

# Геометрические характеристики новейших тектонических движений земной коры Северной Евразии

А. Ф. Грачев, Ш. А. Мухамедиев, В. А. Николаев

Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта

**Аннотация.** В работе на основе данных о новейших вертикальных движениях земной коры (ВДЗК), отображенных на карте новейшей тектоники в масштабе 1:5000000 [Карта..., 1996], исследованы геометрические характеристики новейших деформаций поверхности литосферы Северной Евразии. Построены карты модуля градиента амплитуд, ориентации наклонов, максимальной, минимальной, средней и гауссовой кривизн, а также интенсивности кривизны ВДЗК. Проанализированы кинематические особенности ВДЗК для основных геоструктурных областей, а также в пределах них для отдельных регионов. На основе методов многомерной статистики выявлены корреляции между различными геометрическими характеристиками как для выделенных на карте геоструктурных областей, так и отдельных регионов. Анализ корреляций и геометрическая интерпретация полученных результатов основаны на типизации поверхностей, принятой в дифференциальной геометрии, и на проведенном в работе исследовании градиентов и кривизн для некоторых модельных поверхностей. Выдвинуто предположение о том, что полученные результаты открывают возможность провести классификацию новейших структурных форм не просто по признаку активности ВДЗК, а по комплексу гораздо более тонких признаков – величии тех или иных характеристик кривизны и корреляционных зависимостей между ними. Определены стандартные отклонения и коэффициенты вариации рассчитываемых величин относительно средних значений внутри каждой геоструктурной области и для отдельных регионов. Показано, что средняя по площади величина интенсивности кривизны, вводимая как модуль полуразности главных кривизн и коррелирующая (для некоторых типов регионов) с модулем градиента и модулями главных кривизн, определяется с наименьшим коэффициентом вариации по сравнению с любыми другими геометрическими характеристиками. На основе этого и на основе выявляемого кинематического смысла интенсивности кривизны делается вывод о том, что средние по площади значения интенсивности кривизны могут рассматриваться в качестве скалярной характеристики, наиболее надежно и адекватно определяющей особенности деформирования большинства регионов. Обсуждаются вопросы применимости полученных результатов к решению проблемы определения полей тектонических напряжений. Работа снабжена приложениями, в которых приводятся определения используемых величин и некоторые основные количественные соотношения между ними.

## 1. Введение

Данные о вертикальных движениях земной коры (ВДЗК) за новейший этап развития позволяют сделать важные заключения о тектонических особен-

ностях развития исследуемого региона. На основе этих данных недавно в масштабе 1:5000000 была построена карта новейшей тектоники такой обширной территории как Северная Евразия [Грачев, 1996; Карта..., 1996; Новейшая тектоника..., 1998]. На этой карте, отражающей вертикальные движения земной коры за новейший тектонический этап, впервые в единой легенде показана новейшая структура материка и прилегающих акваторий. Карта дает представление об интенсивности и направленности ВДЗК (за неоген–четвертичное время) и об их рас-

©2000 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE00034.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 15 апреля 2000.  
URL: <http://eos.wdcb.ru/rjes/v03/RJE00034/RJE00034.htm>

пределении на территории Северной Евразии. На ней показаны материковые и океанические платформы, континентальные и океанические рифты, орогенические области, впадины глубоководных морей и области предрифтового режима, островные дуги, глубоководные желоба и задуговые бассейны [Грачев, 1996].

Данные о новейших тектонических движениях, представленные на карте, открывают возможность определить ряд геометрических характеристик деформирования литосферы за изучаемый этап развития, чему и посвящена настоящая работа: предложены и реализованы алгоритмы расчета величин деформации по данным о новейших ВДЭК, построены карты-схемы характеристик новейших деформаций земной поверхности Северной Евразии и проанализированы закономерности деформирования в областях с различным характером тектонического развития. Кратко обсуждаются принципиальные возможности приложения полученных полей деформации к расчету напряженного состояния.

Для иллюстрации типичного поведения изучаемых геометрических характеристик, в работе рассмотрены некоторые модельные примеры поверхностей, для которых рассчитаны градиенты и кривизны. Кроме того, работа дополнена двумя приложениями, в которых приведены используемые определения и количественные соотношения.

## 2. Состояние вопроса

Для анализа напряженно-деформированного состояния литосферы интерес представляют не сами амплитуды ВДЭК, а характеристики их относительного изменения в пространстве. К таким характеристикам относятся величины модуля градиента амплитуд ВДЭК и кривизны поверхности, созданной ВДЭК.

Анализ средних градиентов скорости вертикальных тектонических движений ранее использовался для оценки интенсивности новейших тектонических движений [Гзовский, 1963; Гзовский и др., 1959; Николаев, Шенкарева, 1967] и напряженного состояния коры [Гзовский, 1967]. Пространственное распределение отдельных характеристик кривизны поверхности в целях тектонического и геодинамического анализа стало изучаться значительно позднее [Грачев и др., 1988, 1989, 1990, 1993; Ekman, 1985; Lisle, 1994; Nothard et al., 1996 и др.].

Одной из побудительных причин для исследования характеристик относительного изменения амплитуд ВДЭК явился поиск корреляции между тектоническими движениями и сейсмичностью. Проблема использования данных о ВДЭК для сейсмиче-

ского районирования и прогноза землетрясений возникла с момента появления первых достаточно надежных наблюдательных данных. В течение десятилетий для относительно больших площадей привлекались преимущественно данные о скоростях современных ВДЭК и иногда о пространственных градиентах этих скоростей [Мещеряков, 1963]. В работах [Грачев и др., 1988, 1989, 1990, 1993; Ekman, 1985, 1989] изгибные деформации тектонических движений изучались на основе анализа отдельных скалярных характеристик кривизны – средней или гауссовой кривизны.

В дальнейшем усилия были направлены на более полный учет кинематики ВДЭК, что привело к рассмотрению тензорных характеристик изгибаемой при ВДЭК поверхности. Под воздействием пространственно-неоднородных амплитуд ВДЭК  $w$  локальная кривизна земной поверхности в каждой точке с координатами  $x, y$ , вообще говоря, изменяется. При относительно небольших градиентах ВДЭК, что справедливо, например, для платформенных областей, такие изменения вполне адекватно описываются математически так называемым тензором кривизны-кручения  $\nabla \otimes \nabla w$ . Это симметричный двумерный тензор второго ранга, матрица компонент которого составлена из вторых пространственных производных амплитуд ВДЭК  $w(x, y)$ . Собственными значениями тензора кривизны-кручения в линейном приближении являются главные кривизны  $K_{\max}(x, y), K_{\min}(x, y)$  поля вертикальных движений, т.е. те главные кривизны, которые наблюдались бы у первоначально плоской поверхности под воздействием данного поля ВДЭК. Приближенные характеристики современной скорости изменения кривизны и соответствующие скорости за новейший этап развития на основе анализа тензора кривизны-кручения были рассчитаны и закартированы для Восточно-Европейской платформы (ВЕП) в работах [Грачев и др., 1995а, 1995б].

Определение деформационных характеристик, вызванных ВДЭК, представляет интерес для многих геодинамических и сейсмологических приложений: для определения напряженного состояния литосферы, для выявления закономерностей пространственного распределения сейсмичности, для проблемы сокращения земной коры и т.д. Кривизны изгибаемой литосферы выгодно отличаются от амплитуд и градиентов ВДЭК тем, что они инвариантны по отношению к движению изучаемого блока литосферы как жесткого целого, и поэтому, в частности, могут быть связаны в рамках корректных геодинамических моделей с действующими тектоническими напряжениями.

Если для деформирования литосферы принять модель изгиба тонкой пластины, то на формирова-

ние напряженного состояния оказывают влияние все компоненты тензора  $\nabla \otimes \nabla w$ . Они определяют тензорные характеристики изгибных деформаций и, следовательно, отражают региональные и локальные искажения глобального поля напряжений в литосфере, передающегося от краев литосферных плит. Так, например, в рамках модели малых упругих изгибных деформаций изотропной литосферы тензор кривизны-кручения соосен с тензором изгибающих моментов, средняя кривизна  $K_{\text{mean}}$  связана с возмущениями средних в плоскости литосферы напряжений, а интенсивность изгибных деформаций, определяемая как  $h(K_{\text{max}} - K_{\text{min}})/2$  ( $h$  – мощность литосферы), влияет на изменение интенсивности сдвиговых деформаций и, в конечном счете, на возмущение максимального касательного напряжения [Мухамедиев, 1992]. Для моделей изгиба, учитывающих неупругость процессов деформирования, анизотропию и слоистое строение литосферы, характер взаимосвязи кинематики деформирования и напряжений усложняется, но в качественном отношении принципиально не изменяется.

Отмеченные особенности инвариантов тензора  $\nabla \otimes \nabla w$  позволили [Грачев и др., 1996], рассчитав пространственное распределение интенсивности изгибных деформаций, оценить для Восточно-Европейской платформы скорость изменения интенсивности горизонтальных сдвиговых деформаций и сравнить ее со скоростью накопления сейсмического момента землетрясений. На этой основе была построена расчетная карта-схема максимально возможных магнитуд землетрясений  $M_{\text{max}}$ . Результаты определения лишь средней кривизны  $K = (K_{\text{max}} + K_{\text{min}})/2$  изгибаемой поверхности оказались бы недостаточными в рамках отмеченного подхода для решения проблемы связи кривизн с особенностями пространственного распределения сейсмичности, а, следовательно, и напряженного состояния литосферы.

### 3. Постановка проблемы и методика расчетов

В настоящей работе градиенты ВДЗК и характеристики кривизны были рассчитаны для всей территории Северной Евразии. Расчеты проводились на основе оцифрованного материала по карте новейшей тектоники Северной Евразии [Карта..., 1996]. Вследствие того, что на исследуемой территории значения градиентов ВДЗК меняются в широких пределах, характеристики кривизн вычислялись по точным формулам (см. Приложение 1), а не на основе собственных значений линейризованного тензора  $\nabla \otimes \nabla w$ , как это ранее было сделано для Вос-

точно-Европейской платформы [Грачев и др., 1995а, 1995b].

Анализ особенностей деформирования литосферы Северной Евразии проведен для основных геоструктурных областей, показанных на карте новейшей тектоники [Карта..., 1996]. К числу этих областей относятся:

- платформы,
- области предрифтового режима,
- впадины глубоководных морей,
- области материкового рифтогенеза,
- островные дуги, глубоководные желоба и задуговые бассейны,
- орогенические области,
- океанические платформы,
- океанические рифтовые зоны.

Для более детальной характеристики и выявления региональных различий в пределах этих областей в настоящей работе были выделены 42 региона (рис. 1, табл. 1).

