

ниых  $1/4$ — $1/3$  длины ряда от края сети и затяжным минимумом между ними. Но при этом разность максимальной и минимальной ошибок составляет около  $1\ldots 3\%$  с тенденцией уменьшения при увеличении числа рядов в сети.

В табл. 2 приведены средние квадратические ошибки нескольких промежуточных и связующих сторон, находящихся на одинар-

стороне, находящейся на краю сети.

$$m = \sqrt{2} \cdot \rho \mu / a = 1,4 \rho \mu / a \quad (5)$$

и для сторон, расположенных в ее середине,

$$m = 1,1 \rho \mu / a. \quad (6)$$

Сравнивая результаты, получаемые по (5) и (6), с данными табл. 2, видим, что погрешности формул для сетей из пяти и более рядов при  $N \geq 5$ , не превышают  $10\%$ .

По данным табл. 1 и 2 можно определить точность дирекционных углов аналогичных сетей, стороны которых измерены с любой относительной погрешностью. Для этого табличные значения ошибок нужно умножить на коэффициент  $\rho \mu / a$ .

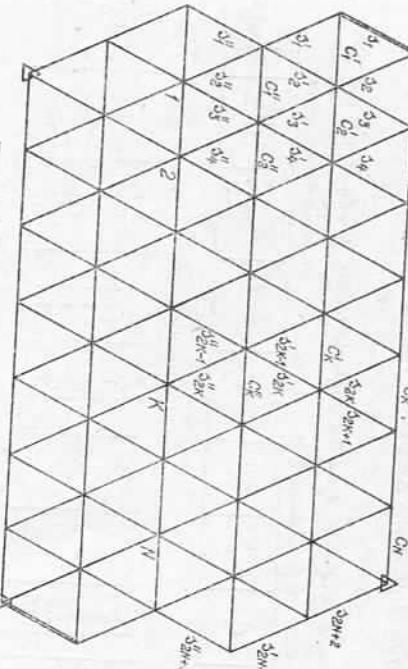


Рис. 2. Схема пятикратного ряда.

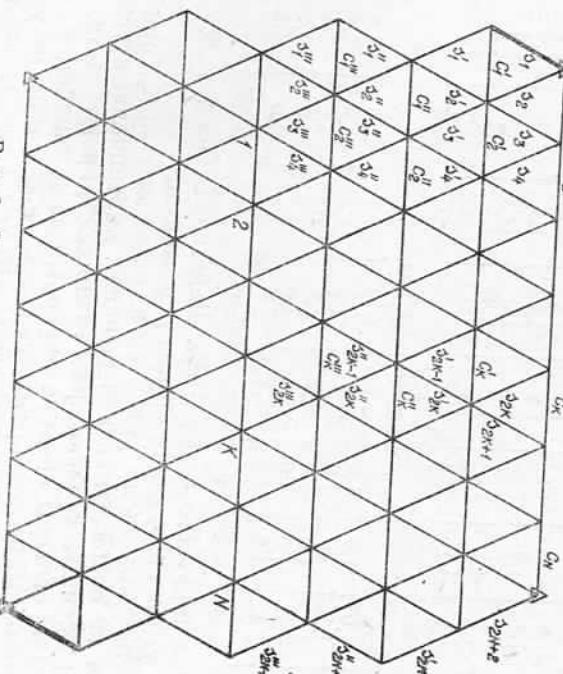


Рис. 3. Схема семикратного ряда.

ковом расстоянии от края сетей из трех, пяти и семи рядов (рис. 2 и 3) треугольников разного размера ( $N=5, 10, 15, 20$  и  $25$ ). Из

табл. 2 видно, что только в трехкратном ряду заметно влияние размера сети на точность дирекционных углов. А переход от пяти до семи рядов практически не влияет на изменение точности дирекционных углов. Кроме этого из табл. 2 видно также, что точ-

ность связующих и промежуточных сторон, находящихся на краю сети ( $S_1, S_{2N+2}, S_{2N+3}$  и  $S_{2N+4}$ ) практически одинакова.

