

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. В. Овчаренко, Реконструкция горизонтальных деформаций земной коры Урала по пространственно-временному анализу мощности геологических осадков,

Докл. РАН, 1997, том 352, номер 4, 535–540

<https://www.mathnet.ru/dan50261>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.171

28 апреля 2025 г., 16:28:36



УДК 550.83.01.+551.24

РЕКОНСТРУКЦИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ УРАЛА ПО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМУ АНАЛИЗУ МОЩНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСАДКОВ

© 1997 г. А. В. Овчаренко

Представлено академиком В.А. Магницким 04.10.95 г.

Поступило 04.10.95 г.

Проблема определения скоростей горизонтальных перемещений и деформаций блоков земной коры в геологии и геофизике занимает особое место, поскольку с такими движениями связаны конкретные важнейшие задачи реконструкций строения и развития земной коры, важнейшие прикладные аспекты прогноза и поисков месторождений минерального сырья, поисков предвестников землетрясений. К настоящему времени накоплено много примеров как инструментального, так и полуколичественного определения весьма значительных горизонтальных перемещений блоков земной коры [2, 3]. Примеры реконструкций горизонтальных палеосмещений крупных регионов выполняются чаще всего на основе палеомагнитных данных и имеют при этом долготную неопределенность. Примеры реконструкций горизонтальных сдвигов на основе идентификации разорванных объектов-маркеров могут дать представление только лишь о части общего сложного процесса. Весьма важные и принципиальные инструментальные измерения современных горизонтальных смещений все еще весьма дорогостоящи, требуют достаточно длительных (десятилетия) циклов наблюдений и не решают проблем реконструкций палеосмещений. Сказанное неизбежно приводит к выводу, что “надо настойчиво искать пути выяснения количественных параметров горизонтальных движений” [3, с. 308]. В данной работе предпринята такая попытка на основе анализа карт мощности осадконакопления [1].

1. Метод. Будем полагать, что пространственно близкие точки $P(x, y)$ деформируемой поверхности осадконакопления/размыва имеют близкие скорости смещения, т.е. поле пространственных смещений этой поверхности является в математическом смысле непрерывным. При таком достаточно слабом ограничении динамическая функция мощности осадков $M(x, y, t)$ может

быть представлена уравнением баланса пространственно-временных изменений

$$\frac{\partial M(x, y, t)}{\partial t} = -\left(\frac{\partial M}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial M}{\partial y} \frac{dy}{dt}\right). \quad (1)$$

Обозначая

$$\frac{\partial M}{\partial t} = M_t, \quad \frac{\partial M}{\partial x} = M_x, \quad \frac{\partial M}{\partial y} = M_y, \\ \frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = w,$$

получим

$$M_t = -M_x u - M_y w, \quad (2)$$

где M_t, M_x, M_y – градиенты мощности осадков по времени и пространственным координатам, определяемые непосредственными вычислениями из последовательности карт осадконакопления геологических периодов, u, w – компоненты вектора скорости $v = u + iw$ горизонтальных смещений областей осадконакопления, которые необходимо восстановить по (2) и дополнительной информации о решении. Уравнение (2) формально обозначает, что в области осадконакопления нет источников изменения мощности осадков. Дополнительная информация о решении может быть введена на основе достаточно общих соображений. Для упруго деформируемой поверхности можно определить показатель гладкости искомого решения в форме

$$\Omega = \iint (u_\xi^2 + u_\eta^2 + w_\xi^2 + w_\eta^2) d\xi d\eta. \quad (3)$$

Решение (2) с учетом (3) может быть представлено в виде итеративной схемы, предложенной Б.К.Р. Хорном для оптического потока [7]:

$$u^{n+1} = u^n - \frac{M_x u^n + M_y w^n + M_t}{1 + \alpha(M_x^2 + M_y^2)} M_x \alpha, \\ w^{n+1} = w^n - \frac{M_x u^n + M_y w^n + M_t}{1 + \alpha(M_x^2 + M_y^2)} M_y \alpha. \quad (4)$$

