

В. А. СКРЫЛЬ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Применение методов математической статистики к изучению реальных физических полей, таких, как гравитационное, тепловое, электромагнитное поле Земли, поле рельефа земной поверхности и его производных во времени и пространстве, обусловлено прежде всего тем, что весь геологический опыт свидетельствует об объективно существующих, часто весьма сложных, опосредствованных стохастических связях между разнотипными физическими характеристиками Земли, рассматриваемой в целом как система.

Поэтому, прежде чем перейти к комплексному количественному описанию физических полей Земли с последующей интер-

претацией (геологической, геофизической и т. п.), необходимо выбрать оптимальный метод обработки количественной информации, относящейся к полю произвольной природы.

По нашему мнению, критерии оптимальности метода обработки информации следующие:

1. Способность метода адекватно описывать поля различной физической природы.

2. Возможность установления в пределах самого метода парных и множественных количественных и качественных связей между полями различной физической природы.

3. Наличие алгоритма, позволяющего эффективно использовать ЭВМ.

4. Возможность точностных оценок характеристик полей.

5. Совместимость метода с реальными статистическими свойствами описываемых явлений.

В последние годы при решении целого комплекса вопросов, связанных с исследованиями гравитационного поля Земли и других планет, широко применяется метод множественной линейной регрессии, или метод коллокации. Он в наилучшей мере отвечает отмеченным выше критериям, и поэтому, очевидно, интересно исследовать его возможности при обработке информации о поле скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК).

Цель работы — прогнозирование скоростей СВДЗК для участков, сведения о которых отсутствуют, выполненное на основе их статистического анализа и метода коллокации. В качестве исходной информации использована «Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы» [1].

На первом этапе исследовали стационарность поля скоростей СВДЗК, в результате чего выделено пять стационарных по дисперсии регионов [2]. Отметим, что их границы достаточно хорошо согласуются с границами тектоноструктур, выделяемых по совокупности геологической информации.

Поскольку поле скоростей СВДЗК имеет кусочно-стационарное строение, мы оказались перед альтернативой: либо непосредственно изучать каждый из регионов в отдельности, снижая в какой-то мере достоверность статистических выводов, либо выполнять предварительно принудительную стационаризацию по дисперсии поля всей области, а затем исследовать уже однородный по статистическим свойствам материал в совокупности.

Центральную роль в методе коллокации играют ковариационные функции, которые определяются по эмпирическим данным. Именно они являются статистической оценкой внутренней структуры физического поля. Построены эмпирические ковариационные функции как для поля скоростей всей области, так и для полей каждого из пяти регионов. При вычислении значений эмпирических ковариационных функций использовано соотношение

$$C(\Psi) = \frac{\sum \sin \Theta_i \sin \Theta_j v_i v_j}{\sum \sin \Theta_i \sin \Theta_j},$$

где θ_i, θ_j — широты центров трапеций $1^\circ \times 1^\circ$; v_i и v_j — значения скоростей СВДЗК в трапециях, расстояние между центрами которых равно заданному значению сферического расстояния

Таблица

Ковариационная функция центрированного нормированного поля скоростей СВДЗК для всей области

Расстояние, град	Корреляционные моменты $C(\psi)$	Число произведений $v_i v_j$	Расстояние, град	Корреляционные моменты $C(\psi)$	Число произведений $v_i v_j$
0°	0,97	267	11	-0,08	4528
1	0,33	1388	12	-0,05	4386
2	0,25	2140	13	-0,09	3938
3	0,16	3028	14	-0,04	3526
4	0,17	3324	15	-0,08	3016
5	0,15	3830	16	-0,06	2712
6	0,07	4660	17	-0,09	2452
7	0,01	4482	18	-0,09	2134
8	-0,06	4680	19	-0,07	1796
9	-0,05	4662	20	-0,01	1432
10	-0,11	4622			