Предлагаем формулы для оценки точности дирекционных углов сторон, находящихся на краю сети,

$$m = \sqrt{2} \cdot \rho \mu / a = 1,4 \rho \mu / a$$

и для сторон, расположенных в ее середине,

$$m = 1,1 \rho \mu / a.$$

Сравнивая результаты, получаемые по (5) и (6), с данными табл. 2, видим, что погрешности формул для сетей из пяти и более рядов при  $N \geq 5$ , не превышают  $10\%$ .

По данным табл. 1 и 2 можно определить точность дирекционных углов аналогичных сетей, стороны которых измерены с любой относительной погрешностью. Для этого табличные значения ошибок нужно умножить на коэффициент  $\rho \mu / a$ .

**Список литературы:** 1. Аркашова У. П. Оценка точности рядов прямоугольников с измеренными сторонами и диагоналями. — Тр. Омск. с.-х. ин-та, 1970, № 2, с. 136—142. 2. Бронштейн Г. С., Сифонов А. С. Аппроксимация формул для оценки точности ряда трилатерации. — Геодезия и картография, 1974, № 1, с. 12—15. 3. Бронштейн Г. С. К вопросу оценки точности рядов трилатерации. — Инженерно-строительные изыскания, 1974, вып. 1 (34), с. 3—10. 4. Вилленский В. А. О закономерностях накопления погрешностей в сложных сетях трилатерации. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1979, вып. 30, с. 41—48. 5. Заборовский А. В. Оценка точности линейных триангуляций. — Науч. зап. Львов. политехн. ин-та. Сер. Геодезия и картография, 1974, № 1, с. 12—15. 6. Костецкая Я. М. Вопросы оценки точности сплошных сетей трилатерации. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1967, вып. 6, с. 25—41. 7. Костецкая Я. М. О точности дирекционных углов в сплошных сетях трилатерации. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1974, вып. 20, с. 45—50. 8. Кутузов И. А. Накопление погрешностей в рядах с измеренными сторонами. — Геодезия и аэрофотосъемка, 1957, вып. 2, с. 87—100. 9. Проворов К. Л. Точность элементов сети линейной триангуляции. — Тр. НИИГЛНК, т. 11, 1958, с. 3—21.

Статья поступила в редакцию 20. 05. 85

УДК 551.242

А. Г. ЛИСОВЕЦ, А. А. НИКОНОВ, В. А. СКРЫЛЬ

## ОПЫТ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПОБЕРЕЖЬИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ДЛЯ РАЗНЫХ ЭПОХ \*

При составлении карт современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) исследователи сталкиваются с рядом трудностей, отражающих сложность процесса ее вертикальных движений. Материалы статьи положены в основу доклада «Опыт построения карт современных вертикальных движений земной коры побережий Каспийского моря методом коллокации для разных эпох», сделанного авторами на 10-м Международном совещании по изучению современных движений земной коры на геодинамических полигонах СССР (Сочи, 26—30 ноября 1984 г.).

ний и в еще большей степени движений земной поверхности, на которой проводятся измерения. Ряд многократных высокоточных измерений обнаружил неравномерность и даже знакопеременность вертикальных перемещений поверхности как в областях горообразования, так и в равнинно-платформенных условиях [5, 6, 9]. Хорошо известно, что получаемые при расчетах значения скорости движения поверхности сильно зависят от времени усреднения [1, 2]. Считается, что влияние ошибок измерений и временной неравномерности вертикальных движений становится не-

