

$N=10$ поперечный сдвиг наиболее слабого пункта в 8 раз больше продольного, а при $N=25$ — в 16,5 раза.

3. Наиболее слабыми при любом числе рядов в сети являются пункты, расположенные на середине диагоналей. Ошибки координат пунктов медленно возрастают при движении от края к середине диагоналей.

4. При увеличении числа рядов в сети с 3 до 5 ошибки положения слабых пунктов уменьшились на 15% при $N=10$ и на 36% при $N=25$, с увеличением их с пяти до семи уменьшение ошибок положения пунктов составляет 4 и 18%. Поэтому можно предположить, что дальнейшее увеличение числа рядов в сети при $N < 15$ не приведет к существенным изменениям в значениях ошибок положения пунктов. При $N < 15$ ошибки положения пунктов в сетях с числом рядов больше семи будут на 8...10% меньше.

В заключение можно сказать, что в сплошных необходимых сетях трилатерации ошибки положения наиболее слабых пунктов только в два-три раза больше ошибок измерения сторон.

Исследованные сети трилатерации близки по своему построению к сетям 2 класса, за исключением полигоны 1 класса. Поэтому полученные результаты можно использовать при проектировании сетей трилатерации 2 класса, а также в других случаях, когда создаются сети трилатерации, опирающиеся на пункты более высокого класса.

1. *Бронштейн Г. С., Сафонова А. С.* Апроксимация формул для оценки точности ряда трилатерации // Геодезия и картография. 1974. № 1. С. 12—15.
2. *Заводовский А. В.* Оценка точности линейных триангуляций // Науч. зап. Львов. политехн. ин-та. Сер. геодез. 1959. № 5. С. 3—33.
3. *Костецкая Я. М.* К вопросу оценки точности сплошных сетей трилатерации // Геодезия, картография и аэрофотогеодезия. 1967. Вып. 6. С. 25—42.
4. *Костецкая Я. М.* О точности дирекционных углов в сплошных сетях трилатерации // Геодезия, картография и аэрофотогеодезия. 1974. Вып. 20. С. 45—50.
5. *Костецкая Я. М.* О точности дирекционных углов в необходимых сетях трилатерации // Геодезия, картография и аэрофотогеодезия. 1986. Вып. 43. С. 41—47.
6. *Продоров К. Д.* Точность элементов сети линейной триангуляции // Тр. НИИГАиК. 1958. Т. 11. С. 56—64.

Статья поступила в редакцию 07.04.86

УДК 551.24:528

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

ВАРИАНТ КАРТЫ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАРПАТО-БАЛКАНСКОГО РЕГИОНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОЛЛОКАЦИИ

При картографическом изображении современных вертикальных движений земной коры мы сталкиваемся с такими важными проблемами, как единообразное отражение на площади различных по точности и времени интервалов исходных данных (1), вы-

деление в измеренных величинах именно тектонической составляющей движений (II), адекватное изображение полученных дискретных значений скорости в виде поля скоростей движений (III).

Мы затрагиваем только последнюю проблему с целью подлить опыта использования статистического метода (метода коллокации) для представления результатов измерений в виде поля скоростей.

Существующие карты современных вертикальных движений земной коры (СВДЭК) основаны на точных геодезических данных. Таковы карта Восточной Европы, 1973 [2] и карта Карпато-Балканского региона, 1979 [11].

Наши исследования относятся к территории Карпато-Балканского региона. Выбор региона объясняется двумя главными причинами.

Во-первых, для региона имеется карта современных вертикальных движений, специально составленная по согласованной программе [8, 9, 11]. Во-вторых, именно в Паннонском бассейне и окружающих горах полученные значения вертикальных перемещений поверхности скорее всего отражают собственно тектонические унаследованные движения. Такое заключение основывается на исследованиях ковариационных функций ошибок измерений [12], с одной стороны, и хорошей корреляции поля современных вертикальных движений, новейших движений и ряда геофизических параметров — с другой [1]. Иными словами, в этом регионе более чем в других районах Восточной Европы карта современных движений отражает движения земной коры. Поэтому Карпато-Балканский регион представляется наиболее подходящим для преобразования первоначальных дискретных значений скорости вертикальных движений в приближающееся к реальному полю скоростей движений земной коры. Использован фактический материал карты СВДЭК Карпато-Балканского региона (1979, масштаб 1:1000000) под редакцией доктора И. Йоо [11] в виде 249 узловых пунктов со значениями скорости вертикальных движений. Точность измерений и расчеты скорости движений в этих пунктах приводятся в объяснительных записках к картам [8, 9] и дополнены не рассматриваются. Мы сосредоточим внимание на способах перехода от точечных значений скорости современных вертикальных движений земной коры к представлению их в виде поля скоростей.