Предполагая донеогеновую поверхность изучаемой территории достаточно выровненной, назовем поверхностью ВДЗК ту поверхность  $z = w(x, y)$ , абсолютные отметки  $z$  которой совпадают с амплитудами  $w$  новейших ВДЗК в соответствующих географических точках с координатами  $x, y$ . По данным об амплитудах, заданных в узлах сетки с шагом  $20'$  по широте и  $30'$  по долготе, для территории Северной Евразии были рассчитаны и построены карты-схемы различных геометрических характеристик этой поверхности: модуля градиента  $Grad(x, y)$ , максимальной  $K_{\text{max}}(x, y)$  и минимальной  $K_{\text{min}}(x, y)$  главных кривизн, средней кривизны  $K_{\text{mean}}(x, y) = (K_{\text{max}} + K_{\text{min}})/2$  и интенсивности кривизны  $K_{\text{int}}(x, y) = (K_{\text{max}} - K_{\text{min}})/2$ , а также гауссовой (полной) кривизны  $H(x, y) = K_{\text{max}}K_{\text{min}}$  (см. ниже раздел 5). Главные кривизны вычислялись по формулам (П1.11), (П1.13), приведенным в Приложении 1. В силу локальности рассчитываемых характеристик в каждой точке географические координаты заменялись на декартовы с осью  $x$ , направленной на восток, и осью  $y$ , направленной на север. Были использованы следующие формулы аппроксимации частных производных [Турчак, 1987]:

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{ij} = \frac{w_{i+1,j+1} - w_{i-1,j+1} + w_{i+1,j-1} - w_{i-1,j-1}}{4h_1}$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_{ij} = \frac{w_{i+1,j+1} - w_{i+1,j-1} + w_{i-1,j+1} - w_{i-1,j-1}}{4h_2}$$

$$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)_{ij} = \frac{w_{i+1,j+1} - w_{i+1,j-1} - w_{i-1,j+1} + w_{i-1,j-1}}{4h_1 h_2}$$

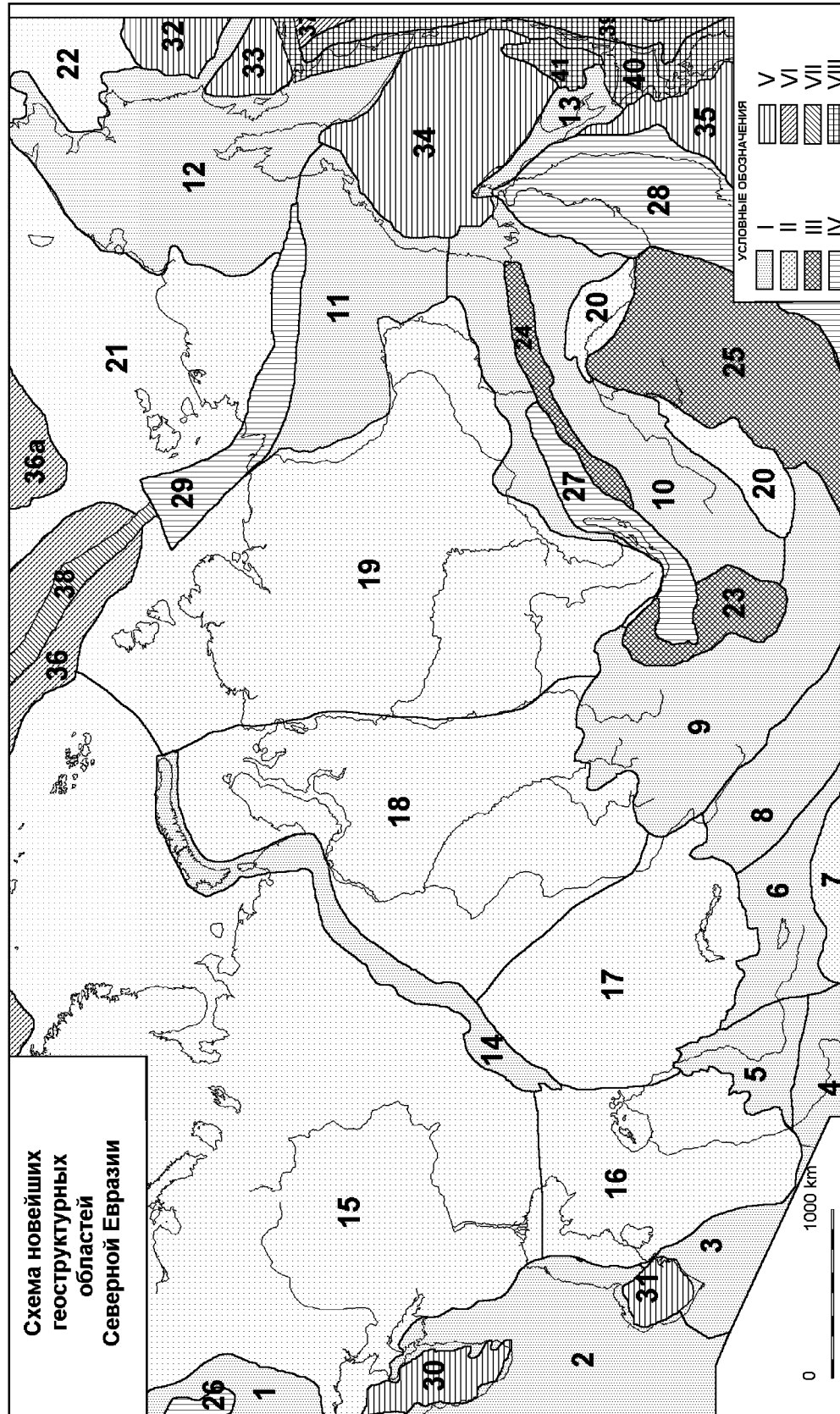
**Таблица 1.** Средние значения и дисперсия амплитуд, градиентов, максимальной, минимальной и средней кривизны и интенсивности кривизн новейших тектонических движений Северной Евразии

	Амплитуда		Градиент	Максимальная кривизна		Минимальная кривизна		Средняя кривизна		Интенсивность кривизн		
	$w$ , km	$\sigma$		$Grad$ , km/km	$\sigma$	$K_{max}$ , 1/km	$\sigma$	$K_{min}$ , 1/km	$\sigma$	$K_{mean}$ , 1/km	$\sigma$	$K_{int}$ , 1/km
<b>Орогенические области в целом</b>	<b>0,57</b>	<b>1,17</b>	<b>0,0100</b>	<b>1,2E-02</b>	<b>2,0E-04</b>	<b>4,1E-04</b>	<b>-2,3E-04</b>	<b>4,2E-04</b>	<b>1,2E-05</b>	<b>3,2E-04</b>	<b>2,0E-04</b>	<b>2,2E-04</b>
Карпаты	0,01	0,75	0,0110	7,7E-03	3,0E-04	4,6E-04	-3,2E-04	4,7E-04	-9,0E-08	4,0E-04	3,1E-04	2,0E-04
Кавказ	0,70	1,95	0,0210	2,0E-02	3,6E-04	6,3E-04	-4,3E-04	6,4E-04	-3,5E-05	5,0E-04	4,0E-04	2,2E-04
Копетдаг	0,29	1,84	0,0250	2,2E-02	4,1E-04	5,3E-04	-5,2E-04	7,6E-04	-5,5E-05	5,0E-04	5,7E-04	2,3E-04
Южный Тянь-Шань	1,27	2,01	0,0330	2,2E-02	6,3E-04	1,1E-03	-8,4E-04	8,5E-04	-1,0E-04	8,0E-04	7,0E-04	4,0E-04
Памир-Алай	2,54	2,50	0,0270	2,0E-02	5,4E-04	8,0E-04	-5,5E-04	8,4E-04	-7,7E-06	7,0E-04	5,5E-04	4,0E-04
Северный Тянь-Шань	1,57	1,43	0,0250	1,6E-02	5,7E-04	9,2E-04	-7,3E-04	8,9E-04	-8,0E-05	7,6E-04	6,5E-04	4,1E-04
Джунгария	0,36	1,09	0,0134	1,2E-02	3,0E-04	5,2E-04	-2,7E-04	4,3E-04	1,3E-05	4,0E-04	3,0E-04	2,1E-04
Алтае-Саяно-Монгольская	1,13	0,61	0,0067	4,8E-03	1,6E-04	2,4E-04	-1,7E-04	2,5E-04	-2,5E-06	2,0E-04	1,7E-04	1,2E-04
Охотско-Монгольская	0,66	0,35	0,0036	3,3E-03	7,9E-05	1,3E-04	-8,8E-05	1,4E-04	-4,5E-06	1,0E-04	9,0E-05	6,0E-05
Верхояно-Кольмская	0,92	0,51	0,0075	5,5E-03	1,4E-04	2,0E-04	-1,9E-04	2,5E-04	-2,3E-05	1,9E-04	1,9E-04	1,1E-04
Чукотская	0,25	0,61	0,0069	6,3E-03	1,6E-04	3,0E-04	-1,8E-04	2,9E-04	-6,5E-06	2,0E-04	1,5E-04	1,3E-04
Сахалинская	-0,55	0,64	0,0120	7,0E-03	3,6E-04	5,0E-04	-3,7E-04	4,6E-04	-2,4E-06	4,0E-04	3,5E-04	1,2E-04
Урал	0,32	0,29	0,0056	4,2E-03	1,0E-04	1,5E-04	-1,6E-04	2,3E-04	-3,2E-05	1,6E-04	1,3E-04	1,0E-04
Таримский бассейн	-1,83	1,82	0,0240	2,0E-02	4,7E-04	7,0E-04	-2,9E-04	7,0E-04	8,6E-05	5,4E-04	3,8E-04	3,2E-04
<b>Островные дуги</b>	<b>-0,30</b>	<b>0,73</b>	<b>0,0084</b>	<b>4,0E-03</b>	<b>1,8E-04</b>	<b>2,6E-04</b>	<b>-2,0E-04</b>	<b>2,4E-04</b>	<b>-1,2E-05</b>	<b>2,2E-04</b>	<b>1,9E-04</b>	<b>1,1E-04</b>
Глубоководные желоба	-0,42	0,52	0,0080	5,6E-03	2,7E-04	3,4E-04	-1,9E-04	2,8E-04	4,0E-05	2,6E-04	2,3E-04	1,2E-04
Островные дуги	0,03	0,45	0,0078	4,3E-03	1,2E-04	2,0E-04	-2,3E-04	2,2E-04	-5,7E-05	1,8E-04	1,7E-04	1,0E-04
Задугтовый бассейн	-1,60	0,48	0,0110	5,8E-03	3,0E-04	2,7E-04	-9,2E-05	2,3E-04	1,0E-04	2,2E-04	2,0E-04	1,1E-04
<b>Глубоководные моря</b>	<b>-1,29</b>	<b>1,47</b>	<b>0,0090</b>	<b>1,0E-03</b>	<b>2,1E-04</b>	<b>3,3E-04</b>	<b>-1,3E-04</b>	<b>2,7E-04</b>	<b>4,0E-05</b>	<b>2,0E-04</b>	<b>1,7E-04</b>	<b>1,6E-04</b>
Южно-Каспийская впадина	-6,96	2,31	0,0340	2,1E-02	7,7E-04	6,2E-04	-1,8E-05	3,2E-04	3,7E-04	4,0E-04	3,9E-04	2,0E-04
Черноморская впадина	-0,52	0,22	0,0043	4,5E-03	1,4E-04	1,8E-04	-2,4E-05	8,4E-05	5,8E-05	1,0E-04	8,0E-05	7,0E-05
Беринговоморская впадина	-0,74	0,28	0,0047	3,5E-03	1,1E-04	1,8E-04	-8,8E-05	1,3E-04	1,0E-05	1,0E-04	1,0E-04	7,0E-05
Командорская котловина	-1,10	0,61	0,0120	9,0E-03	3,3E-04	3,7E-04	-2,0E-04	3,5E-04	6,2E-05	3,0E-04	2,7E-04	1,7E-04
Охотское море	-1,15	0,78	0,0089	8,0E-03	1,9E-04	3,2E-04	-1,5E-04	3,0E-04	2,0E-05	2,4E-04	1,7E-04	1,5E-04
Японское море	-1,13	0,69	0,0090	4,4E-03	2,0E-04	2,0E-04	-1,4E-04	2,0E-04	2,4E-05	1,8E-04	1,6E-04	1,1E-04