Таблица

Ковариационные функции поля скоростей СВДЗК для I—V регионов

ψ°	I регион		II регион		III регион		IV регион		V регион	
	$c(\psi)$	n	$c(\psi)$	n	$c(\psi)$	n	$c(\psi)$	n	$c(\psi)$	n
0°	0,75	51	4,42	17	4,59	159	8,52	29	12,70	24
1	0,40	218	4,29	104	2,36	664	2,09	180	8,92	118
2	0,26	310	3,41	102	1,88	1010	0,95	234	8,39	146
3	0,19	468	2,65	34	1,27	1696	0,47	174	6,69	138
4	0,16	412	1,18	24	1,18	1670	-1,20	118	6,61	98
5	0,14	340	0,65	8	0,66	1716	-0,97	64	8,02	38
6	0,20	366			0,14	2114	-2,55	34	5,18	10
7	0,19	214			0,05	1848	-2,39	8	8,16	4
8	0,14	138			-0,25	1984				
9	-0,32	68			-0,44	1804				
10	0,07	14			-0,67	1726				
11	0,12	2			-0,57	1600				
12					-0,59	1518				
13					-0,45	1358				
14					-0,50	1216				
15					-0,31	994				
16					-0,83	802				
17					-1,15	606				
18					-1,04	410				
19					-0,75	252				
20					+1,19	104				

ия ψ *. В табл. 1, 2 приведены значения ковариационных функций для всей области и раздельно по регионам. На рис. 1—6 показаны соответствующие графики.

Для дальнейшего эффективного в вычислительном отношении использования ковариационных функций необходимо по их эмпирическим значениям подобрать оптимальные параметры модельных ковариационных функций, обладающих свойствами

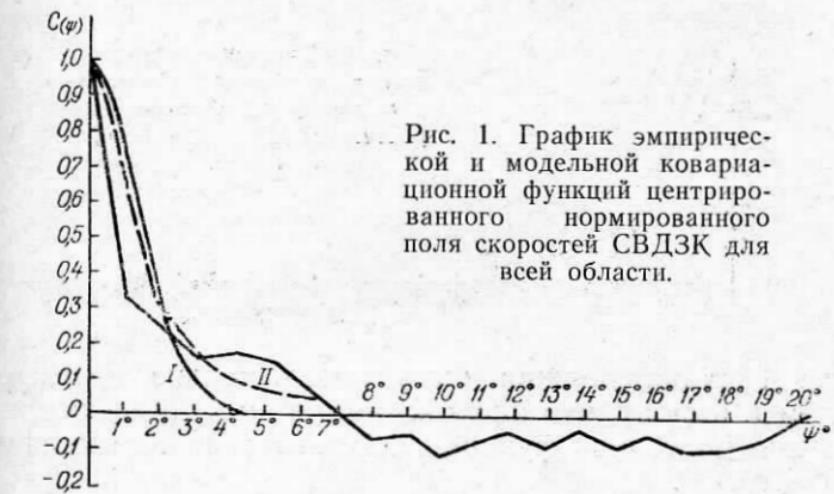


Рис. 1. График эмпирической и модельной ковариационной функций центрированного нормированного поля скоростей СВДЗК для всей области.

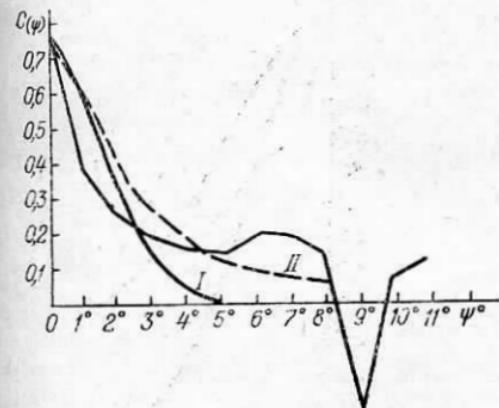


Рис. 2. График эмпирической и модельной ковариационной функций поля скоростей СВДЗК для I региона.