На карте СВДЭК Карпато-Балканского региона, как и на большинстве других карт, переход от точечных значений скорости к сплошному изображению в виде изолиний скорости осуществлен традиционным способом. Он заключается в линейной интерполяции точечных значений скорости вдоль линий повторного наблюдения и последующей свободной экстраполяции значений между этими линиями. Практически изолинии проводят вручную способом кто-либо из исследователей в соответствии с морфологическими особенностями территории. При таком варианте изображения на карте поля скоростей современных вертикальных

Движений сознательно или бессознательно реализуется идея о тесной корреляционной связи между современными движениями поверхности, геологической структурой и рельефом рассматриваемой территории. При традиционном способе составления карт СВДЭК достигнутые геодезическими измерениями точности не используются в ряде случаев не в полной мере и в зависимости от степени геолого-геоморфологической изученности и индивидуальности представлений составителя.

По мнению авторов, тесная связь между современными вертикальными движениями поверхности, геологической структурой и рельефом возможна, но не обязательна. В каждом регионе указанная связь должна быть предметом исследования, но не исходным постулатом.

Необходимо искать иные способы обработки и представления первичных данных о современных изменениях высот земной поверхности, которые были бы независимы от имеющихся, в ряде случаев субъективных представлений о морфоструктурах и объективной зависимости от них современных вертикальных движений, измеряемых на поверхности.

Хорошою возможностью независимого представления поля скоростей, основанного исключительно и полностью на первичных результатах измерений, дают статистические методы, в первую очередь базирующийся на вариационной статистике метод коллокации [4]. Метод обеспечивает максимальное использование полученной инструментальной путем информации о современных движениях как процессе многофакторном. Исходное положение использования метода коллокации состоит в том, что поле скоростей современных вертикальных движений рассматривается как случайное, изотропное на участках, однородных по дисперсии зна- чений скорости.

Метод среднеквадратической коллокации для рассматриваемой цели использован несколькими исследователями [3, 5, 7, 8, 10]. В СССР с его помощью составлены уточненные карты современных вертикальных движений о. Сахалин и Закаспийской территории.

Метод позволяет проводить на статистической основе интерполяцию значений скорости вне пунктов с заранее известными скоростями. Статистический анализ включает вычисление характеристик дисперсии скорости, выделение участков с постоянной (в избранных пределах) дисперсией значений скорости и построение ковариационных функций для каждой группы участков. В дальнейшем на основе полученных модельных ковариационных функций осуществляется интер- и экстраполяция значений скорости вне использованных на первом этапе узловых пунктов. Для построения таким способом варианта карты современных вертикальных движений Карпато-Балканского региона проведены следующие операции.

Поле скоростей современных вертикальных движений региона, образованное 249 узловыми пунктами на карте 1979 г., подвергнуто статистическому анализу.

Характеристики дисперсий скорости вычислены при помощи алгоритма скользящей дисперсии

$$s^2(E) = \frac{\sum_{i=1}^n (V_E - V_i)^2}{n}$$

где V_E — значение скорости движения в точке, для которой определяется дисперсия; V_i — значение скорости в точках, попадающих в окружность радиусом R ; n — количество точек, попавших в окружность скольжения радиуса R . Радиус R выбран таким, чтобы в окружность скольжения попало достаточное количество точек с известными скоростями, но в то же время чтобы характеристика локальная дисперсия, рассчитывалась в пределах территории.

Характеристики однородных по дисперсии территориальных групп

Номер группы	Число участков в группе	Дисперсия, мм/год	Количество точек в группе	Крайние значения скорости, мм/год	
				max	min
I	4	3,08	52	4,3	-3,4
II	6	1,23	53	3,1	-2,0
III	3	0,67	87	2,8	-1,1
IV	3	0,51	44	1,6	-1,1
V	3	0,47	13	1,0	-0,3

Значения дисперсий скоростей в Карпато-Балканском регионе лежат в пределах от 9,62 до 0,01 мм²/год². На основании вычисленных значений дисперсий скорости выделены участки, стационарные по дисперсии скорости (использован критерий Фишера при 5%-ном уровне значимости). Проведенный анализ позволяет выделить пять однородных в статистическом отношении групп участков со значениями дисперсии 3,08; 1,23; 0,67; 0,51; 0,47 мм²/год² (см. таблицу).

