m}}</math></b>		
	<i>секунды времени вступления, фаза</i>	<i>секунды времени вступления, фаза</i>
Смф		35.1 iSg
Ялт		36.6 iSg
Алш		31.4 iSg
Свс		42.9 eSg
Фдс		53.0 eSg
<i>расчет по алгоритму аналитического решения</i>		
секунды времени $t_0$		- 4.87 25.90 + 2.46
$\varphi$ , град		- 0.01 44.75 N + 0.01
$\lambda$ , град		- 0.02 34.31 E + 0.03
$h$ , км		0.40 15.37 29.33

ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА В 1980-1982 ГОДАХ: РУЧНАЯ  
ОБРАБОТКА И РАСЧЕТ ПО АЛГОРИТМУ НА ОСНОВЕ...

Продолжение таблицы 1.

$V, \text{ км/с}$		2.91	3.37	3.71
-------------------	--	------	------	------

\* – 8(36) дает пример сейсмического события, в максимальной степени демонстрирующего неустойчивость функции  $t_0$ : при изменении времени вступления на станции Симферополь на  $22^{\text{h}} 08^{\text{m}} 07.2^{\text{s}}$  ошибки в определении времени в очаге достигают 13700 с.

\*\* – 13(81) дает еще один пример сейсмического события, демонстрирующего неустойчивость функции  $t_0$ : при изменении времени вступления на станции Ялта на  $03^{\text{h}} 24^{\text{m}} 14.9^{\text{s}}$  ошибки в определении времени в очаге достигают 52000 с.

### ВЫВОДЫ

По итогам 1980–1982 гг. наблюдается небольшое число, именно 16, землетрясений региона Черного моря, для которых можно сформировать пятерки времен вступлений прямых волн на крымских станциях. Уже беглый взгляд на результаты расчетов показывает очень хорошую согласованность определения эпицентра, во-первых, с результатами ручной обработки способами засечек, Вадати, и палеток изохрон, каковые способы ныне, казалось бы, должны казаться архаическими. Во-вторых, координаты эпицентра, рассчитанные для сейсмического события отдельно по  $P$ - и отдельно по  $S$ -волнам, в тех случаях, когда такое возможно, явно не обнаруживают хаотического разброса. Все это иллюстрирует известный опыт практических сейсмологов, мысль о том, что "эпицентр всегда определяется хорошо", только здесь "хорошо" имеет строгую количественную оценку, не зависящую от личности обработчика. Что касается глубины гипоцентра, то, действительно, путем пошагового поиска в 5-кубе ошибок почти всегда получается некоторая оценка глубины (2 ситуации с полностью комплексным решением). Глубина неустойчива относительно ошибок, это, в том числе, и опыт докомпьютерной сейсмологии, но алгоритм на основе аналитического решения, пусть и в слишком упрощающем предположении постоянной скорости волн, уникален в том смысле, что позволяет обратить внимание еще на один аспект проблемы. Именно, предположим, что арифметическое 5-пространство, в точках которого определены, например, функции (1<sub>1</sub>) и (1<sub>2</sub>), наделено евклидовой метрикой и вложено в евклидово 6-пространство, образуемое как прямое произведение на вещественную ось значений переменной  $z$  (не должно возникнуть путаницы с обозначением соответствующей координаты гипоцентра). Функция (1) существует при любых значениях аргументов, уравнение

$$z = \frac{d_t(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_5)}{2d(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_5)}, \quad (5)$$

определяет 5-гиперповерхность во вмещающем пространстве, со своей внутренней геометрией, инвариантной относительно изгиба. С помощью инструментария римановой геометрии перед нами разворачивается картина свойств кривизны, свойства, описываемые соответствующим тензором Римана, его инвариантами, меняются в зависимости от текущей точки  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_5)$ . Для сейсмологических