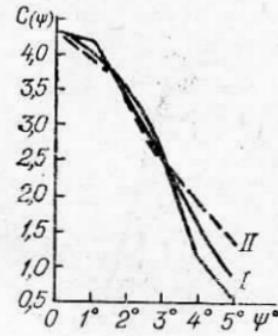


Рис. 3. График эмпирической и модельной ковариационных функций поля скоростей СВДЗК для II региона.

положительной определенности и изотропности. Из многочисленного класса этих функций нами выбраны те, которые применяют при изучении силы тяжести Земли:

$$C(\Psi) = C_0 \cdot e^{-a\Psi^2}; \quad C(\Psi) = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{\Psi}{d}\right)^2}, \quad (2)$$

* При вычислении значений эмпирических ковариационных функций для всей области в качестве v_i и v_j взяты центрированные нормированные значения скоростей.

где C_0 — дисперсия поля, т. е. значение ковариационной функции при $\psi = 0^\circ$; a и d — константы, определяемые по значениям эмпирических и ковариационных функций.

Анализируя данные табл. 1, 2 и графики эмпирических ковариационных функций, а также учитывая, что любая ковариа-



Рис. 4. График эмпирической и модельной ковариационной функций поля скоростей СВДЗК для III региона.

ционная функция должна быть положительно определенной, приходим к выводу, что аппроксимация эмпирических значений с помощью модельной функции действительна только на интервале $0^\circ \leq \psi \leq 7^\circ$.

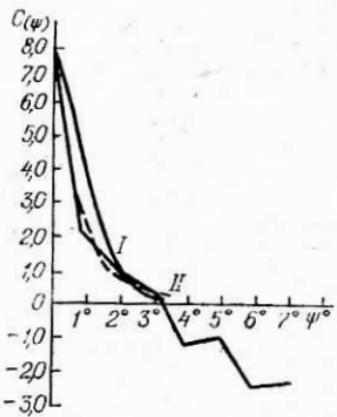


Рис. 5. График эмпирической и модельной ковариационной функций поля скоростей СВДЗК для IV региона.

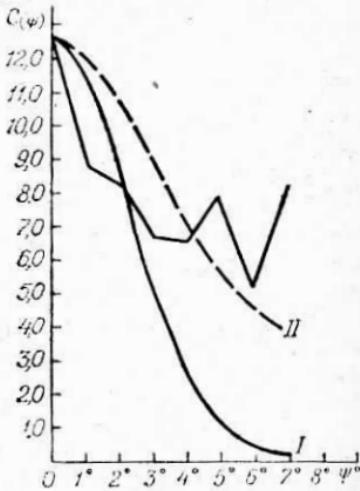


Рис. 6. График эмпирической и модельной ковариационной функций поля скоростей СВДЗК для V региона.

Аппроксимация по методу наименьших квадратов позволила получить модельные ковариационные функции, значения которых приведены в табл. 3. Графики этих функций соответственно показаны на рис. 1—6, где сплошная линия соответствует первой из формул (2), а штриховая — второй.

Анализ точностных характеристик аппроксимации эмпирических ковариационных функций дает возможность заключить, что ни одна из апробированных функций не описывает удовле-

творительно статистических свойств поля скоростей СВДЗК в интервале $0^\circ < \psi < 1^\circ$. Это вызвано, по-видимому, недостаточным учетом при оценках констант модельных ковариационных функций параметра кривизны эмпирической ковариационной функции, непосредственно связанного с градиентом поля скорости СВДЗК и «отвечающего» за поведение эмпирической ковариационной функции в окрестностях точки $\psi = 0^\circ$. Этот