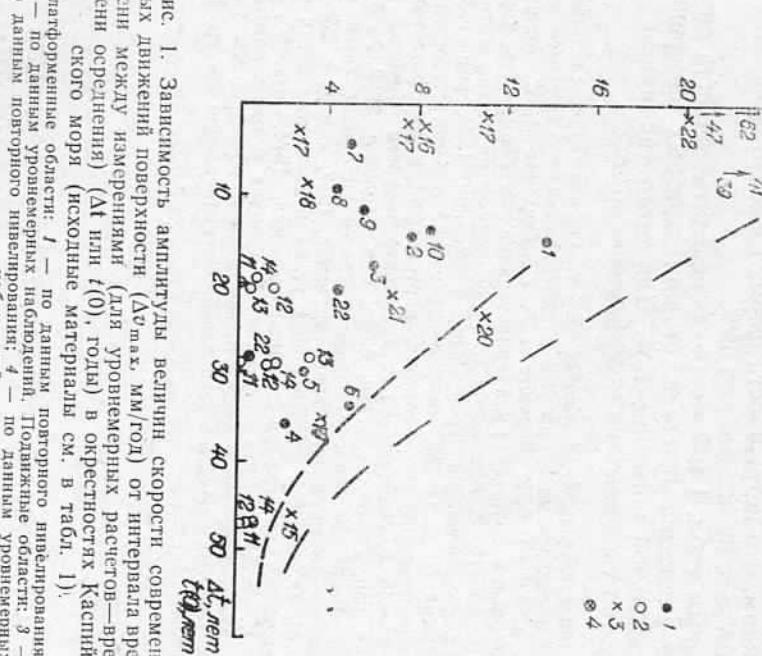


Рис. 1. Зависимость амплитуды величин скорости современных движений поверхности ( $\Delta v_{\text{max}}$ , мм/год) от интервала времени между измерениями (для уровнемерных расчетов—время осреднения) ( $\Delta t$  или  $t(0)$ , годы) в окрестностях Каспийского моря (исходные материалы см. в табл. 1).  
Платформенные области: 1 — по данным повторного нивелирования; 2 — по данным уровнянчения наблюдений. Подвижные области: 3 — по данным повторного нивелирования; 4 — по данным уровнемерных наблюдений.

значительным при использовании интервалов осреднения в 15—25 и более лет [4]. Соответственно отбирались материалы повторного нивелирования при составлении карты СВДЗК Восточной Европы [3], включающей и Прикаспийскую область.  
К сожалению, некоторые карты недавнего времени, в том числе для территории Средней Азии, составлены с нарушением принципа использования близких по продолжительности и времени эпох измерений. На рис. 1 показана зависимость амплитуд склонности вертикальных движений поверхности по трассам повторного нивелирования от временного интервала между измерениями приблизительно к области Прикаспия. Из этих материалов следует, что только оперируя интервалами времени более 30 лет, можно

расчитывать на получение значений скоростей, свободных от случайных временных возмущений. Проблема отражения (или преодоления) пространственно-временной неравномерности движений земной поверхности (и в ряде случаев — земной горообразования, так и в равнинно-платформенных условиях [5, 6, 9]). Хорошо известно, что получаемые при расчетах значения скорости движения поверхности сильно зависят от времени усреднения [1, 2]. Считается, что влияние ошибок измерений и временной неравномерности вертикальных движений становится не-

громадную площадь, она включает такие структурно-геодинамически разнородные районы, как Алтайский подвижный пояс (горы Кавказа и Колет-Дага), с одной стороны, и платформенные области (Скифская и Туранская платформы), — с другой. На этой территории возможно совместное использование результатов и уровнемерных наблюдений, и повторного нивелирования за достаточно продолжительный период (свыше 50 лет). Важно, что большинство линий повторного нивелирования имеет длину порядка сотен километров, что уменьшает накопление значительных систематических ошибок, присущих измерениям на линиях протяженностью во многие тысячи километров.

Авторы поставили задачу, используя отмеченные благоприятные возможности на территории вокруг Каспийского моря, выявить пространственно-временные неравномерности движений с помощью метода коллокации.

Примененный в [8] для построения карт СВДЗК метод коллокации имеет ряд особенностей и преимуществ по сравнению с традиционно используемыми способами. Главное его достоинство состоит в использовании приемов математической статистики для построения карт. Это обеспечивает независимость от геологогеоморфологических данных и представлений, в той или иной мере обычно довлевших ранее над составителями карт. Опыт составления карты СВДЗК острова Сахалин методом коллокации показал, что новый метод при тех же исходных данных может обеспечить значительно большую точность (до 40%) по сравнению с линейной интер- и экстраполяцией скоростей.