Размеры участков находятся в обратном отношении с плотностью исходных точек. Наибольшая она на севере и наименьшая на востоке и северо-востоке региона (рис. 1). Каждая группа состоит из нескольких несмежных участков. Характеристики однородных по дисперсии скорости территориальных групп приведены в таблице.

Статистические свойства поля скорости в пределах каждого участка описываются ковариационными функциями, характеризующими степень изменения стохастической связи между различными элементами поля.

Для каждой из вышеназванных групп вычислены эмпирические ковариационные функции вида

$$C^0(\varphi) = \frac{\sum_{k=1}^n (V_i V_j)^k}{n}$$

где $C^0(\varphi)$ — корреляционный момент для заданного сферического расстояния; V_i, V_j — значения скоростей пары точек, отстоящих друг от друга на заданном расстоянии; n — число таких пар точек.

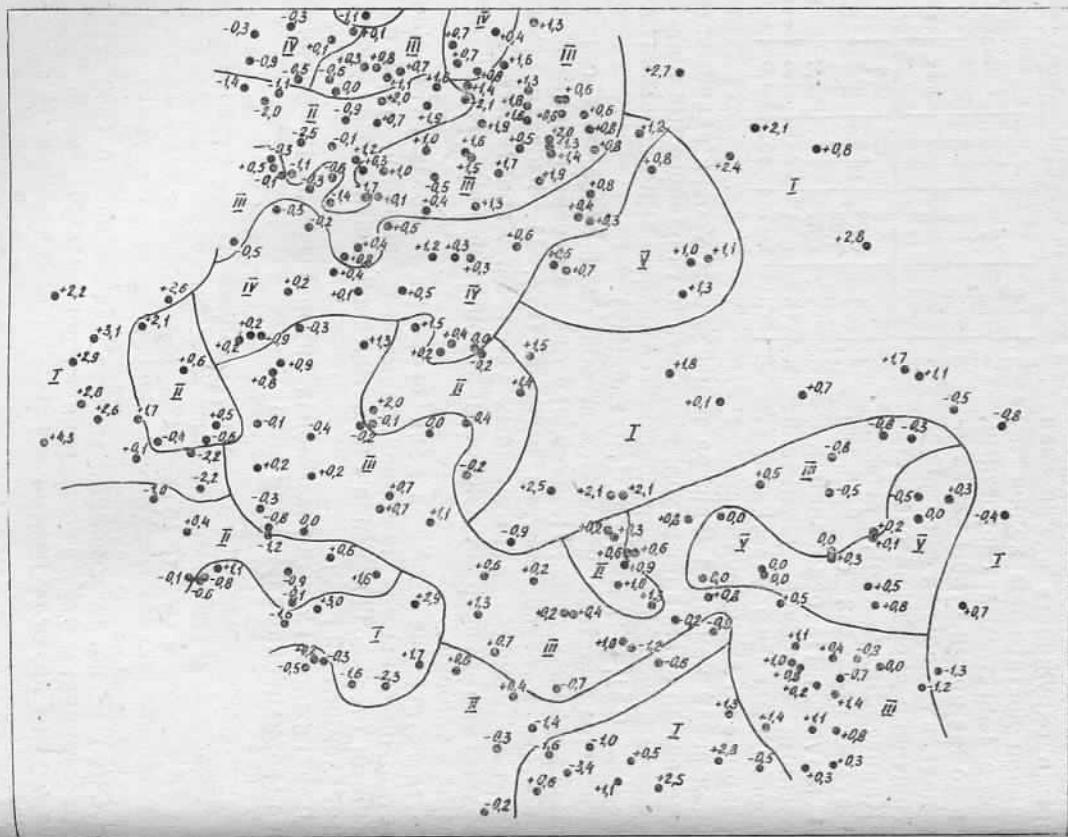


Рис. 1. Схема расположения участков (I, II, III, IV, V), различающихся по дисперсии значений скорости вертикальных движений.

(● — узловые пункты и скорости движений в них (мм/год) согласно карте 1979 г.).