Таблица 1. Продолжение

	Амплитуда		Градиент		Максимальная кривизна		Минимальная кривизна		Средняя кривизна		Интенсивность кривизн	
	$w$ , km	$\sigma$	$Grad$ , km/km	$\sigma$	$K_{max}$ , 1/km	$\sigma$	$K_{min}$ , 1/km	$\sigma$	$K_{mean}$ , 1/km	$\sigma$	$K_{int}$ , 1/km	$\sigma$
<b>Платформы</b>	<b>0,01</b>	<b>0,31</b>	<b>0,0280</b>	<b>6,9E-03</b>	<b>8,2E-05</b>	<b>4,3E-04</b>	<b>-1,0E-04</b>	<b>6,0E-04</b>	<b>-1,1E-05</b>	<b>3,6E-04</b>	<b>9,0E-05</b>	<b>3,0E-04</b>
Восточно-Европейская	-0,04	0,24	0,0025	5,2E-03	6,9E-05	2,9E-04	-8,5E-05	3,8E-04	-7,6E-06	2,0E-04	8,0E-05	2,4E-04
Западно-Сибирская плита	0,06	0,12	0,0010	9,7E-04	2,7E-05	5,0E-05	-1,9E-05	3,8E-05	3,8E-06	3,0E-05	2,3E-05	2,5E-05
Казахский щит	0,32	0,23	0,0020	2,1E-03	3,5E-05	7,9E-05	-3,3E-05	7,7E-05	1,2E-06	5,6E-05	3,4E-05	4,1E-05
Туранская плита	-0,03	0,38	0,0045	5,5E-03	7,6E-05	1,5E-04	-9,2E-05	2,1E-04	-7,6E-06	1,4E-04	8,0E-05	1,0E-04
Сибирская платформа	0,19	0,28	0,0028	5,8E-03	6,9E-05	2,6E-04	-9,4E-05	3,8E-04	-1,3E-05	2,2E-04	8,0E-05	2,1E-04
Зейско-Бурейская	0,49	0,27	0,0018	1,1E-03	4,2E-05	4,9E-05	-3,6E-05	5,5E-05	3,0E-06	4,0E-05	3,9E-05	2,3E-05
и Гобийско-Хинганская												
Восточно-Сибирская	-0,24	0,30	0,0050	1,3E-02	2,0E-04	9,4E-04	-2,7E-04	1,3E-03	-4,0E-05	8,0E-04	2,3E-04	6,0E-04
Чукотская плита												
Берингова плита	-0,62	0,49	0,0062	5,1E-03	1,5E-04	2,0E-04	-9,0E-05	1,6E-04	3,0E-05	1,5E-04	1,2E-04	8,0E-05
<b>Области материкового</b>	<b>0,14</b>	<b>0,80</b>	<b>0,0080</b>	<b>9,0E-03</b>	<b>2,3E-04</b>	<b>5,0E-04</b>	<b>-2,1E-04</b>	<b>4,0E-04</b>	<b>8,6E-06</b>	<b>3,4E-04</b>	<b>2,0E-04</b>	<b>2,7E-04</b>
<b>рифтогенеза</b>												
Байкальский рифт	0,43	1,38	0,0160	1,6E-02	6,0E-04	1,0E-03	-5,0E-04	7,6E-04	3,0E-05	7,0E-04	6,0E-04	4,0E-04
Момский рифт	0,11	0,53	0,0054	6,7E-03	2,0E-04	4,0E-04	-1,7E-04	3,2E-04	4,6E-06	2,6E-04	1,8E-04	2,0E-04
Восточно-Азиатский рифт	0,09	0,67	0,0074	5,3E-03	1,2E-04	2,0E-04	-1,3E-04	1,5E-04	-4,0E-07	1,5E-04	1,3E-04	7,0E-05
Паннонский рифт	-0,50	0,73	0,0126	5,7E-03	4,0E-04	3,8E-04	-1,5E-04	3,2E-04	1,3E-04	3,0E-04	2,8E-04	1,2E-04
<b>Области предрифтового</b>	<b>0,67</b>	<b>0,57</b>	<b>0,0038</b>	<b>3,3E-03</b>	<b>7,0E-05</b>	<b>1,1E-04</b>	<b>-8,6E-05</b>	<b>1,4E-04</b>	<b>-8,7E-06</b>	<b>1,0E-04</b>	<b>7,5E-05</b>	<b>6,0E-05</b>
<b>режима</b>												
С-В Китайская предрифтовая	0,43	0,38	0,0030	2,7E-03	5,0E-05	7,6E-05	-6,5E-05	1,1E-04	7,4E-06	7,4E-05	6,0E-05	4,0E-05
Витимо-Становая	0,81	0,25	0,0034	2,8E-03	6,3E-05	1,1E-04	-1,0E-04	1,5E-04	-2,0E-05	1,0E-04	8,0E-05	5,0E-05
предрифтовая												
Восточно-Саянская	1,55	0,47	0,0066	4,2E-03	1,5E-04	2,0E-04	-1,6E-04	2,1E-04	-6,0E-06	1,7E-04	1,6E-04	1,0E-04
предрифтовая												
<b>Океанические платформы</b>												
Амеразийская плита	-2,70	1,63	0,0270	2,5E-02	1,0E-03	1,7E-03	-5,4E-04	1,3E-03	2,5E-04	1,2E-03	8,0E-04	7,0E-04
Евразийская плита	-1,73	1,04	0,0255	2,0E-02	1,3E-03	2,5E-03	-6,4E-04	1,8E-03	3,1E-04	1,6E-03	9,5E-04	1,0E-03
Тихоокеанская платформа	-0,82	0,41	0,0080	4,5E-03	2,4E-04	2,4E-04	-1,6E-04	2,6E-04	3,6E-05	2,0E-04	2,0E-04	9,0E-05
<b>Океанические рифты</b>												
Океанические рифтовые зоны	0,0004	0,46	0,0166	1,8E-02	8,0E-04	2,2E-03	-1,3E-03	2,3E-03	-2,4E-04	1,7E-03	1,1E-03	2,9E-03



**Рис. 1.** Схема новейших геоструктурных областей Северной Евразии: I – орогенетические области: 1–Карпаты, 2–Кавказ, 3–Копетдаг, 4–Памир-Алай, 5–Южный Тянь-Шань, 6–Северный Тянь-Шань, 7–Таримский бассейн, 8–Джунгария, 9–Алтае-Сааяно-Монгольская, 10–Монголо-Охотская, 11–Верхояно-Кольмская, 12–Чукотская, 13–Сахалинская, 14–Урал; II – платформенные области: 15–Восточно-Европейская, 16–Туранская, 17–Казахский щит, 18–Западно-Сибирская плита, 19–Сибирская плита, 20–Зейско-Буреинская и Гобийско-Хинганская, 21–Восточно-Сибирско-Чукотская плита, 22–Берингова плита; III – области предрифтового режима: 23–Восточно-Саянский, 24–Витимо-Становой, 25–Северо-восточная Китайская; IV – материковые рифты: 26–Паннонский, 27–Байкальский, 28–Восточно-Азиатский, 29–Момский; V – впадины глыбоводных морей: 30–Черноморская, 31–Южно-Каспийская, 32–Беринговоморская, 33–Командорская котловина, 34–Охотская, 35–Японская; VI – океанические платформенные рифты: 36–Евразийская плита, 36а–Амеразийская плита, 37–Тихоокеанская платформа; VII – океанические рифты: 38–Срединно-океанический хребет Гакеля; VIII – островные дуги: 39–Курило-Камчатский глыбоводный желоб, 40–островная дуга, 41–задуговой бассейн.

$$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)_{ij} = \frac{1}{3h_1^2} \left( w_{i+1,j+1} - 2w_{i,j+1} + w_{i-1,j+1} + w_{i+1,j} - 2w_{i,j} + w_{i-1,j} + w_{i+1,j-1} - 2w_{i,j-1} + w_{i-1,j-1} \right)$$

$$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)_{ij} = \frac{1}{3h_2^2} \left( w_{i+1,j+1} - 2w_{i+1,j} + w_{i+1,j-1} + w_{i,j+1} - 2w_{i,j} + w_{i,j-1} + w_{i-1,j+1} - 2w_{i-1,j} + w_{i-1,j-1} \right).$$

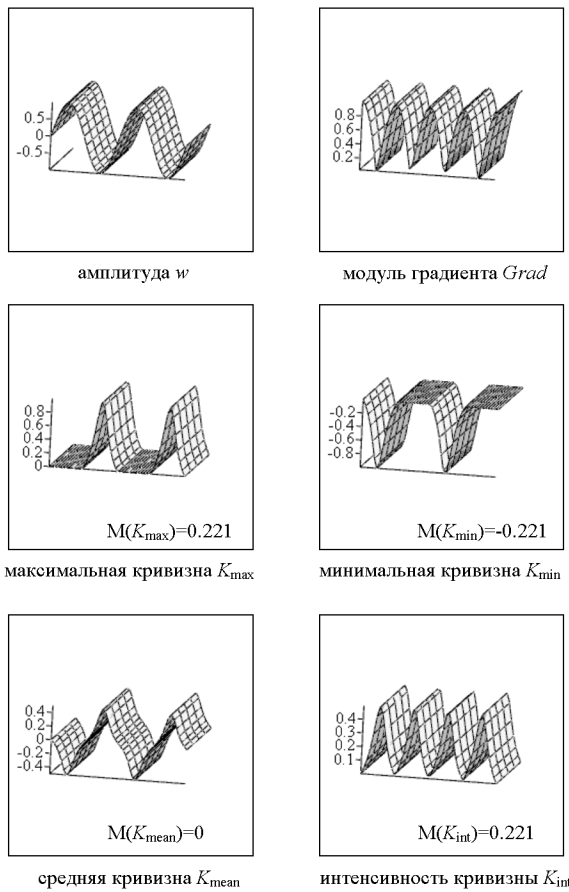
Значения амплитуды  $w$ , снабженные индексами  $i, j$ , вычисляются в узле  $(x_i, y_j)$ .

#### 4. Примеры геометрических характеристик для модельных поверхностей

Для иллюстрации качественного поведения изучаемых геометрических характеристик поверхности в различных ситуациях рассмотрим три модельных примера поверхностей, заданных в декартовых координатах  $x, y, z$  уравнением  $z = w(x, y)$ . В этих примерах  $w(x, y)$  является аналитической функцией своих координат. В том или ином виде рассматриваемые ситуации встречаются при изучении геометрических характеристик поверхности ВДЗК на территории Северной Евразии.

В первом примере, приведенном на рис. 2, уравнение поверхности имеет вид  $w(x, y) = \sin x$ . Такой тип поверхности может моделировать совокупность чередующихся линейных поднятий и прогибов, вытянутых в горизонтальном направлении  $y$ . Заметим, что в рассматриваемом примере, как и в последующих двух, отношение амплитуды  $w$  к характерному линейному горизонтальному размеру существенно превышает соответствующее отношение для реальных амплитуд ВДЗК. Это сделано для того, чтобы выделить общие тенденции в поведении геометрических характеристик для разных типов поверхностей – тенденции, не связанные жестким образом с пространственными масштабами тектонических движений.

Поверхность  $w = \sin x$  является цилиндрической с образующей, параллельной оси  $y$ . В этом направлении одна из главных кривизн равна нулю и, следовательно, равна нулю гауссова кривизна  $H$ . Все точки этой поверхности являются параболическими, а сама поверхность изометрично (без изменения длины любой линии) может быть развернута



**Рис. 2.** Модуль градиента и характеристики кривизны поверхности, заданной уравнением  $w = \sin x$  при  $|x| \leq 2\pi$ . Все точки поверхности параболы.

на плоскость (см. Приложение 2).<sup>1</sup> Качественные связи между приведенными на рис. 2 графиками геометрических характеристик усматриваются непосредственно. Количественно эти связи отражаются коэффициентами корреляции (табл. 2). Между амплитудой  $w$  и средней кривизной  $K_{\text{mean}}$  существует отрицательная корреляция – увеличению значений одной функции в том же месте и в том же направлении соответствует уменьшение значений другой. В данном конкретном случае коэффициент корреляции  $r$  равен  $-0,97$ , а при уменьшении амплитуды

<sup>1</sup> Не следует думать, что цилиндрическая поверхность является единственной поверхностью, обладающей отмеченными свойствами. К тому же классу линейчатых поверхностей относится, например, коническая. Для нее также характерно выполнение условия  $H=0$  и она также изометрично разворачивается на плоскость [Погорелов, 1969]. В структурной геологии конической поверхностью можно моделировать, в частности, центриклинали синклинальных складок или периклинали антиклинальных складок.