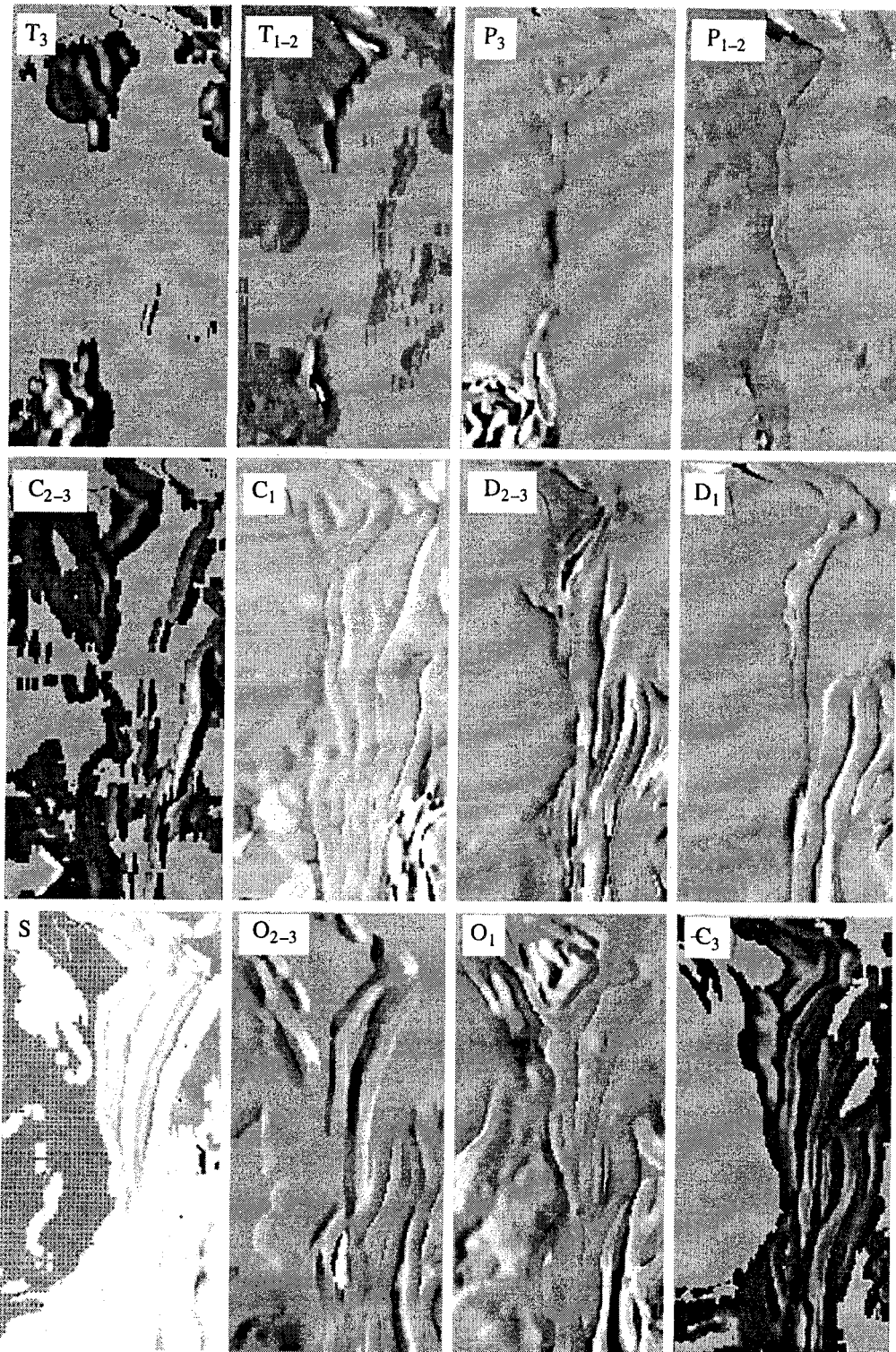


Рис. 1. Тоновые карты скорости субширотных смещений областей аккумуляции/размыва для геологических периодов $T_3, T_{1-2}, P_3, P_{1-2}, C_{2-3}, C_1, D_{2-3}, D_1, S, O_{2-3}, O_1, E_3$.