Возможность получения карты СВДЗК независимо от геологогеоморфологических характеристик территории особенно важна в областях с дифференцированными в пространстве и времени СВДЗК. Именно к таким областям относится область побережий Каспийского моря. Помимо отмеченных выше главных геоструктурных различий (окхват Альпийского подвижного пояса на юге и платформ на севере), необходимо учитывать подверженность территории редким, но исключительно сильным землетрясениям (восточно-кавказское 1668 г. с.  $M=8$ , красноводское 1895 г. с.  $M=8.2$ , ашхабадское 1948 г. с.  $M=7.3$ ). В этих условиях естественно было попытаться выявить не только пространственные различия в вековых движениях соседних крупных геоструктур, но также и ограниченные во времени и пространстве аномальные откло-

нения в распределении и скорости движений в периоды сильнейших землетрясений.

Так как наибольшее количество измерений приходится на текущее столетие, мы поставили задачу обнаружить и охарактеризовать с помощью нового типа карт пространственно-временные изменения движений земной коры в связи с ашхабадским землетрясением 1948 г. Основанием для постановки такой задачи стало установление соответствующих по времени аномалий в движениях земной коры восточного побережья Каспийского моря, выявленных при специальной обработке уровнемерных наблюдений [10].

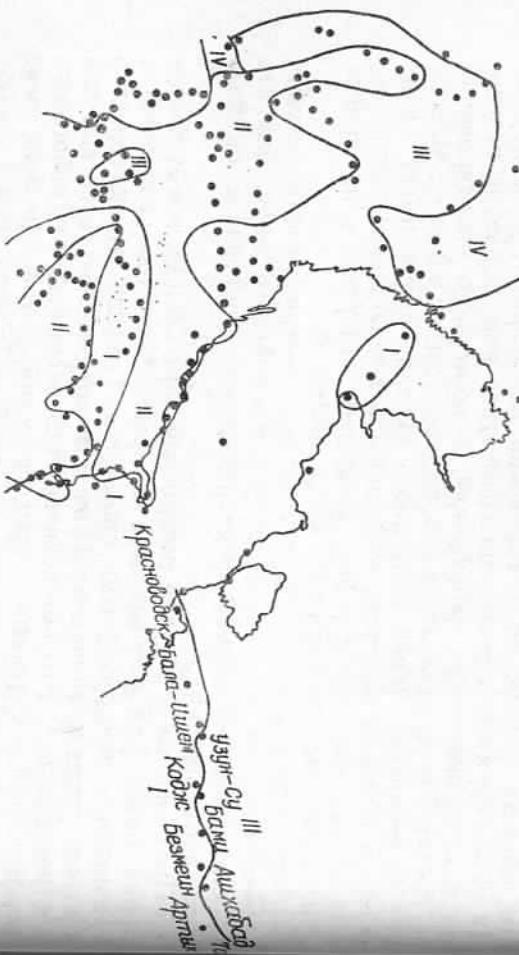


Рис. 2. Схема регионов, стационарных по дистанции.

Охваченная исследованием область показана на рис. 2. Для этой территории использованы доступные геодезические и уровнемерные материалы по СВДЗК. Мы ограничились использованием уровнемерных данных за 1915 и 1925 гг. (соответственно 6 и 11 постов). Принимая вывод о представительности карты СВДЗК побережий Каспия только для относительно короткого (порядка 18...20 лет) и единого для большинства уровнемерных постов периода измерений [10], с учетом длительности имеющихся рядов наблюдений на 6—11 пунктах, а также с учетом задачи исследования, мы рассматриваем материал раздельно для двух эпох. Первая охватывает 1915(1925)—1946 гг., т. е. до ашхабадского землетрясения, а вторая — 1941...1958 гг., т. е. включает это событие.