**Таблица 2.** Корреляционная матрица для модельного примера параболической поверхности, приведенного на рис. 2

	$w$	$Grad$	$K_{\text{max}}$	$K_{\text{min}}$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$
$w$	1	0	$-0,832$	$-0,832$	$-0,97$	0
$Grad$	0	1	$-0,511$	$0,511$	0	$-0,996$
$K_{\text{max}}$	$-0,832$	$-0,511$	1	$0,472$	$0,858$	$0,514$
$K_{\text{min}}$	$-0,832$	$0,511$	$0,472$	1	$0,858$	$-0,514$
$K_{\text{mean}}$	$-0,97$	0	$0,858$	$0,858$	1	0
$K_{\text{int}}$	0	$-0,996$	$0,514$	$-0,514$	0	1

синусоидальной волны этот коэффициент стремится к  $-1$ . Отрицательная корреляция наблюдается и между модулем градиента  $Grad$  и интенсивностью кривизны  $K_{\text{int}}$  ( $r = -0,996$ ), однако эта корреляция превращается в положительную при сдвиге графиков на  $\pi/2$  по оси  $x$ . При сдвиге по  $x$  на  $\pi$  отрицательная корреляция возникает для главных кривизн  $K_{\text{max}}$  и  $K_{\text{min}}$ , которые в исходном состоянии коррелируют слабо ( $r=0,472$ ). Заметим, что значения средней кривизны (по модулю) и значения интенсивности кривизны изменяются приблизительно в одинаковом интервале. Однако среднее по области значение  $M(K_{\text{mean}})$  средней кривизны равно 0, в то время как  $M(K_{\text{int}})=0,221$ . Последняя величина совпадает со средним значением для максимальной кривизны и взятому с обратным знаком среднему значению – для минимальной. Что касается средней кривизны, то выборка значений этой величины будет характеризоваться чрезвычайно большим коэффициентом вариации  $d = \sigma/|M|$ , равным отношению стандартного отклонения  $\sigma(K_{\text{mean}})$  к абсолютной величине среднего значения  $M(K_{\text{mean}})$ .

Рассмотрим геометрические характеристики поверхности, заданной уравнением  $w(x, y) = -(1 - x^2 - y^2)/2$  (рис. 3). Все точки этой поверхности являются эллиптическими, т.к. главные кривизны имеют один и тот же знак (в данном случае – положительный). Поверхность представляет собой изометричную впадину. Центральная точка поверхности является омбилической (шаровой), в ней  $K_{\text{max}} = K_{\text{min}}$  и любое направление является главным. Представленные графики геометрических характеристик качественно, а данные табл. 3 – количественно демонстрируют четкую положительную корреляцию между главными кривизнами и средней кривизной, причем все три графика этих величин близки между собой не только по форме, но и по величине. В частности, коэффициент корреляции между  $K_{\text{max}}$  и  $K_{\text{min}}$  достигает значения  $r=0,996$ , а средние значения  $M(K_{\text{mean}})$ ,  $M(K_{\text{max}})$  и  $M(K_{\text{min}})$  различаются несущественно. В то время между этими характеристиками, с одной сто-

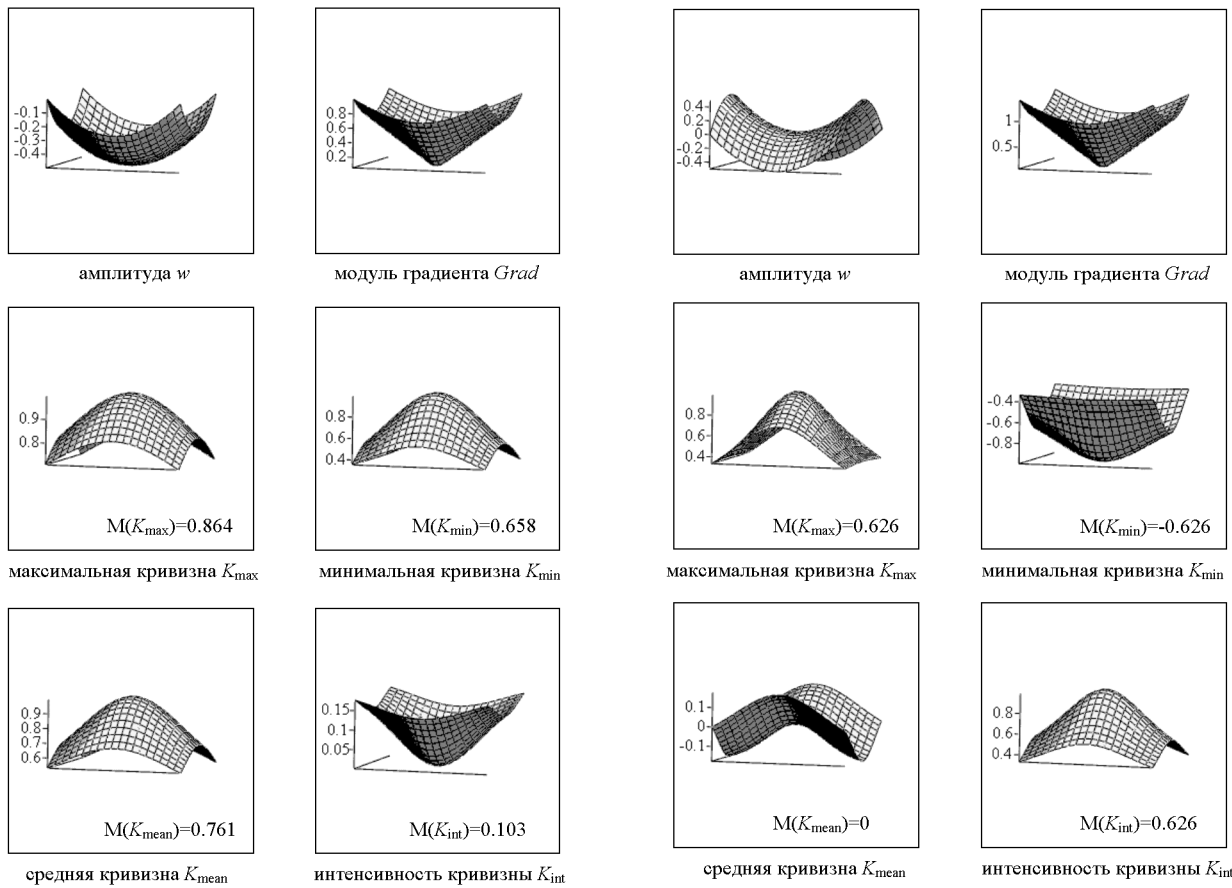
**Таблица 3.** Корреляционная матрица для модельного примера эллиптической поверхности, приведенного на рис. 3

	$w$	$Grad$	$K_{max}$	$K_{min}$	$K_{mean}$	$K_{int}$	$H$
$w$	1	0,975	-0,991	-0,975	-0,981	0,957	-0,965
$Grad$	0,975	1	-0,994	-0,998	-0,998	0,995	-0,997
$K_{max}$	-0,991	-0,994	1	0,996	0,998	-0,998	0,992
$K_{min}$	-0,975	-0,998	0,996	1	1	-0,998	0,999
$K_{mean}$	-0,981	-0,998	0,998	1	1	-0,995	0,998
$K_{int}$	0,957	0,995	-0,998	-0,998	-0,995	1	-1
$H$	-0,965	-0,997	0,992	0,999	0,998	-1	1

роны, и величинами амплитуд  $w$ , модуля градиента  $Grad$  и интенсивностью кривизны  $K_{int}$  – с другой, наблюдается отрицательная корреляция. Вообще, в данном конкретном примере коэффициенты корреляции между любыми двумя геометрическими характеристиками превышают по абсолютной вели-

чине 0,95. Заметим, что  $K_{int}$  принимает значения, существенно меньшие, чем все остальные характеристики кривизны.

На рис. 4 представлены результаты расчета геометрических характеристик для третьего типа поверхности, которая задана уравнением  $w(x, y) =$



**Рис. 3.** Модуль градиента и характеристики кривизны поверхности, заданной уравнением  $w = -(1 - x^2 - y^2)/2$  при  $|x| \leq 2^{-1/2}$ ,  $|y| \leq 2^{-1/2}$ . Все точки поверхности эллиптические.

**Рис. 4.** Модуль градиента и характеристики кривизны поверхности, заданной уравнением  $w = (x^2 - y^2)/2$  в области  $|x| \leq 1$ ,  $|y| \leq 1$ . Все точки поверхности гиперболические.

**Таблица 4.** Корреляционная матрица для модельного примера гиперболической поверхности, приведенного на рис. 4

	$w$	$Grad$	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$	$H$
$w$	1	0	-0,475	-0,475	-0,972	0	0
$Grad$	0	1	-0,87	0,87	0	-0,997	0,982
$K_{\max}$	-0,475	-0,87	1	-0,552	0,489	0,872	-0,863
$K_{\min}$	-0,475	0,87	-0,522	1	0,489	-0,872	0,863
$K_{\text{mean}}$	-0,972	0	0,489	0,489	1	0	0
$K_{\text{int}}$	0	-0,997	0,872	-0,872	0	1	-0,989
$H$	0	0,982	-0,863	0,863	0	-0,989	1

$(x^2 - y^2)/2$ . Всюду в области определения  $K_{\max} > 0$  и  $K_{\min} < 0$  и поэтому все точки поверхности являются гиперболическими (такой поверхности в структурной геологии соответствует седловидная складка, а в рельефе – впадина вдоль шарнира антиклинали). Поверхность максимальной кривизны  $K_{\max}$  проявляет положительную корреляцию с поверхностью интенсивности кривизны  $K_{\text{int}}$  ( $r=0,872$ ) и слабую отрицательную – с поверхностью  $K_{\min}$  ( $r=-0,552$ ) (см. табл. 4). Последняя, в свою очередь, прямо коррелирует с модулем градиента  $Grad$  ( $r=0,87$ ). Однако все корреляции выражены не столь четко как, скажем, для эллиптической поверхности, представленной на рис. 3. В отличие от нее для рассматриваемой гиперболической поверхности значения средней кривизны существенно ниже, чем значения интенсивности кривизны. Отметим, что несмотря на принципиальную разницу между эллиптической и гиперболической поверхностями, показанными, соответственно, на рис. 3 и рис. 4, графики модуля градиента  $Grad$  для обеих проявляют удивительное сходство.

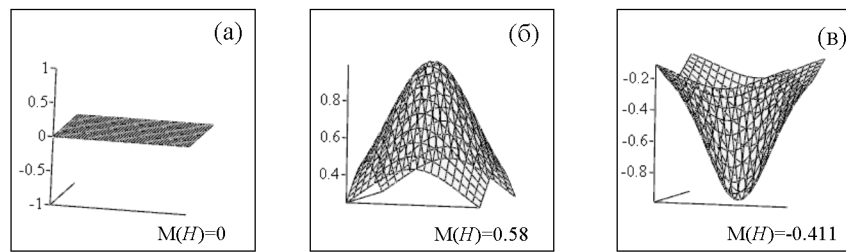
На рис. 5 для рассмотренных на рис. 2–4 модельных поверхностей построены графики гауссовой кривизны  $H$ . Так как для параболической поверхности  $H \equiv 0$  (рис. 5а), то в корреляционной матрице, представленной в табл. 2, эта величина, естественным образом, отсутствует. Для эллиптической поверхности  $H$  обладает высокой положительной связью с  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$ ,  $K_{\text{mean}}$  и сильной отрицательной связью с  $w$ ,  $Grad$  и  $K_{\text{int}}$  (табл. 3). В то же время для гиперболической поверхности (табл. 4)  $H$  не коррелирует с  $w$  и  $K_{\text{mean}}$ , имеет высокую положительную корреляцию с  $Grad$  и  $K_{\min}$  и большие по абсолютной величине отрицательные коэффициенты корреляции с  $K_{\max}$  и  $K_{\text{int}}$ .

Резюмируя приведенные модельные примеры, отметим, что несмотря на конкретный вид выбранных в настоящем разделе зависимостей и полученных численных результатов, важные для настоящей

работы характерные свойства параболических, эллиптических и гиперболических поверхностей остаются в силе и в общем случае.