Здесь $n, n + 1$ – номера итераций, α – параметр регуляризации. При большом числе анализируемых изображений (карт) и точек на них схема (4) требует достаточно больших вычислительных ресурсов. Если находить решение на основе оптимизации

сглаживающего функционала А.Н. Тихонова

$$M^\alpha[M_x, M_y, M_z, u, w, \alpha] = \iint_{S \rightarrow 0} ((uM_x + wM_y + M_z)^2 dx dy + \alpha \iint_{S \rightarrow 0} ((u - \bar{u})^2 + (w - \bar{w})^2)) dx dy, \quad (5)$$

Таблица 1. Статистика распределения компонент скорости горизонтальных палеосмещений u, w (мм/год)

Период	U_{cp}	Стандарт	U_{min}	U_{max}	W_{cp}	Стандарт	W_{min}	W_{max}
T_3	0.01	0.17	-10.5	2.2	-0.01	0.14	-1.5	1.3
T_{2-3}	-0.06	0.55	-5.7	7.6	-0.02	0.45	-5.0	8.8
P_3	-0.01	1.20	-10.5	9.6	0.03	1.22	-9.4	10.9
P_1	0.02	0.51	-9.2	10.6	-0.01	0.60	-11.4	9.3
C_{2-3}	0.05	1.06	-0.6	12.9	0.01	1.00	-13.4	13.3
C_1	0.04	1.33	-11.8	9.6	0.03	1.12	-12.0	12.0
D_{2-3}	-0.01	0.45	-3.8	4.0	0.01	0.33	-4.0	3.4
D_1	-0.01	0.70	-7.8	7.4	-0.02	0.59	-7.5	7.5
S	0.06	0.78	-8.2	3.2	0.03	0.48	-3.8	5.4
O_{2-3}	0.03	1.32	-10.5	11.2	0	0.86	-9.8	10.1
O_1	0.005	0.97	-6.7	7.4	0	0.71	-5.8	6.4
$Cembr_3$	0.14	1.09	-6.3	10.2	-0.01	0.78	-5.9	7.7

где \bar{u}, \bar{w} – средние для окрестности S компоненты скорости, то, решая соответствующую систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^\alpha}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial M^\alpha}{\partial w} = 0, \\ (M_x u + M_y w + M_t) M_x + \alpha(u - \bar{u}) = 0, \\ (M_x u + M_y w + M_t) M_y + \alpha(w - \bar{w}) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

относительно неизвестных скалярных функций u, w , получим

$$\begin{aligned} u = \frac{\bar{u}(M_y^2 + \alpha) - \bar{w} M_x M_y - M_x M_t}{M_x^2 + M_y^2 + \alpha}, \\ w = \frac{\bar{w}(M_x^2 + \alpha) - \bar{u} M_x M_y - M_y M_t}{M_x^2 + M_y^2 + \alpha}. \end{aligned} \quad (7)$$

В первом приближении можно принять $\bar{u} = 0, \bar{w} = 0$, тогда

$$\begin{aligned} u = \frac{-M_x M_t}{M_x^2 + M_y^2 + \alpha}, \\ w = \frac{-M_y M_t}{M_x^2 + M_y^2 + \alpha}. \end{aligned} \quad (8)$$

Модуль скорости смещений и линейно связанный с ним модуль деформаций вычисляется по компонентам

$$\begin{aligned} |V| = \sqrt{u^2 + w^2}, \\ |E| = dt \sqrt{u^2 + w^2}. \end{aligned}$$

Следует указать, что поскольку задача решается в терминах смещений, то далее по известным формулам теории упругости могут быть оценены

все компоненты тензора палеодеформации, а затем с использованием приближенных оценок параметров упругих характеристик среды все компоненты тензора палеонапряжений. Однако обсуждение этого выходит за рамки настоящей работы.