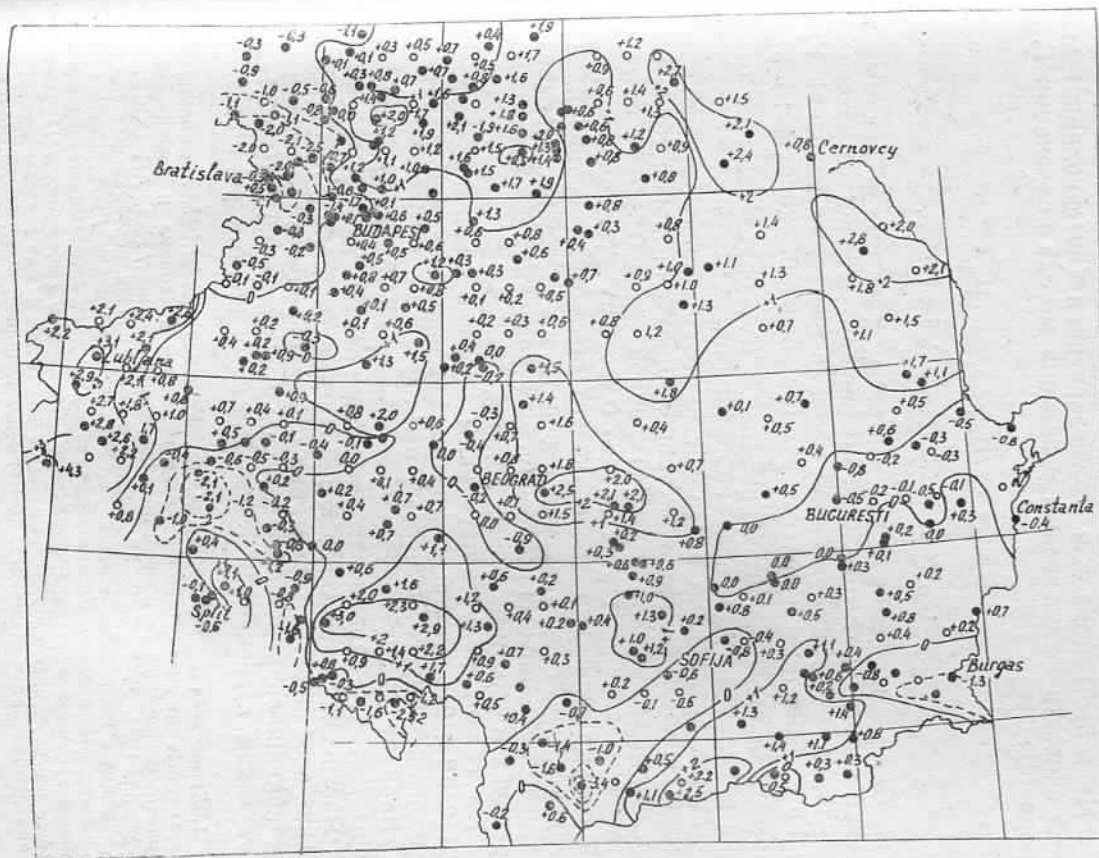


Рис. 2. Вариант карты современных вертикальных движений земной коры, полученный с помощью метода коллокации.

● — узловые точки со значениями скорости вертикальных движений (мм/год) на карте 1979 г.; ○ — точки в узлах сетки $0,5 \times 0,5^\circ$, для которых значения скорости получены методом коллокации; — изолинии положительных значений скорости (мм/год); ~ — изолинии отрицательных значений скорости (мм/год).

В последующем эмпирическая функция аппроксимировалась по способу наименьших квадратов аналитическим выражением ковариационной функции:

$$C(\psi) = C_0 e^{-A\psi^m},$$

где C_0 — дисперсия поля; A, m — параметры модельной функции. Значения параметров модельных функций приведены ниже:

A	I	II	III	IV	V
0.00283	0.06536	0.00107	0.00351	0.00094	
2.0	0.5	1.5	2.0	1.5	

На втором этапе для прогнозирования (интерполяции) значений скорости использованы уравнения метода коллокации Г. Морица [4]:

$$V_p = C_{pV}^T (C_{VV} + D)^{-1} V_K,$$

$$m^2 V_p = C_0 - C_{pV}^T (C_{VV} + D)^{-1} C_{pV},$$

где C_{pV} — ковариационная матрица известных и искомым значений скорости; C_{VV} — ковариационная матрица известных значений V ; D — дисперсионная матрица известных значений V ; V_K и V_p — известные и прогнозируемые значения скоростей; $m^2 V_p$ — дисперсия прогноза. Матрицы C_{pV} и C_{VV} определены на основании модельной ковариационной функции.

Метод коллокации позволяет выполнять прогнозирование значений скорости (интер- и экстраполяцию) для любой точки региона. Мы использовали узлы регулярной сетки $0,5 \times 0,5^\circ$, которая в отдельных случаях сужалась до $0,25 \times 0,25^\circ$. Такая сетка признана оптимальной для последующего построения изолиний. В результате получены значения скорости в 412 точках. Среднеквадратические ошибки прогнозируемых значений скорости лежат в пределах точности исходных данных.