Сопоставляя полученные результаты с реальной поверхностью ВДЗК, отметим следующее. Протяженным положительным формам рельефа поверхности (линейным антиклинальным складкам основания) соответствуют малые по абсолютной величине значения  $K_{\max}$ , относительно большие по абсолютной величине отрицательные значения  $K_{\min}$ , и, следовательно, отрицательные значения  $K_{\text{mean}}$ . Величины  $K_{\text{mean}}$  и  $K_{\text{int}}$  (с точностью до знака) близки к величине  $K_{\min}$ . В то же время протяженным отрицательным формам (линейным синклиналим складкам основания) соответствуют повышенные положительные значения  $K_{\max}$  и пониженные по абсолютной величине значения  $K_{\min}$ . Средняя кривизна в этом случае положительна, значения  $K_{\text{mean}}$  и  $K_{\text{int}}$  близки к величине  $K_{\max}$ . Изометричным по форме впадинам соответствуют повышенные положительные значения  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$ ,  $K_{\text{mean}}$  и малые значения  $K_{\text{int}}$ . Наоборот, положительные куполообразные формы (своды) характеризуются повышенными по абсолютной величине отрицательными значениями  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$ ,  $K_{\text{mean}}$  и, также как и в предыдущем случае, относительно малыми значениями  $K_{\text{int}}$ .<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Отметим важный факт, который понадобится в дальнейшем для интерпретации результатов. Для эллиптической и гиперболической поверхностей средние по поверхности значения максимальной  $M(K_{\max})$  и минимальной  $M(K_{\min})$  кривизн совпадают по знаку со значениями самих соответствующих кривизн (см. рис. 3 и рис. 4). Другими словами, если формально определять тип поверхности по значениям осредненных по площади главных кривизн так, как это делается для индивидуальной точки поверхности (см. Приложение 1), то тип поверхности останется тем же, что и тип составляющих его точек. Для поверхности, составленной из параболических точек ( $H=0$ ) ситуация иная. Если осреднение проводится по площади, в пределах которой меняется знак средней кривизны  $K_{\text{mean}}$ , то для осредненных значений главных кривизн полу-



**Рис. 5.** Поверхности гауссовой кривизны для модельных примеров: *a* – для параболической поверхности, показанной на рис. 2; *б* – для эллиптической поверхности, показанной на рис. 3; *в* – для гиперболической поверхности, показанной на рис. 4.

## 5. Результаты расчетов и их анализ

Исходная карта амплитуд новейших ВДЗК показана на рис. 6, а результаты расчетов геометрических характеристик поверхности ВДЗК представлены в виде карт-схем на рис. 7–13: карта модуля градиента  $Grad$  – на рис. 7; экспозиции поверхности ВДЗК – на рис. 8; максимальной кривизны  $K_{max}$  – на рис. 9; минимальной кривизны  $K_{min}$  – на рис. 10; средней кривизны  $K_{mean}$  – на рис. 11; интенсивности кривизны  $K_{int}$  – на рис. 12; гауссовой кривизны  $H$  – на рис. 13. Отдельного комментария требует рис. 8, на котором изображена ориентация наклонов поверхности ВДЗК, представленная с непрерывной раскраской с четырьмя точками перелома цветов  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ . Пространственное распределение этой величины дополняет в некотором смысле карту модуля градиента  $Grad$ , давая грубое представление о направлении вектора-градиента поверхности ВДЗК. Карта ориентации хорошо демонстрирует простирание и линейные размеры новейших структур независимо от их амплитуд. Заметим, что линейные границы участков с различными азимутами соответствуют осевым линиям положительных и отрицательных новейших структурных форм.

Визуальный анализ представленных карт позволяет сделать следующие выводы.

На картах модуля  $Grad$  и на картах различных характеристик кривизны поверхности ВДЗК (рис. 7, 9–13) достаточно надежно выделяются устойчивые площади (материковые платформы) и подвижные пояса (рифтовые и орогенические зоны). В частно-

чаем  $M(K_{max}) > 0$ ,  $M(K_{min}) < 0$  (рис. 2). Формально определяемый по осредненным значениям тип поверхности является гиперболическим, в то время как исходная поверхность является параболической. Сказанное относится и к определению типа поверхности по дискретным данным, т.к. в этом случае процедура осреднения (по ячейкам разбиения) содержит неявным образом. Таким образом, при численном определении типа поверхности, заданной дискретными точками, параболическая поверхность, как правило, будет “замаскирована” под гиперболическую.

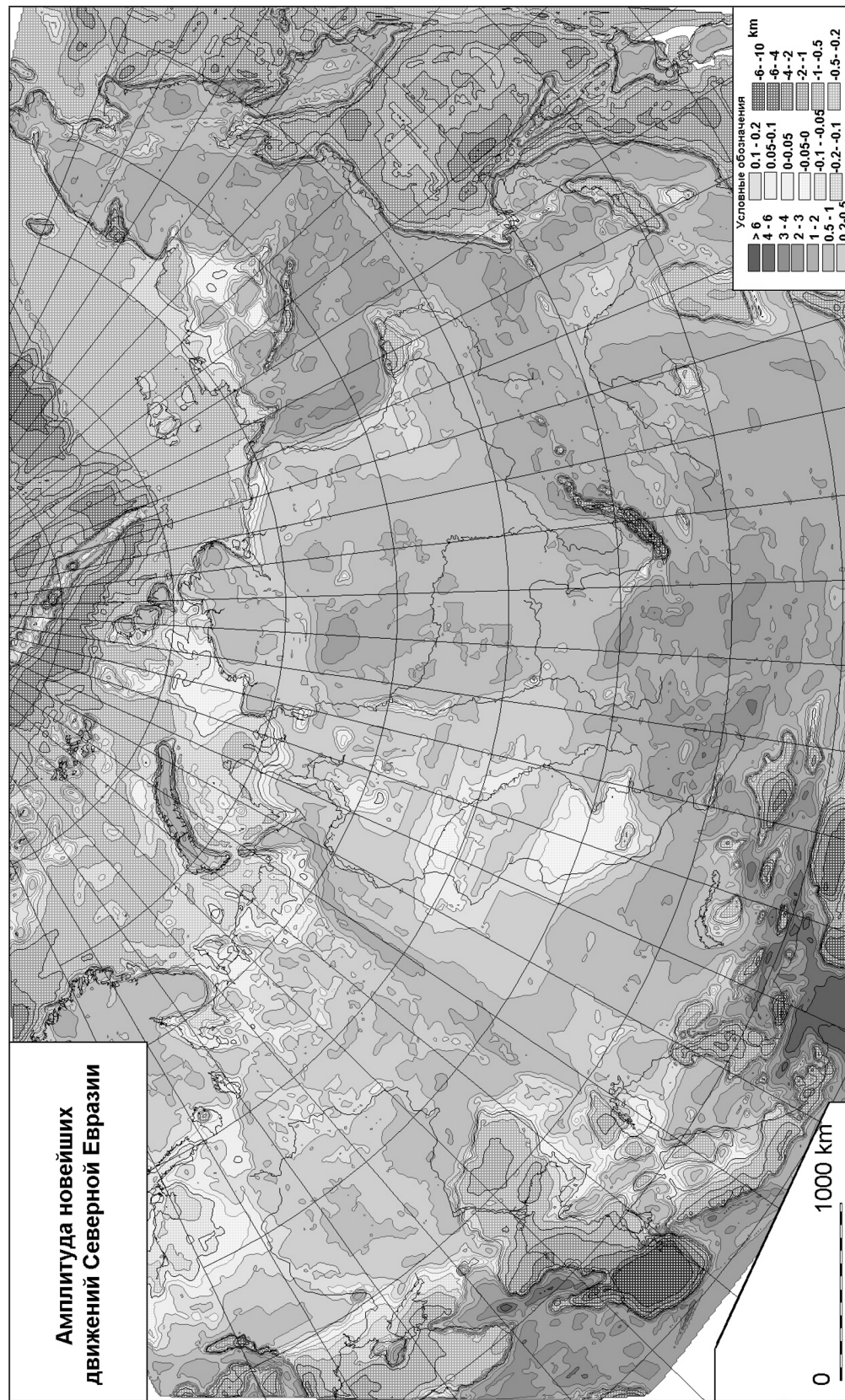
сти, на всех упомянутых картах (кроме карты  $K_{max}$ ) хорошо прослеживается Урал. В то же время Байкальский рифт надежно выделяется по всей своей площади лишь на картах интенсивности кривизны  $K_{int}$ , минимальной кривизны  $K_{min}$  и на карте  $Grad$  и мало заметен на картах других характеристик кривизны.

На карте интенсивности кривизны повышенные значения  $K_{int}$  реализуются для орогенических и некоторых рифтовых областей. Для впадин глубоководных морей повышенные значения  $K_{int}$  не характерны (кроме некоторых периферийных участков Южно-Каспийской впадины и Командорской котловины). В орогенических областях Центральной Азии повышенные значения  $K_{int}$ ,  $K_{min}$  и  $Grad$  образуют, в основном, вытянутые субширотные зоны. На Кавказе такие зоны имеют СЗС простирание. На картах  $K_{max}$  и  $K_{mean}$  упомянутые зоны выделяются гораздо менее уверенно (за исключением  $K_{mean}$  на Кавказе), а на карте гауссовой кривизны  $H$  такая структурированность орогенических областей пропадает совсем.

Из карты гауссовой кривизны  $H$  следует, что большая часть территории Северной Евразии характеризуется отрицательными значениями  $H$ , причем в платформенных областях, глубоководных морях и части областей предрифтового режима эти значения понижены по абсолютной величине, в то время как в орогенических и рифтовых областях – повышены. Зоны положительного значения гауссовой кривизны представляют собой изометричные по форме области относительно небольшого размера, более или менее равномерно распределенные по изучаемой территории. Интересно отметить, что густота расположения зон  $H > 0$  почти не зависит от типа геоструктурной области.

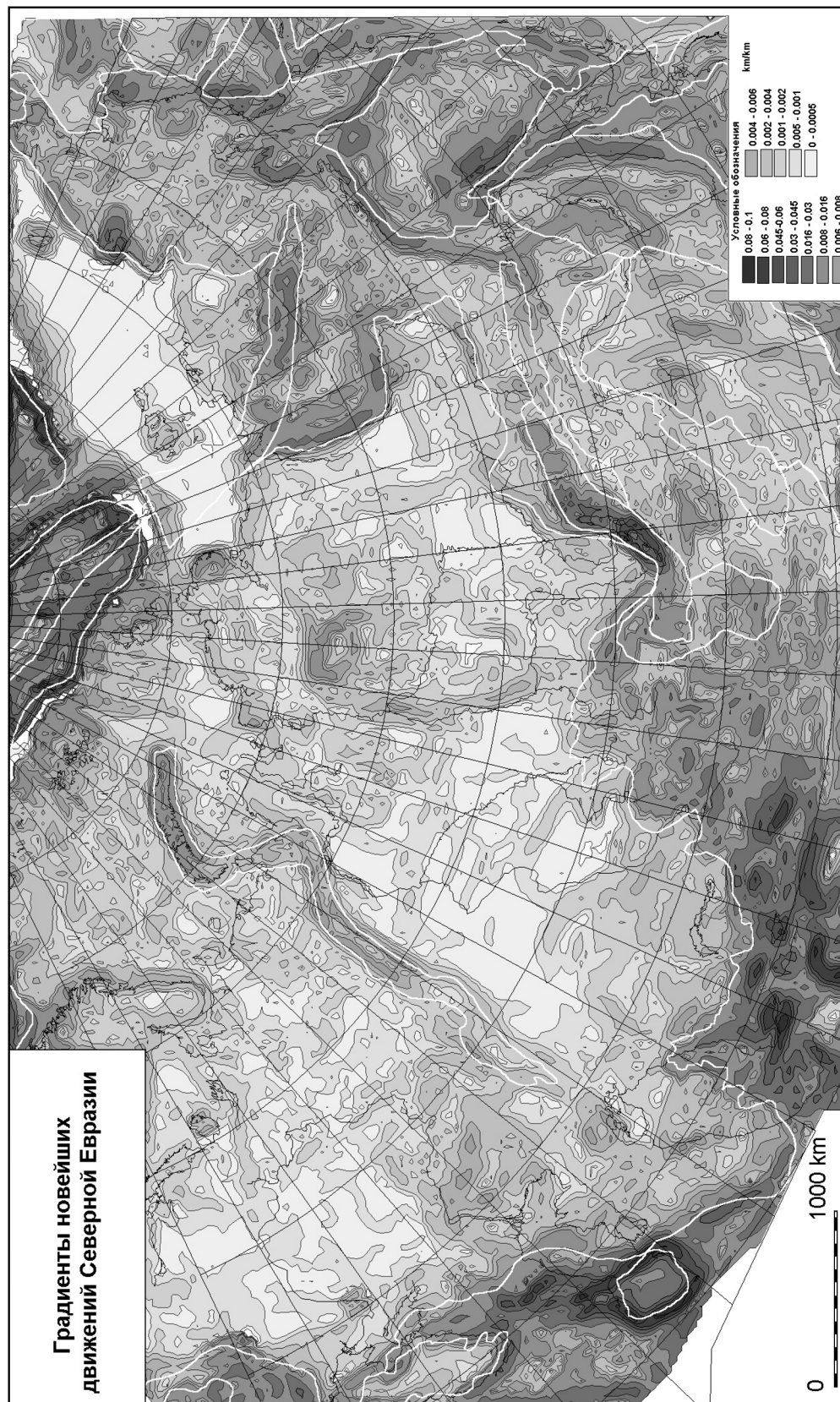
### 5.1 Корреляционный и факторный анализ для территории Северной Евразии в целом