2. Реализация. Применение схем (4), (7), (8) для числовых матриц мощности осадконакопления от раннего кембрия до позднего триаса показало, что они дают близкие результаты, однако схема (7), (8) работает существенно быстрее. Выбор параметра регуляризации выполняется по методу невязки Тихонова–Гласко. Процедуры реализованы в вычислительной среде АСОМ-АГС/РС. Числовые матрицы мощности геологических формаций получены цифрованием палеотектонических карт СССР М 1 : 5 000 000 [1] по технологии “Gamma” [4].

Анализ распределения карт скоростей смещений указывает (рис. 1, 2, табл. 1), что существуют области, в которых векторы скорости горизонтальных смещений направлены взаимно противоположно. Границы таких областей могут интерпретироваться соответственно как зоны палеорастяжения и сжатия. Сопоставление зон растяжения/сжатия с тектоническими нарушениями соответствующих геологических периодов указывает на их хорошее соответствие. На рис. 3 представлено такое сопоставление для D_{2-3} .

Статистика распределения компонент горизонтальных смещений для периодов $T_3, T_{1-2}, P_3, P_1, C_{2-3}, C_1, D_{2-3}, D_1, S, O_{2-3}, O_1, C_3$ приводится в табл. 1.

Относительная погрешность вычисления параметров из-за недоучета искажающих факторов оценивается нами на основе численных экспериментов в 30–50%.