При этом использованы рассчитанные Н. И. Сухаренко по специальной программе значения скорости СВДЗК на постах. Повторное нивелирование на столь обширной территории, естественно, проводилось по разным линиям (и их участкам) в раз-

ные эпохи, сроки и с неодинаковыми интервалами. Для согласования с выделенными периодами уровнемерных наблюдений для Закаспийской части области, где, по уровнемерным данным, уже были известны аномалии движений во вторую эпоху, нам пришлось ограничиться небольшой частью нивелировок. По линии Ашхабадской железной дороги для первой эпохи использованы пневелировки 1885—1943 гг., а для второй — 1943—1952 гг. [7]. Для получения абсолютных величин скорости движений учтено поднятие пункта Красноводск со скоростью 2,5 мм/год в первый период и 2,4 мм/год — во второй. Для западной и северной части

Статистические характеристики поля скоростей СВДЗК

Регио- ны дистанции, мм <sup>2</sup> год <sup>2</sup>	I эпоха		II эпоха		
	Максималь- ная ско- рость, мм/год	Минималь- ная ско- рость, мм/год	Максималь- ная ско- рость, мм/год	Минималь- ная ско- рость, мм/год	
1	25,30	13,2	-7,7	40,30	29,9
2	5,07	5,6	-5,5	5,07	-6,5
3	3,50	3,5	-3,0	3,74	-5,5
4	0,57	2,9	0,7	0,57	3,5
					-3,0
					2,9
					-0,7

территории использованы значения скорости СВДЗК в узловых и характерных пунктах [3].

Примененная нами методика позволяет проводить на статистической основе интерполяцию значений скорости вне пунктов с измеренными величинами скорости. Составными частями такой методики является статистический анализ поля скоростей СВДЗК и выполняемая на его основе интер- и экстраполяция значений скорости вне линий повторного нивелирования и уровнемерных пунктов.

Статистический анализ включает вычисление характеристик дистанции скорости, выделение районов с постоянной (в избранных пределах) дистанцией значений скорости и построения ковариационных функций районов. Характеристики дистанций скорости вычислялись по формуле

$$\sigma_v^2(E) = \frac{\sum_{j=1}^n (v_E - v_j)^2}{n},$$

где  $\sigma_v^2(E)$  — дистанция скорости СВДЗК точки  $E$ ;  $v_E$  — значения скорости в точке  $E$ ;  $n$  — количество точек, попавших в окружность (вокруг  $E$ ) радиуса  $R=87,5$ , подобранного эмпирически;  $v_j$  — значения скоростей в точках, попавших в окружность. Минимальное значение  $n$  оказалось равным 2, максимальное — 18,  $\sigma_{v_E} = 8$ . Значения дистанций скоростей лежат в пределах: I эпоха —  $(0,01—79,12)$   $\text{мм}^2/\text{год}^2$ , II эпоха —  $(0,01—306,59)$   $\text{мм}^2/\text{год}^2$ .

Далее на основе критерия Фишера при 10%-ном уровне значимости были выделены четыре региона, однородных по дисперсии скорости (рис. 2). Основные статистические характеристики этих регионов приведены в таблице.

Конфигурации регионов для I и II эпох за незначительным исключением совпадают. Каждый из четырех выделенных регионов обладает определенной совокупностью статистических свойств, являющихся отражением реальной структуры их поля. Эти свойства численно характеризуются ковариационными функциями, позволяющими степень изменения стохастической связи между различными элементами поля.

Для каждого из четырех регионов подобраны следующие ковариационные функции:

I эпоха

$$C_1(r) = 25,30 \cdot e^{-0,0002 \cdot |r|^{2,0}}$$

$$C_2(r) = 5,07 \cdot e^{-0,03990 \cdot |r|^{1,0}}$$

$$C_3(r) = 3,50 \cdot e^{-0,00331 \cdot |r|^{1,5}}$$

$$C_4(r) = 0,57 \cdot e^{-0,00369 \cdot |r|^{1,5}}$$

II эпоха

$$C_1(r) = 40,30 \cdot e^{-0,00157 \cdot |r|^{2,0}}$$

$$C_2(r) = 5,07 \cdot e^{-0,03930 \cdot |r|^{1,0}}$$

$$C_3(r) = 3,74 \cdot e^{-0,00246 \cdot |r|^{1,0}}$$

$$C_4(r) = 0,57 \cdot e^{-0,00369 \cdot |r|^{1,5}}.$$

Полученные таким образом ковариационные функции значительно разнятся между собой: во-первых, дисперсиями скоростей в регионах (см. выше) и, во-вторых, длинами участков корреляции. Так, для I эпохи длины участков корреляции составляют 56, 66, 93 и 38 км соответственно для каждого из четырех регионов. Для II эпохи эти величины равны 47,2, 66, 97,5 и 38 км соответственно.

Полученные статистические характеристики регионов (как для I, так и для II эпохи) свидетельствуют об ощутимом различии характера и интенсивности СВДЗК в указанных районах.

Выполненный статистический анализ поля скоростей позволил перейти к следующему этапу — определению значений скорости СВДЗК вне линий повторного нивелирования и уровнемерных пунктов.

Расчет скоростей выполнялся по формулам

$$v_p = C_{pv}^r (C_{vv} + D)^{-1} v_k, \quad m_p^2 = C_{pv}^r (C_{vv} + D)^{-1} \hat{C}_{pv},$$

в которых  $C_{pv}$  — ковариационная матрица известных и искомых значений скоростей  $v$ ;  $C_{vv}$  — ковариационная матрица известных значений  $v_k$ ;  $D$  — дисперсионная матрица известных значений  $v_k$ ,

\* 2 и 4 регионы соответствуют западному побережью, поэтому ковариационные функции для I и II эпох одинаковы.