приложений это дает "внутренний", "изнутри" совокупности 6-точек  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_5, z)$ , ответ на вопрос, насколько большие изменения произойдут с функцией (1), если "слегка" изменить одно или сразу несколько времен вступления. Сложность в том, что мы имеем дело с многомерным пространством и неверно было бы иметь перед глазами образ двумерной поверхности-пленки, гладкость, или, напротив, "вздыбленность" которой определяется двумя главными кривизнами и их произведением, гауссовой кривизной. Тензор Римана 5-пространства имеет 625 компонент, из них 50 существенных (независимых), в общем случае кривизна 5-пространства в каждой точке определяется 40 величинами [6]. Именно в попадании 5-точки времен вступления в область резкого возрастания одного из инвариантов кривизны, может крыться причина аномально больших отклонений времени в очаге и глубины (таблица 8, 13, отклонения выделены полужирным шрифтом).

#### Список литературы

1. Костинский А. С., Поречнова Е. И., Пустовитенко Б. Г. Определение координат гипоцентров на основе аналитического решения прямых волн // Применение ЭВМ в сейсмологической практике: методические работы ЕСЧН. М.: Наука, 1985. С. 5–23.
2. Костинский А. С. Исследование аналитического решения прямых волн в связи с задачей расчета координат гипоцентра. Область вещественности решения // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕСЧН СССР за 1987 г. Киев: Наукова думка, 1992. С. 147–159.
3. Kostinsky A. S. On the effectiveness of the system of five seismic stations // Modern Science. 2018. no. 07, pp. 12–22.
4. Свидлова В. А., Горячун А. В. (составители). Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1980 г. // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕСЧН СССР (Крым-Карпаты, 1980 г.). Киев: Наукова думка, 1984. С. 5–40.
5. Свидлова В. А. (составитель). Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1981, 1982 гг. // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕСЧН СССР (Крым-Карпаты, 1981–1982 гг.). Киев: Наукова думка, 1985. С. 7–121.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1973. С. 335–337.

#### CRIMEA EARTHQUAKES PARAMETERS IN 1980-1982:

#### MANUAL PROCESSING AND CALCULATION BY ALGORITHM

#### BASED ON ANALYTICAL SOLUTION OF EQUATIONS OF DIRECT WAVES

*Kostinsky A. S.*

*Institute of seismology and geodynamics FSAEI HE «Of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University», Simferopol, Republic of Crimea, Russia  
E-mail: kostinsky@yahoo.com*

For Crimea earthquakes in 1980-1982, manual processing according to the data of Crimean stations is compared with the results of calculation of focal time, hypocenter coordinates and wave velocity in the Maple environment, by algorithm based on analytical solution of equations of direct waves. The solution is not always real, in situation of complex depth of hypocenter the direct use of analytical expressions is complemented by

a step-by-step search on a uniform grid in the neighborhood of the 5-point formed by the set of arrival times. The quintuple of given times of arrivals, or the 5-point of arithmetical space, turns into the center of some 5-cube, shifted relative to the origin, if we assume that the times of arrivals are measured with an error (in this case, assumed to be 0.2 s). Then, inevitably, it should be recognized that all points of the 5-cube are equally valuable to us (but maybe not equivalent) in the sense of information about the coordinates of the seismic source. No simplifying assumptions are made about the distribution of errors within the 5-cube, just a step-by-step search is performed on a sufficiently detailed grid with test of reality of depth at each node of the grid, modern speed parameters fully allow this. It may happen that, although the depth value is complex in the center of the cube, there is at least a small number of internal points of the cube with a real value (obviously, the real value of the depth in the center does not guarantee reality at all points of the cube). For Crimean earthquakes, in most cases in this way some estimate of the depth and velocity of the waves is obtained (2 situations with fully complex solution). Good agreement is noted in the calculations of the coordinates of the epicenter and time of arrival, on the one hand, for P- and S-waves, and, on the other hand, for different quintuples of stations (in the case of adding of observational data of Sochi station).