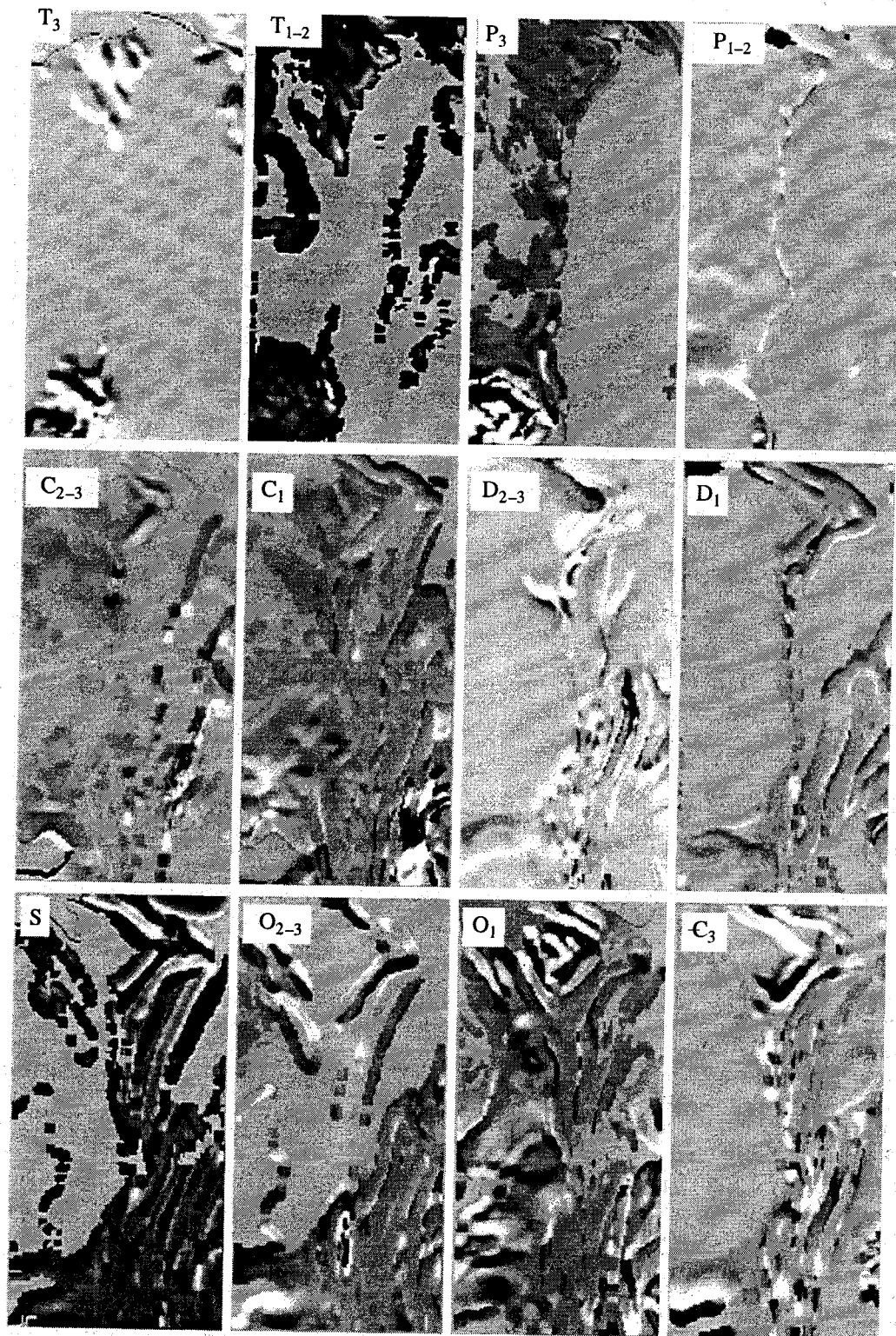


Рис. 2. Тоновые карты скорости субмеридиональных смещений областей аккумуляции/размыва для геологических периодов T_3 , T_{1-2} , P_3 , P_{1-2} , C_{2-3} , C_1 , D_{2-3} , D_1 , S , O_{2-3} , O_1 , C_3 .

3. Выводы. Анализ вычисленных карт распределения скоростей горизонтальных палеосмещений, приведенных в табл. 1, показывает следующее.

Скорости горизонтальных смещений относительно малы и в целом соответствуют масштабу современных вертикальных движений земной коры на Урале.