Для количественной характеристики связей был проведен корреляционный и факторный анализ семи параметров (46000 точек для всей территории Се-

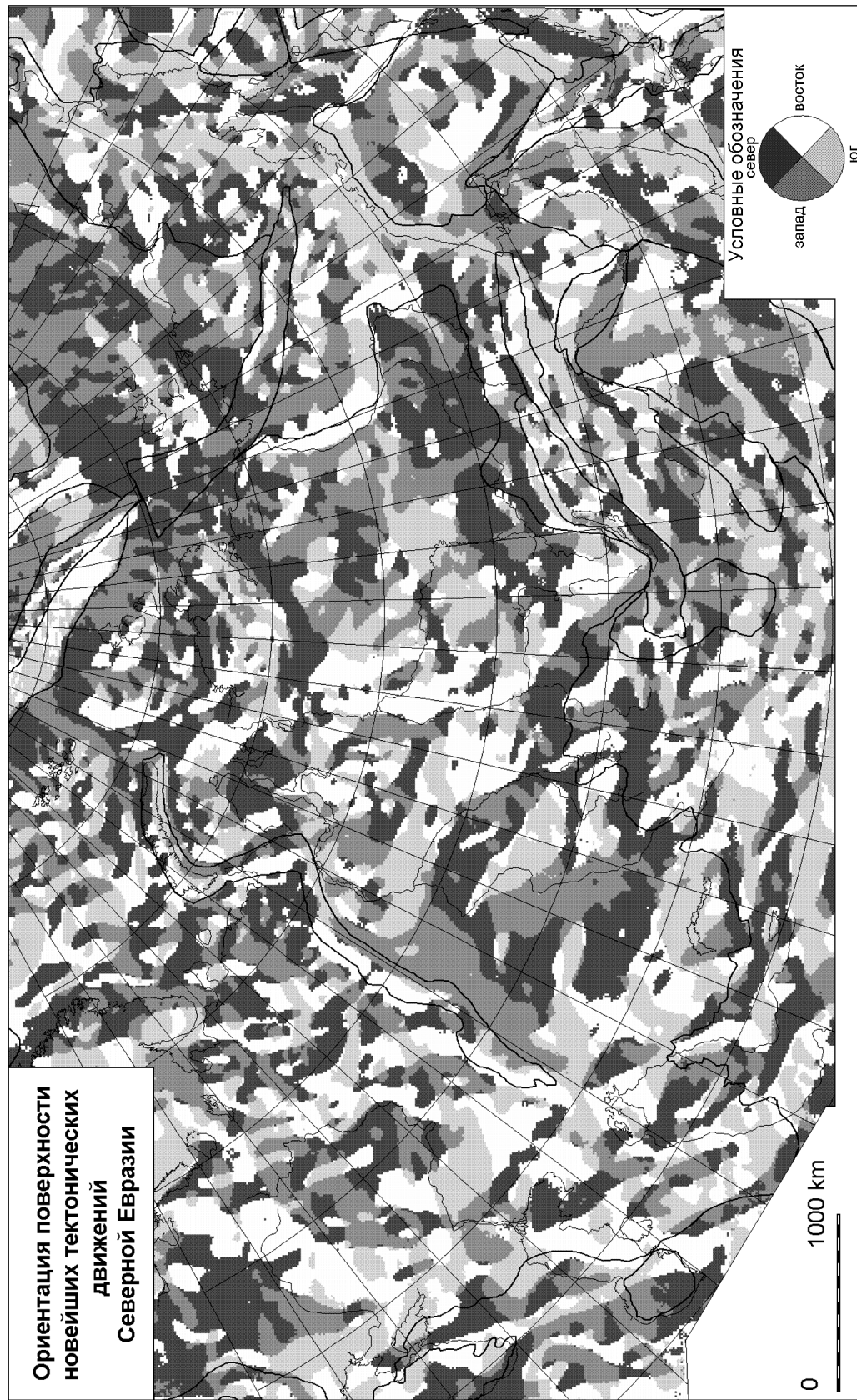


**Рис. 6.** Карта амплитуд новейших движений для территории Северной Евразии.





**Рис. 7.** Карта модуля градиента новейших движений для территории Северной Евразии.



**Рис. 8.** Экспозиция поверхности новейших движений для территории Северной Евразии.

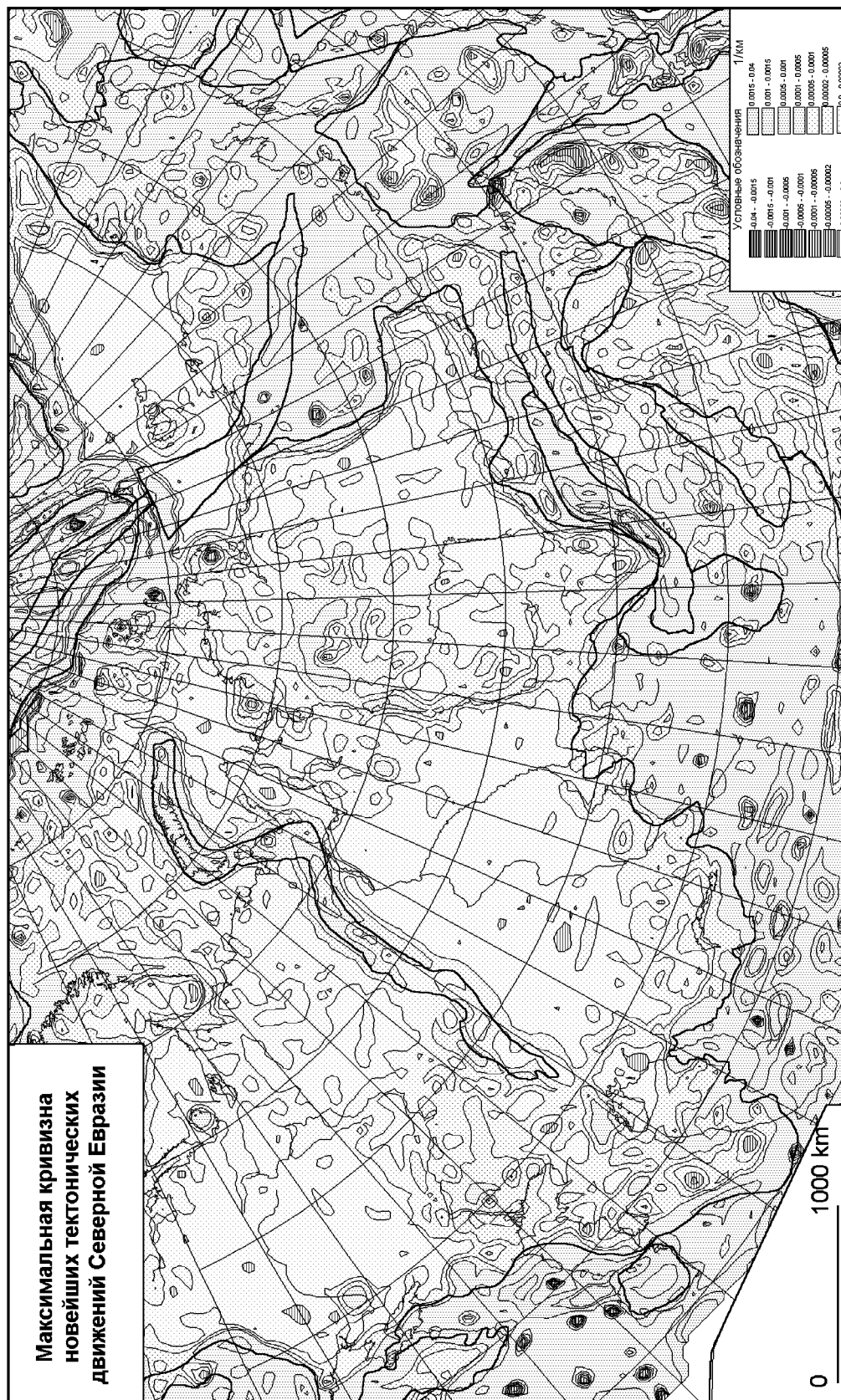
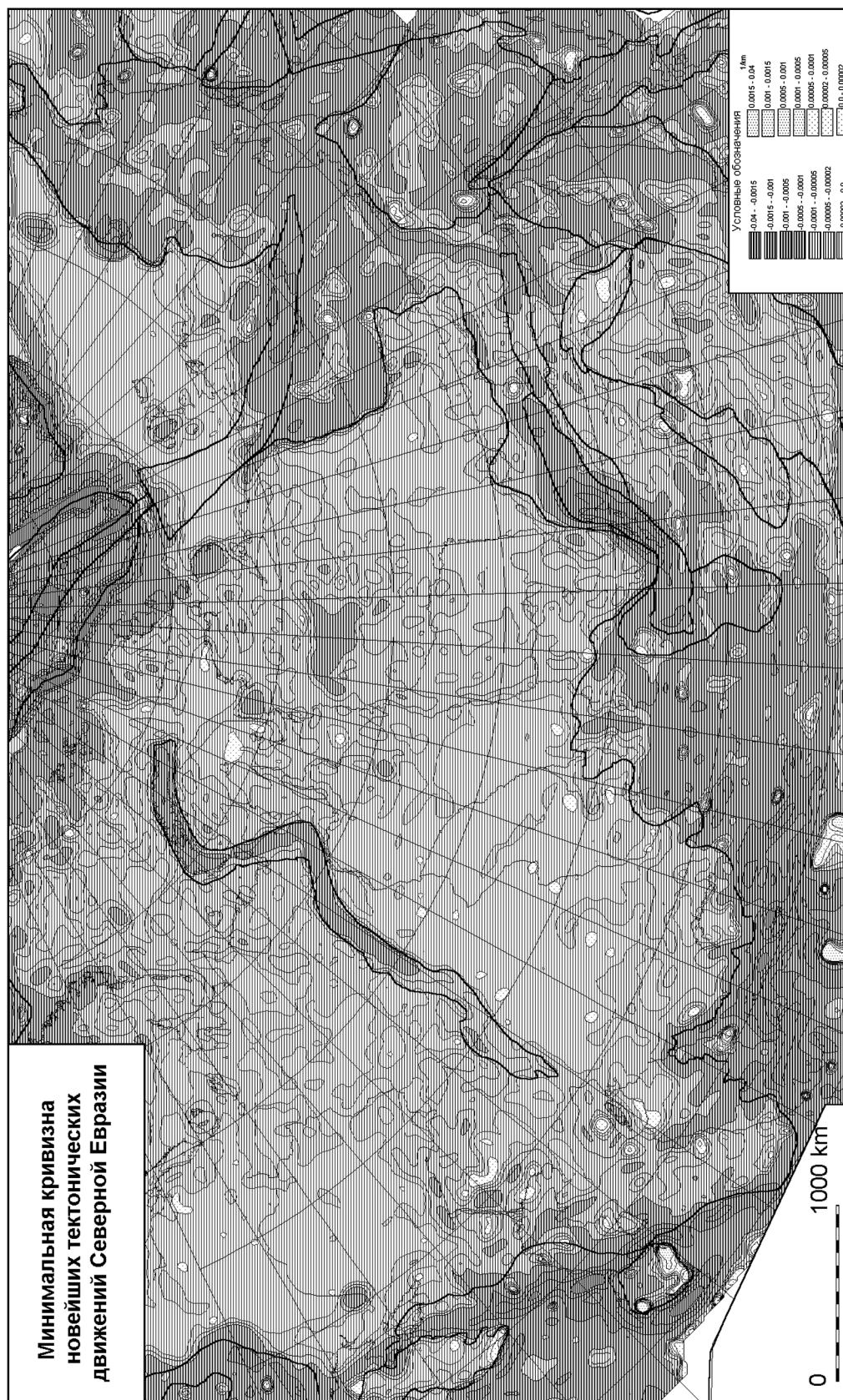
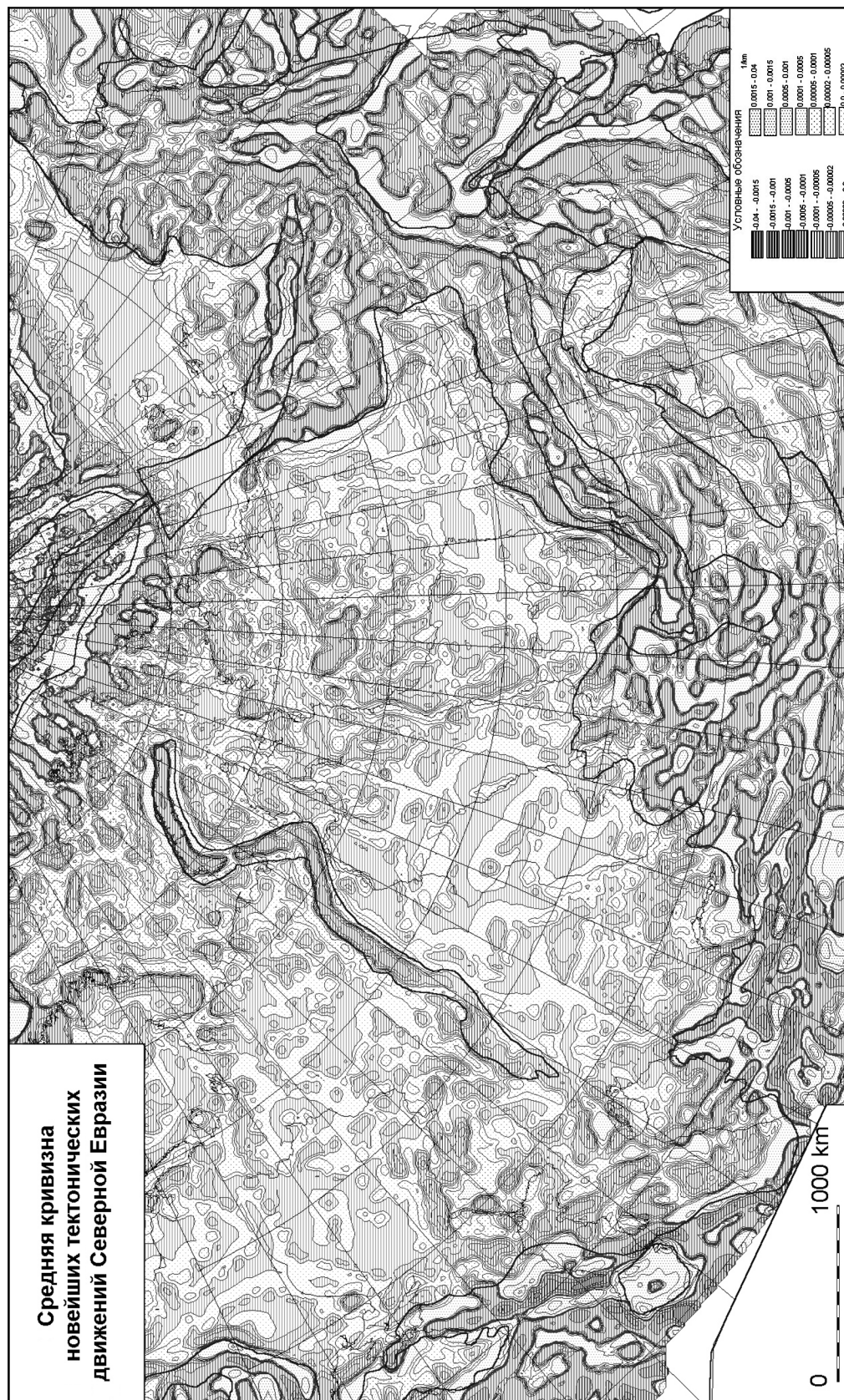