Таблица 3
Модельные ковариационные функции

Ковариационная функция	$C_0 e^{-d\psi^2}$	$C_0/1 + \left(\frac{\psi}{d}\right)^2$
Центрированного нормированного поля скоростей СВДЗК для всей области	$0,97 e^{-0,279\psi^2}$	$\frac{0,97}{1 + \left(\frac{\psi}{1,37}\right)^2}$
I региона	$0,75 e^{-0,163\psi^2}$	$\frac{0,75}{1 + \left(\frac{\psi}{2,30}\right)^2}$
II региона	$4,42 e^{-0,062\psi^2}$	$\frac{4,42}{1 + \left(\frac{\psi}{3,52}\right)^2}$
III региона	$4,59 e^{-0,198\psi^2}$	$\frac{4,59}{1 + \left(\frac{\psi}{1,54}\right)^2}$
IV региона	$8,52 e^{-0,759\psi^2}$	$\frac{8,52}{1 + \left(\frac{\psi}{0,67}\right)^2}$
V региона	$12,7 e^{-0,089\psi^2}$	$\frac{12,7}{1 + \left(\frac{\psi}{4,65}\right)^2}$

недостаток в целом не снижает ценность обсуждаемых результатов, ибо, во-первых, как известно, выбор той или иной модельной ковариационной функции преимущественно влияет лишь на точностные характеристики результатов обработки информации методом коллокации, а не на значение этих результатов, а во-вторых, в нашем случае при расстояниях $\psi > 1^\circ$ оценка точности не будет существенно искажена неадекватностью выбранных функций.

Для прогнозирования скоростей СВДЗК в точках поверхности рассматриваемой области, для которых эта информация отсутствовала, использовали основные уравнения метода коллокации [3], модифицированные следующим образом:

$$v_p = C_{pv}^T (C_{vv} + D)^{-1} v_k; \quad (3) \quad m_{v_p} = C_0 - C_{pv}^T (C_{vv} + D)^{-1} C_{pv}. \quad (4)$$

Здесь C_{pv} — ковариационная матрица известных и искомых значений скоростей v ; C_{vv} — ковариационная матрица известных значений v ; D — дисперсионная матрица известных значений v ; v_h — известные значения скоростей; v_p — прогнозируемые значения скоростей; m_{v_p} — погрешность прогноза.

Таблица 4
Образец прогноза скоростей СВДЗК

$+0,2^*$	$+2,0$	$+0,1^*$	$+0,1^*$	$-0,4^*$
$-0,4$	$-0,5$	$-0,3$	$-0,1^*$	$+0,1$
$-0,2^*$	$-0,2^*$	$-0,2^*$	$-0,6$	$-0,1^*$
$+0,2$	$-1,0$	$-0,3^*$	$-0,2^*$	$+0,5$
0	$-0,9$	$-0,9$	$-0,2$	$+0,3$

* — прогнозируемые значения скоростей

Используя соотношения (3) и (4) и модельные функции, приведенные в табл. 3, нами вычислены значения вертикальных движений для центров всех трапеций размера $1^\circ \times 1^\circ$, где эта информация отсутствовала, с соответствующей оценкой точности.

При выполнении прогноза всю рассматриваемую территорию разбивали на блоки $5^\circ \times 5^\circ$. Вычисление прогнозируемых скоростей производили раздельно по блокам. Дисперсии известных значений скоростей приняты равными $2,25 \text{ мм}/\text{год}$. Образец такого прогноза в одном из блоков приведен в табл. 4. Средние квадратические погрешности прогнозируемых значений скоростей находятся в пределах $\pm (0,8 \dots 1,8) \text{ мм}/\text{год}$.

Детальный анализ результатов прогноза подтвердил, что предлагаемая методика позволяет с большой степенью достоверности выявлять основные пространственные локации СВДЗК на конкретную эпоху и использовать ее для составления карт СВДЗК.

Список литературы: 1. *Буланже Ю. Д., Лилиенберг Д. А.* Итоги международного сотрудничества стран Восточной Европы по составлению сводной карты современных вертикальных движений земной коры. — Современные движения земной коры, 1973, № 5. 2. *Киричук В. В., Скрыль В. А.* О нестационарности поля скоростей современных вертикальных движений земной коры. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1980, вып. 31. 3. *Moritz H.* Least-squares collocation. — DGK, R. A. München, 1973, № 75.

Работа поступила в редакцию 24 января 1980 года.