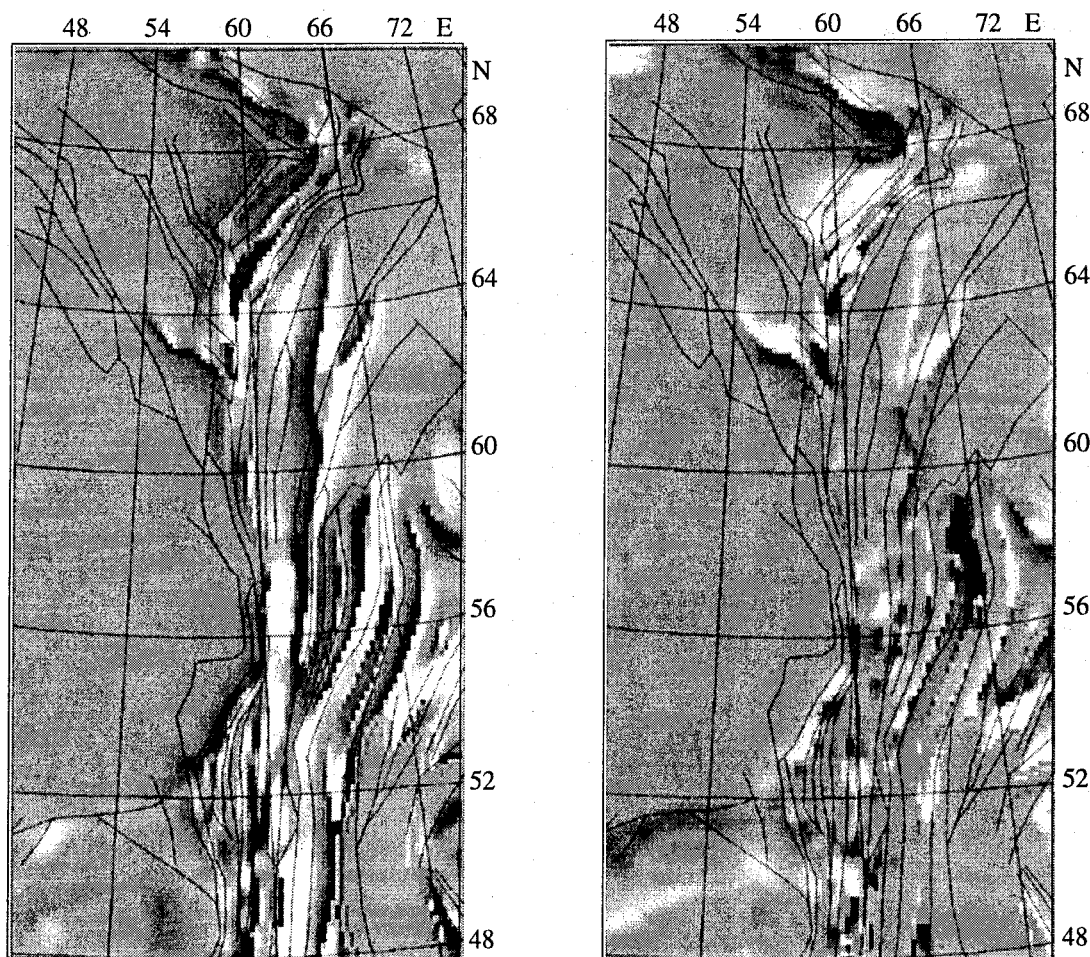


Рис. 3. Сопоставление областей растяжения/сжатия D_{2-3} с тектоническими нарушениями данного геологического периода. Слева показана тоновая карта скорости субширотных скоростей смещения, справа – субмеридиональных.

В геологическом времени существуют изменяющиеся локализованные субширотные и субмеридиональные зоны, в которых векторы горизонтальных скоростей палеосмещений направлены взаимно противоположно. Такие зоны интерпретируются как области наиболее сильного растяжения/сжатия земной коры.

Области растяжения/сжатия в геологические периоды на Урале сосуществовали одновременно в относительно сближенных, различно пространственно сочетающихся зонах. При этом одновременно для относительно больших блоков интегральные смещения могут быть нулевыми.

Областям растяжения/сжатия почти однозначно соответствуют тектонические нарушения, возникшие в данные геологические периоды.

Тектонические нарушения геологических периодов могут быть объективно классифицированы по распределению характеристик смещений u , w .

Метод может быть применен для анализа современных и новейших движений земной коры. Индикаторами современных горизонтальных пе-

ремещений и деформаций при этом могут служить данные высокоточных нивелировок дневной поверхности, выполненные по отдельным профилям и на геодинамических полигонах на протяжении нескольких лет и десятилетий. Устойчивые тенденции горизонтальных движений могут быть выявлены по совокупности карт неоген-четвертичных поднятий, амплитуд новейшей тектоники в совокупности с картами гипсометрии современного рельефа местности.

Выражаю признательность Российскому фонду фундаментальных исследований за моральную и финансовую поддержку проекта 94-07-16135в, в рамках которого выполнена данная работа; фонду INTAS, оказавшему финансовую помощь в рамках Europrobe's S. Urals Project, и Б.П. Рыжему за предоставление комплекта карт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплект палеотектонических карт СССР. Масштаб 1 : 5 000 000 / Под ред. Т.Н. Спичарского. Л., 1972–1984.

2. Белоусов В.В. Основы геотектоники. М.: Недра, 1989. 382 с.
3. Косыгин Ю.А. Тектоника. М.: Недра, 1988. 462 с.
4. Овчаренко А.В. // ДАН. 1995. Т. 342. № 5. С. 675–679.
5. Овчаренко А.В. // ДАН. 1995. Т. 342. № 4. С. 537–539.
6. Овчаренко А.В. В сб.: Информационные системы в науке. М.: РФФИ-Фазис, 1995. С. 88–91.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
8. Хорн Б.К.П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989. 486 с.