Рис. 9. Карта максимальной кривизны новейших движений для территории Северной Евразии.



**Рис. 10.** Карта минимальной кривизны новейших движений для территории Северной Евразии.





**Рис. 11.** Карта средней кривизны новейших движений для территории Северной Евразии.

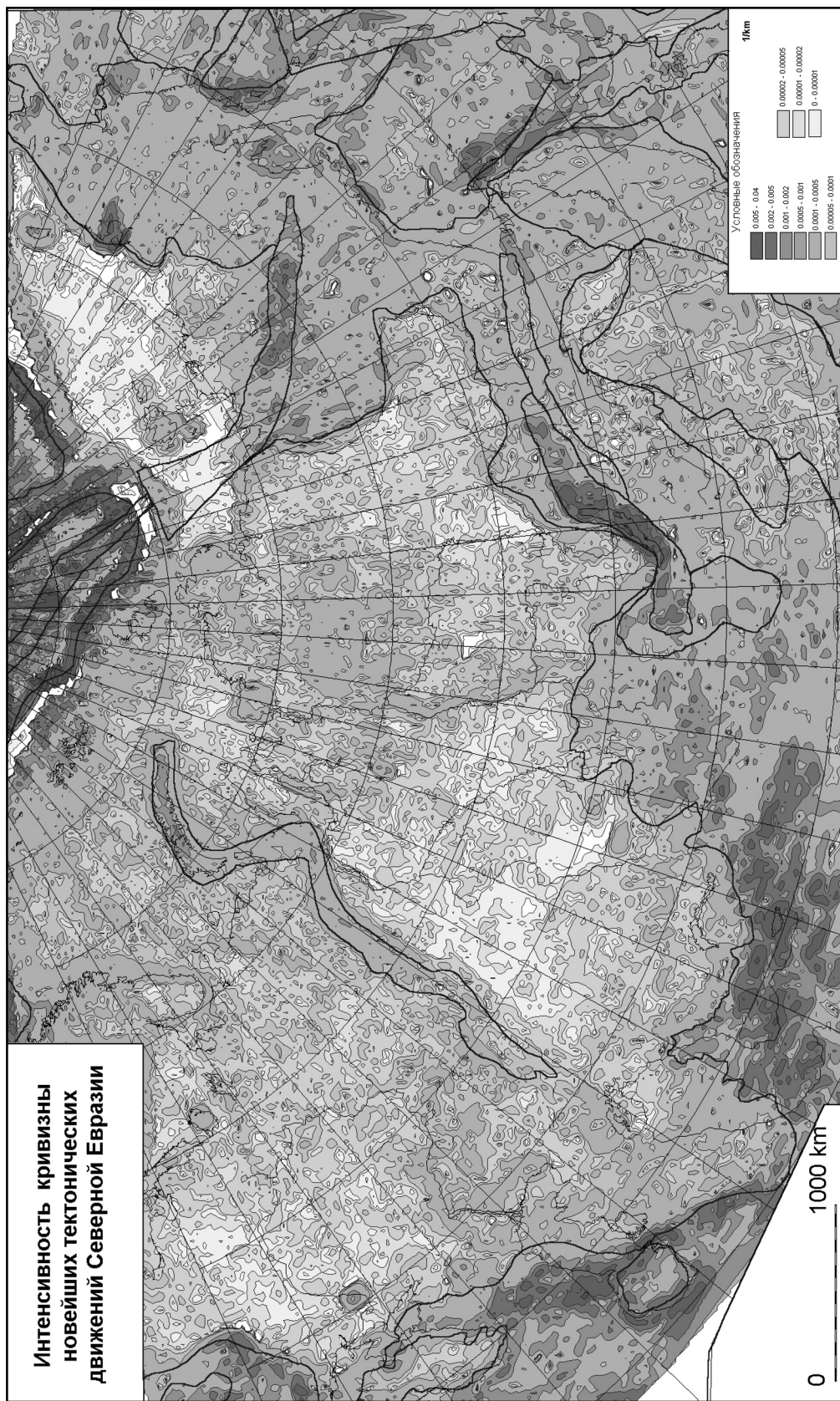


Рис. 12. Карта интенсивности кривизны новейших движений для территории Северной Евразии.

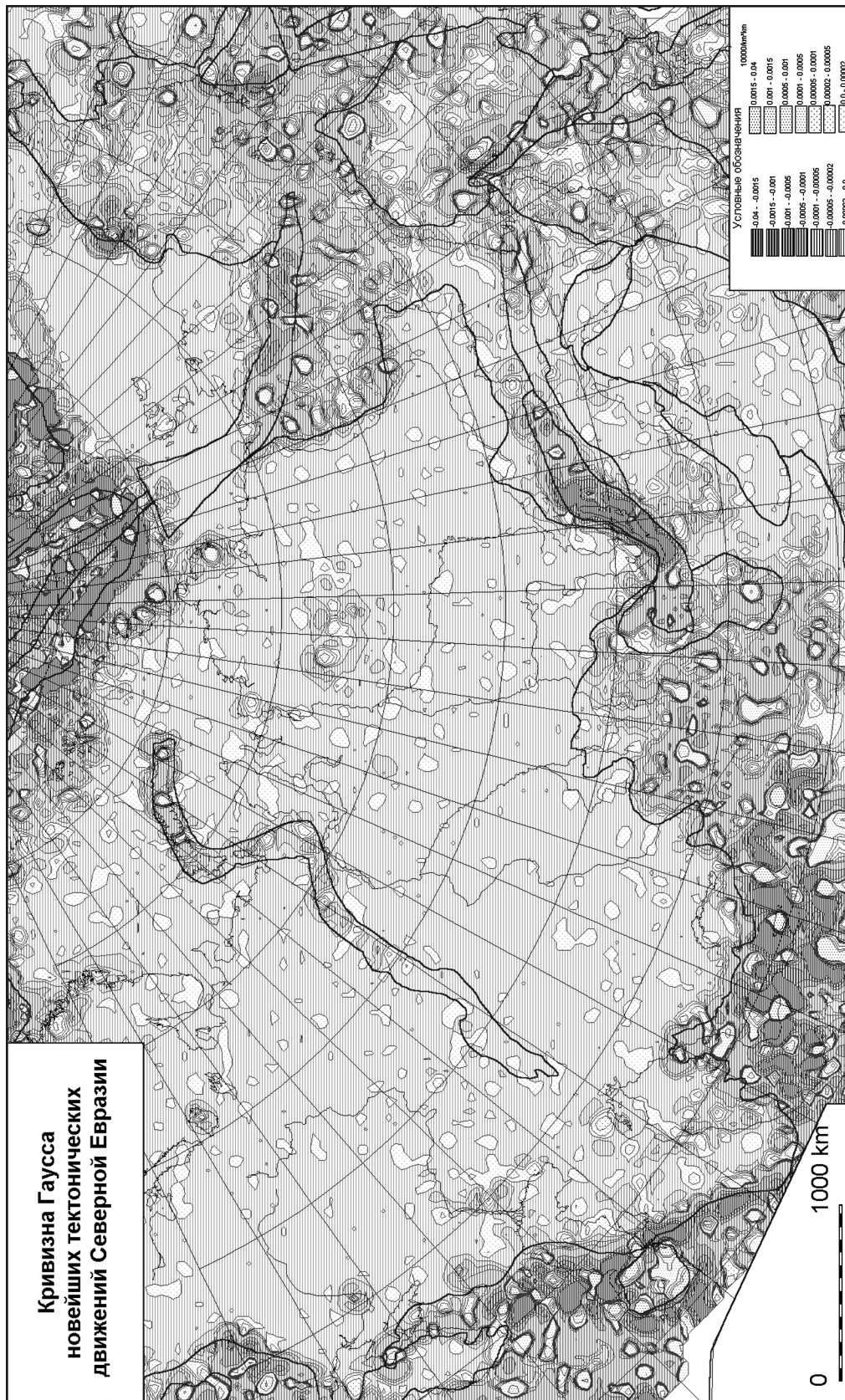


Рис. 13. Карта гауссовой кривизны новейших движений для территории Северной Евразии.