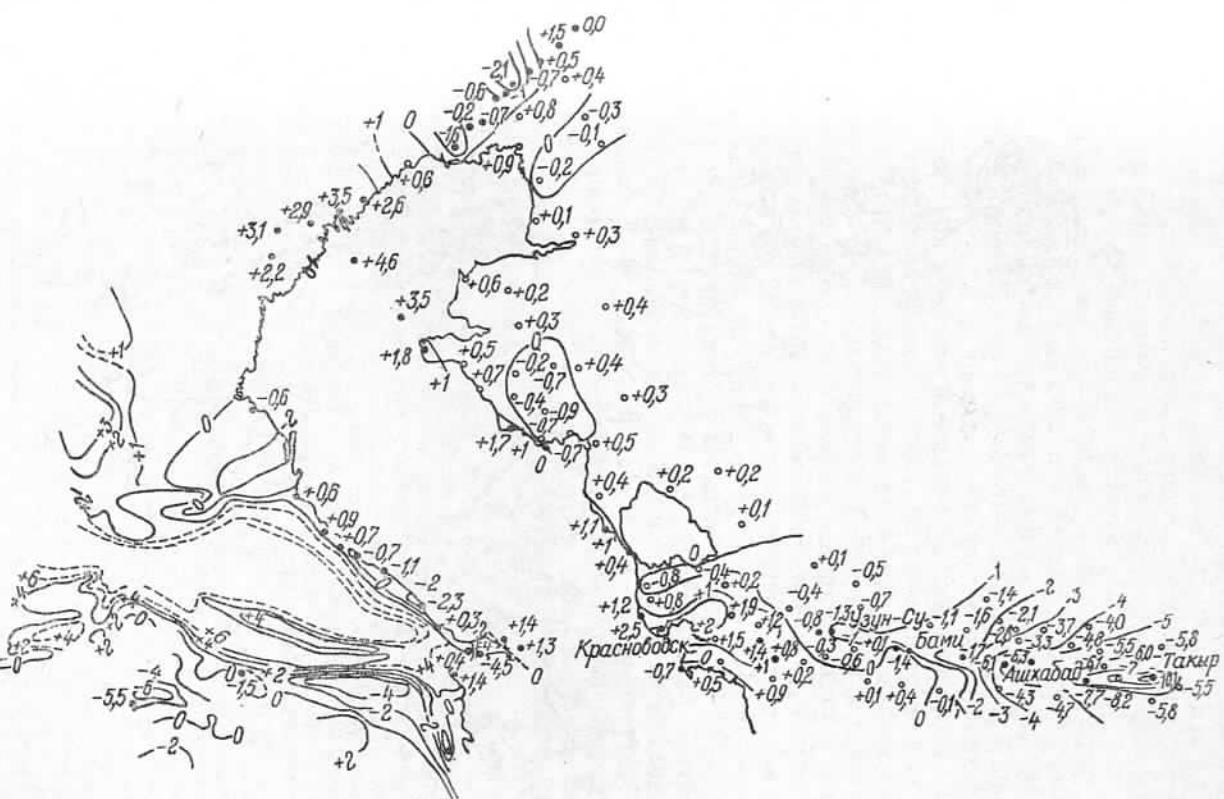


Рис. 3. Карта скоростей СВДЗК I эпохи — 1915—1946 гг.  
(● — известные скорости СВДЗК, ○ — искомые скорости СВДЗК).

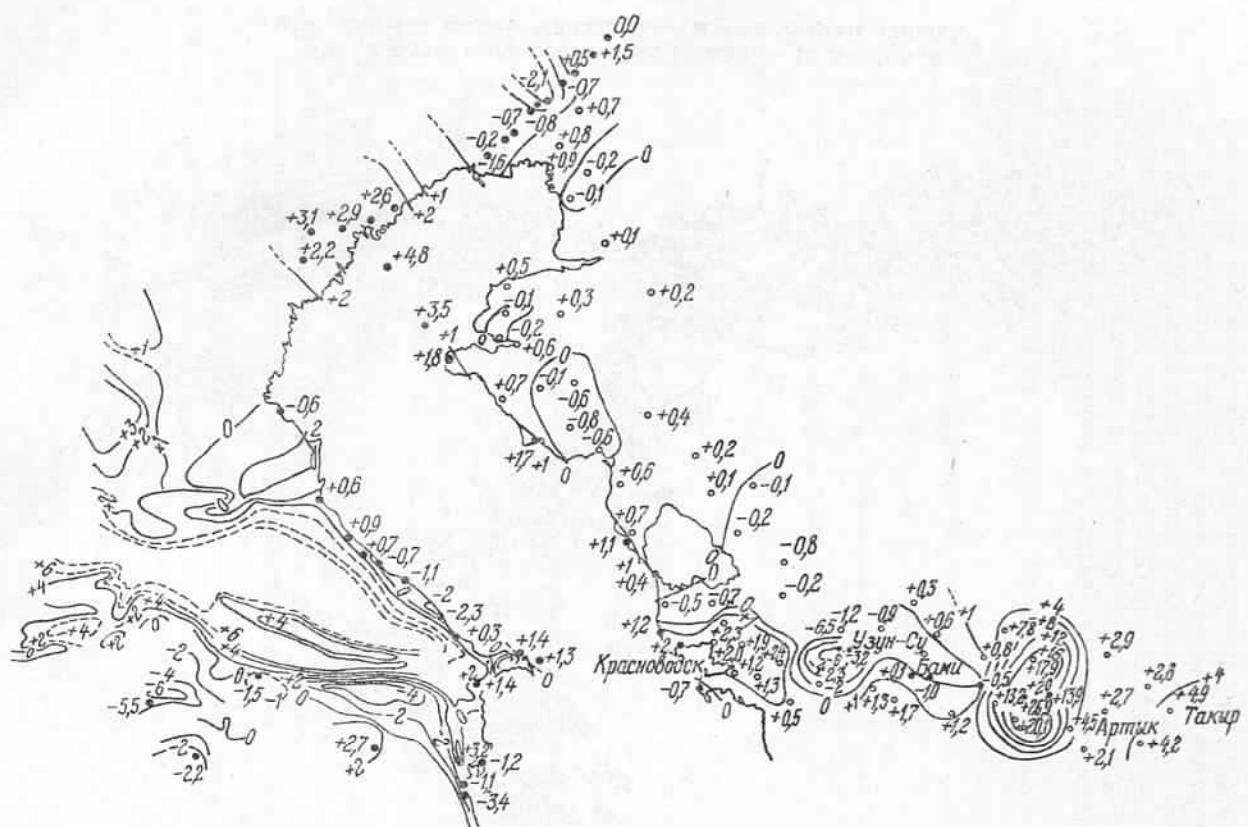


Рис. 4. Карта скоростей СВДЗК II эпохи — 1941—1958 гг.  
(● — известные скорости СВДЗК, ○ — искомые скорости СВДЗК).