На основе полученных таким образом значений скорости в 661 (249+412) пункте построены изолинии скорости вертикальных движений региона через 1 мм/год.

Вариант карты современных вертикальных движений земной коры Карпато-Балканского региона показан на рис. 2.

Построение карт СВДЗК независимо от геолого-теоморфологических особенностей территории открывает новые возможности сопоставления современных вертикальных движений с рельефом, геологическим строением и физическими полями региона.

1. *Бронгулев В. В., Грачев А. Ф., Калашникова И. В., Мазницкий В. А.* Современные движения земной коры, новейшая тектоника и физическое поле Карпато-Балканского региона. Корреляционный анализ // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 7. С. 3—12. 2. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. М., 1973. 3. *Мещеряков Г. А., Скрыль В. А.* Применение метода коллокации для построения карт современных вертикальных движений земной коры (на примере о. Сахалин) // Тез. докт. VIII Всесоюз. совещ. по изучению современных движений земной коры «Современные движения земной коры». Кишинев, 1982. С. 88. 4. *Мориц Г.*

Современная физическая геодезия. М., 1983. 5. *Скрыль В. А.* Прогнозирование скорости современных вертикальных движений земной коры // Геодезия, картография и аэрофотогеодезия. 1981. Вып. 33. С. 68—75. 6. *Hein G., Kistermann R.* On the problem of deriving recent crustal movements from geodetic levelling data // Allgemeine Vermessungs — Nachrichten. 1979. V. 86. N 10. P. 392—398. 7. *Hein G., Kistermann R.* Mathematical foundation of postglacial effect in geodetic recent crustal movement models // Tectonophysics. 1981. V. 71. P. 315—334. 8. *100 I., Csáti E., Fügö M.* et al. Exploratory description to the Map of Recent Vertical Crustal Movements in the Carpatho-Balkan Region. Budapest, 1979. 9. *100 I., Csáti E., Jovanović P.* et al. Recent vertical crustal movements of the Carpatho-Balkan region // Tectonophysics. 1981. V. 71. P. 41—52. 10. *Kangliser E.* Modellierung vertikaler Krustenbewegungen durch Kollokation // Zeitschrift für Vermessungswesen. 1983. Bd. 108. N 9. S. 373—381. 11. Map of recent vertical crustal movements in the Carpatho-Balkan region. Budapest, 1979. 12. *Meier S.* crustal movements in the Carpatho-Balkan region // Mitteilungen der Geographisch-physikalischen Anstalt der Universität Göttingen mit Hilfe von Korrelationsfunktionen // Geographisches Jahrbuch. 1984. Bd. 93. N 5. S. 379—391.

Статья поступила в редакцию 26.12.85

УДК 528.33

М. И. МАРЫЧ

О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ МОЛОДЕНСКОГО С УЧЕТОМ СЖАТИЯ ЗЕМЛИ

Основная задача современной теории фигуры Земли, созданной М. С. Молоденским, как известно, состоит в определении физической поверхности Земли s и ее внешнего гравитационного поля по значениям геопотенциала и силы тяжести g на этой же поверхности. Использование нормального вращения приводит к всемого уровневый земный эллипсоидом потенциала T , являющейся внешней краевой задаче для возмущающего потенциала T , являющегося гармонической и регулярной на бесконечности функцией. Граничные условия в этой задаче представляет собой соотношение

$$-\left(\frac{\partial T}{\partial \nu} - \frac{\partial \gamma T}{\partial \nu} \right)_s = \Delta g \quad (1)$$

между потенциалом T и смешанной аномалией силы тяжести $\Delta g = g - \gamma$ на поверхности s , полученное без учета малых величин порядка квадрата угла наклона отвеса и квадрата аномалии высоты $\xi = T/\gamma$. Здесь ν — направление, обратное направлению нормаль-ной силы тяжести γ . В этой линейной постановке задачи краевая поверхность s отождествляется с ее первым приближением (те-луroidом) $s',$ т. е. с поверхностью, получаемой путем наклонения нормальных высот h на эллипсоид.

Так как поверхность s' близка к отчетливому эллипсоиду, то для решения задачи наиболее эффективен метод малого параметра, предложенный М. С. Молоденским [7]. Согласно основной идее метода здесь должно использоваться решение для более простой поверхности, принимаемой за отчетливую, т. е. решение задачи Стокса с погрешностью порядка квадрата сжатия Земли, по-лученное в [2, 6, 9].