The calculations show, among other things, the instability of depth relative to errors, in accordance with the experience of pre-computer seismology, but the algorithm based on the analytical solution, albeit in an oversimplifying assumption of a constant wave velocity, is unique in the sense that it allows one to pay attention to one more aspect of the problem. Namely, suppose that some instance of arithmetic 5-space is endowed with a Euclidean metric and is embedded in Euclidean 6-space formed as a direct product to the real axis of the values of some variable  $z$  (there should be no confusion with the designation of the corresponding hypocenter coordinate). Analytical dependencies on arrival times of focal time, hypocenter coordinates, etc. define 5-hypersurfaces in the enclosing space, with its internal geometry invariant with respect to bending. With the aid of well-known toolkit of Riemannian geometry a picture of the properties of curvature unfolds before us, the properties described by the corresponding Riemann tensor, its invariants, vary depending on the current point. For seismological applications, this gives an "internal", hidden in the dependencies, answer to the question of how large changes will occur with the function, for example, focal time, if one or several arrival times are "slightly" changed. The difficulty is that we are dealing with multidimensional space and it would be wrong to have before eyes an image of two-dimensional surface-film, the smoothness, or, conversely, "hilliness" of which is determined by two principal curvatures and their product, the Gaussian curvature. The set of singular points, lines, and subspaces generated by the analytical calculation of the parameters of seismic events needs to be studied by purely geometric methods; if the 5-point of the arrival times falls into the region of sharp increase in one of the curvature invariants, in that the reason for the abnormally large deviations of focal time and depth may lie (tables 8,13, deviations are shown in bold).

**Keywords:** seismicity, seismic station, epicenter, hypocenter, focal time, equations of direct waves, analytical solution.

**References**

1. Kostinsky A. S., Porechnova E. I., Pustovitenko B. G. Opredelenie koordinat gipocentrov na osnove analiticheskogo resheniya pryamyh voln (Determination of the coordinates of hypocenters based on the analytical solution of direct waves). *Primenenie EVM v seismologicheskoy praktike: metodicheskie raboty ESSN* (The use of computers in seismological practice: methodological work of the ESSN). M., Nauka, 1985, pp. 5–23 (in Russian).
2. Kostinsky A. S. Issledovanie analiticheskogo resheniya pryamyh voln v svyazi s zadachej rascheta koordinat gipocentra. Oblast' veshchestvennosti resheniya (The study of the analytical solution of direct waves in connection with the task of calculating the coordinates of the hypocenter. The realm of solutions). *Seismologicheskij byulleten' Zapadnoj territorial'noj zony ESSN SSSR za 1987 g.*, Kiev, Naukova dumka, 1992, pp. 147–159 (in Russian).
3. Kostinsky A. S. On the effectiveness of the system of five seismic stations. *Modern Science*, 2018, no. 07, pp. 12–22.
4. Svidlova V. A., Goryachun A. V. (sostaviteli). Katalog i podrobnye dannye o zemletryasenyah Krymsko-Chernomorskogo regiona za 1980 g. (Catalog and detailed data on earthquakes of the Crimean-Black Sea region for 1980). *Seismologicheskij byulleten' Zapadnoj territorial'noj zony ESSN SSSR (Krym-Karpaty, 1980 g.)*, Kiev, Naukova dumka, 1984, pp. 5–40 (in Russian).
5. Svidlova V. A. (sostavitel'). Katalog i podrobnye dannye o zemletryasenyah Krymsko-Chernomorskogo regiona za 1981, 1982 gg. (Catalog and detailed data on earthquakes of the Crimean-Black Sea region for 1981, 1982). *Seismologicheskij byulleten' Zapadnoj territorial'noj zony ESSN SSSR (Krym-Karpaty, 1981–1982 gg.)*, Kiev, Naukova dumka, 1985, pp. 7–121 (in Russian).
6. Landau L. D., Lifshic E. M. *Teoriya polya*. (Field theory), M., Nauka, 1973, pp. 335–337 (in Russ.).