$v_h$  и  $v_p$  — известные и прогнозируемые значения скоростей соответственно;  $m_{vp}^2$  — дисперсии прогноза. Матрицы  $C_{vv}$  и  $C_{vp}$  составляются на основании ковариационной функции  $C(r)$ . Матрица  $D$ , характеризующая точность исходных скоростей, взята из [7]. Полученные таким образом скорости совместно с исходными заштрихованными скоростями через 1 мм/год отдельно для каждой из двух эпох по восточным частям Каспийской области (рис. 3, 4).

Сравнение карт к востоку от Каспия на каждую эпоху показывает их хорошее согласование для большей части изучаемого региона в пределах Туранской плиты. Знак и план движений здесь сохранились на протяжении 1915(1925)—1943(1946) гг. В противоположность этому, т. е. в пределах Альпийского подвижного поляса, бросаются в глаза резкая плоскодная дифференциация СВДЗК, различия в знаке, значениях, скорости и форме изолиний скорости СВДЗК. На Ашхабадском участке движения характеризовались общим погружением предконтинентальной полосы с максимальной среднегодовой скоростью до 10 мм/год в первую эпоху и вздымающим субмеридиального, т. е. поперечного к общей структуре участка, со скоростью до 27 мм/год — во вторую. Полученные характеристики значительно уточняют известные из [7]. Резкие изменения поля СВДЗК предконтинентального района в 1941(1943)—1952(1958) гг., по сравнению с более ранней эпохой, естественно связывать с аномальными движениями, предшествующими и сопровождавшими известное ашхабадское землетрясение 1948 г.

Проведенное исследование свидетельствует о хороших возможностях метода коллокации не только для составления карт СВДЗК, но и для выявления по ним дифференциации движений во времени и пространстве.

Список литературы: 1. Гозаский М. В. Основы тектонофизики. — М.: Нauка, 1975. — 576 с. 2. Гозаский М. В., Никонов А. А. Тектонофизическая интерпретация современных движений земной коры. — Геотектоника, 1973, № 3, с. 45—58. 3. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы (1 : 2 500 000). — М.: ГУГК, 1973. 4. Матцкова В. А. Уточненная карта скорости современных вертикальных движений земной коры на западе Европейской части СССР и некоторые соображения о периоде этих движений. — В кн.: Современные движения земной коры. М., 1963, № 1, с. 73—87. 5. Матцкова В. А. Карта градиентов скорости вертикальных движений земной коры Европейской части СССР и исследования периодичности движений. — В кн.: Современные движения земной коры. Тарту, № 5, 1973, с. 42—48. 6. Матцкова В. А., Сидоров В. А. Некоторые вопросы составления карт современных вертикальных движений земной коры. — В кн.: Современные движения земной коры. Тарту, 1973, № 5, с. 58—65. 7. Мещеряков И. Н. Многократные повторные инвертирования на трассе Красноводск—Чарджоу. — В кн.: Современные движения земной коры. Тез. докт. ВИП. Всесоюз. совещ. по изучению современных движений земной коры. Кипшиев, 1982, с. 88. 9. Сигалов В. М. Исследование вертикальных движений земной коры в Северном Тянь-Шане. — Геодезия и картография, 1979, № 1, с. 23—30. 10. Сухаренко Н. И., Никонов А. А. Дифференциация современных вертикальных движений на побережье Каспийского моря (по уровням данных). — В кн.: Современные движения земной коры. Тез. докт. ВИП. Всесоюз. совещ. по изучению современных движений земной коры. Кипшиев, 1982, с. 118—119.