**Таблица 5.** Матрица коэффициентов корреляции между амплитудами  $w$ , градиентом  $Grad$  и кривизнами  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$ ,  $K_{\text{mean}}$ ,  $K_{\text{int}}$ ,  $H$ , составленная по 46000 точкам на территории Северной Евразии

	$w$	$Grad$	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$	$H$
$w$	1,000	-0,273	-0,312	-0,045	-0,254	-0,191	0,007
$Grad$	-0,273	1,000	0,458	-0,453	0,008	0,644	-0,141
$K_{\max}$	-0,312	0,458	1,000	0,000	0,713	0,713	-0,119
$K_{\min}$	-0,045	-0,453	0,000	1,000	0,701	-0,701	0,187
$K_{\text{mean}}$	-0,254	0,008	0,713	0,701	1,000	0,016	0,046
$K_{\text{int}}$	-0,191	0,644	0,713	-0,701	0,016	1,000	-0,216
$H$	0,007	-0,141	-0,119	0,187	0,046	-0,216	1,000

верной Евразии): амплитуды  $w$ , градиента  $Grad$ , максимальной  $K_{\max}$ , минимальной  $K_{\min}$ , средней  $K_{\text{mean}}$  и гауссовой  $H$  кривизн, а также интенсивности кривизны  $K_{\text{int}}$ . Результаты анализа представлены в табл. 5, 6.

Из данных табл. 5 следует, что в целом для Северной Евразии корреляция амплитуд ВДЗК с другими параметрами отсутствует. Градиент поверхности ВДЗК  $Grad$  имеет достаточно высокую положительную ( $r=0,644$ ) связь с интенсивностью кривизны  $K_{\text{int}}$ , что характерно для эллиптической поверхности (см. табл. 3), и не имеет связи ( $r=0,008$ ) со средней кривизной  $K_{\text{mean}}$ , что характерно для параболической (табл. 2) и гиперболической (табл. 4) поверхностей. Интенсивность кривизны  $K_{\text{int}}$  имеет высокую положительную корреляцию ( $r=0,713$ ) с максимальной кривизной  $K_{\max}$  и отрицательную ( $r=-0,701$ ) – с минимальной кривизной  $K_{\min}$ . Это обстоятельство (почти с точностью до величин коэффициентов корреляции) повторяет ситуацию с модельной гиперболической поверхностью (см. табл. 4). Обратимся теперь к средней кривизне  $K_{\text{mean}}$ . Она также сильно связана с  $K_{\max}$  ( $r=0,713$ ) и  $K_{\min}$  ( $r=0,701$ ), однако в отличие от  $K_{\text{int}}$  связь средней кривизны с обеими главными кривизнами положительна. Эта ситуация уже характерна для эллиптической и гиперболической поверхностей (см. табл. 2, 3). Гауссова кривизна слабо связана с остальными геометрическими характеристиками, что не дает возможности сопоставления с каким-либо типом поверхности по этому признаку.

Таким образом, изучение табл. 5 позволяет сделать вывод о поверхности ВДЗК Северной Евразии в целом как о своеобразной смеси различных типов поверхностей, изученных на модельных примерах в разделе 4. Весьма забавным доводом в пользу этого служит то, что, как следует из табл. 5,  $K_{\max}$  и  $K_{\min}$  никак не связаны друг с другом ( $r=0$ ). Такой результат является как бы средним арифметическим из положительной корреляции этих главных кривизн для

параболической (табл. 2) и эллиптической (табл. 3) поверхностей и из отрицательной корреляции  $K_{\max}$  и  $K_{\min}$  – для гиперболической поверхности (табл. 4).

Некоторые более точные выводы относительно свойств поверхности ВДЗК Северной Евразии можно сделать с помощью факторного анализа, в частности, понять, какой тип поверхности превалирует.

**Таблица 6.** Результаты использования метода главных компонент по 46000 точкам на территории Северной Евразии для семи параметров: амплитуд  $w$ , градиента  $Grad$  и кривизн  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$ ,  $K_{\text{mean}}$ ,  $K_{\text{int}}$ ,  $H$ 

(a)

Компоненты	Собственные значения	% вклад
1	2,698	38,543
2	2,100	29,997
3	0,949	13,551
4	0,817	11,677
5	0,436	6,232
6	0,9E-09	2,7E-08
7	-1,6E-15	-2,3E-14

(б)

	Факторы		
	1(39%)	2(30%)	3(14%)
$w$	-0,363	-0,399	-0,337
$Grad$	0,824	0,06	0,01
$K_{\max}$	0,607	0,736	-0,109
$K_{\min}$	-0,722	0,658	0,119
$K_{\text{mean}}$	-0,07	0,986	0,005
$K_{\text{int}}$	0,939	0,06	-0,161
$H$	-0,152	-0,02	0,925



**Таблица 7.** Корреляционная матрица (а) и матрица факторных нагрузок (б) для платформенных областей, построенные по 24796 точкам. На врезке (в) показана исследуемая территория

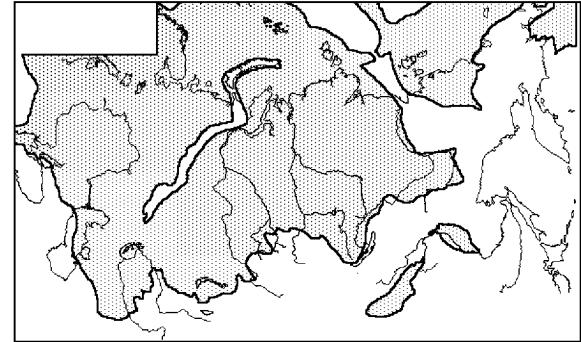
(а)

	$w$	$Grad$	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$	$H$
$w$	1,000	-0,213	-0,278	0,029	-0,142	-0,183	0,013
$Grad$	-0,213	1,000	0,376	-0,605	-0,276	0,697	-0,264
$K_{\max}$	-0,278	0,376	1,000	-0,043	0,563	0,608	-0,355
$K_{\min}$	0,029	-0,605	-0,043	1,000	0,802	-0,819	0,062
$K_{\text{mean}}$	-0,142	-0,276	0,563	0,802	1,000	-0,314	-0,161
$K_{\text{int}}$	-0,183	0,697	0,608	-0,819	-0,314	1,000	-0,253
$H$	0,013	-0,264	-0,355	0,062	-0,161	-0,253	1,000

(б)

	Факторы		
	1(43%)	2(30%)	3(14%)
$w$	0,07	0,001	-0,898
$Grad$	-0,745	0,333	0,209
$K_{\max}$	-0,105	0,821	0,445
$K_{\min}$	0,981	0,02	0,05
$K_{\text{mean}}$	0,750	0,560	0,305
$K_{\text{int}}$	-0,840	0,405	0,218
$H$	0,121	-0,771	0,267

(в)



Результаты факторного анализа (табл. 6) показывают, что в первый фактор с весом более 38% входят градиент, интенсивность кривизны, максимальная кривизна и минимальная кривизна с обратным знаком. Второй фактор связывает среднюю кривизну, максимальную кривизну, минимальную кривизну. Третий фактор отражает в основном гауссову кривизну. Следует отметить, что амплитуда новейших движений имеет примерно равные нагрузки на все три фактора и во всех случаях с обратным знаком. Нагрузка эта относительно невелика, что указывает на независимость поведения изучаемых геометрических характеристик (градиента и кривизн) от амплитуд ВДЗК.

Наибольший вклад в 1 фактор вносит интенсивность кривизны  $K_{\text{int}}$ , следующими параметрами по убыванию величины идут  $Grad$ ,  $K_{\min}$ ,  $K_{\max}$ . Поведение факторных нагрузок, в частности, высокое значение  $K_{\text{int}}$  вместе с большим положительным значением  $K_{\max}$  и большим (по абсолютной величине) отрицательным значением  $K_{\min}$  позволяют отнести 1 фактор за счет влияния гиперболического типа поверхности (см. рис. 4 и табл. 4). Следует отметить в этой связи и чрезвычайно малое значение  $K_{\text{mean}}$ , характерное для гиперболической поверхности.

Обратимся к фактору 2. Здесь следует отметить,

что веса четырех параметров, которые входят в 2 фактор, удивительным образом соответствуют модельному примеру эллиптической поверхности, рассмотренному на рис. 3. Действительно, в этом случае довольно высокие значения средней кривизны  $K_{\text{mean}}$  коррелируют с главными кривизнами  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$  и, в то же время наблюдается их отрицательная корреляция с амплитудой  $w$ .

Заканчивая анализ общих для всей Северной Евразии связей между изучаемыми параметрами, следует отметить, что они носят общий для изучаемой территории характер и не выявляют особенностей, характерных для регионов с различным типом тектонического развития. Для получения более детальных результатов проведен факторный анализ для отдельных геоструктурных областей.

## 5.2 Корреляционный и факторный анализ для отдельных геоструктурных областей

Корреляционный и факторный анализ всех параметров был проведен для каждой геоструктурной области. Результаты этого анализа суммированы в табл. 7–12. Таблица 13 является сводной факторной таблицей по всем геоструктурным областям.

**Таблица 8.** Корреляционная матрица (а) и матрица факторных нагрузок (б) для орогенических областей, построенных по 16352 точкам. На врезке (в) показана исследуемая территория

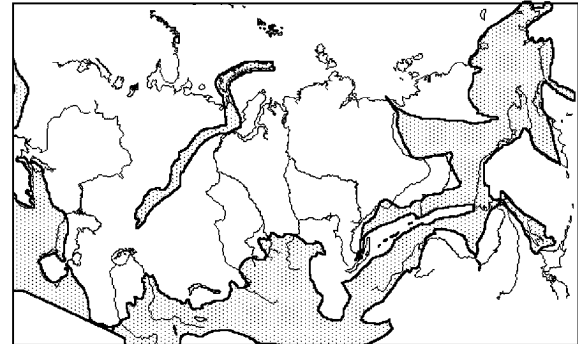
(а)

	$w$	$Grad$	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$	$H$
$w$	1,000	-0,176	-0,406	-0,353	-0,491	-0,039	-0,083
$Grad$	-0,176	1,000	0,388	-0,370	0,010	0,596	-0,048
$K_{\max}$	-0,406	0,388	1,000	0,190	0,769	0,633	-0,078
$K_{\min}$	-0,353	-0,370	0,190	1,000	0,774	-0,640	0,297
$K_{\text{mean}}$	-0,491	0,010	0,769	0,774	1,000	-0,008	0,143
$K_{\text{int}}$	-0,039	0,596	0,633	-0,640	-0,008	1,000	-0,295
$H$	-0,083	-0,048	-0,078	0,297	0,143	-0,295	1,000

(б)

	Факторы		
	1(37%)	2(35%)	3(13%)
$w$	-0,673	-0,106	-0,154
$Grad$	0,09	0,851	0,141
$K_{\max}$	0,802	0,495	-0,190
$K_{\min}$	0,697	-0,652	0,215
$K_{\text{mean}}$	0,971	-0,105	0,017
$K_{\text{int}}$	0,08	0,901	-0,318
$H$	0,09	-0,85	0,950

(в)



### 5.2.1 Результаты корреляционного анализа.

Также как и для территории Северной Евразии в целом, корреляционные матрицы для отдельных геоструктурных областей демонстрируют смешение признаков разных типов поверхностей. Так, для платформенных областей (табл. 7а) интенсивность кривизны  $K_{\text{int}}$  имеет высокую положительную связь с  $Grad$ , что характерно для эллиптической поверхности, и в то же время ее (значительные по абсолютной величине) коэффициенты корреляции с  $K_{\min}$  и  $K_{\max}$  имеют разные знаки, как это имеет место для параболической и гиперболической поверхностей. Почти аналогичная картина наблюдается и для всех других геоструктурных областей: орогенических (табл. 8а), рифтовых (табл. 9а), предрифтовых (табл. 10а), впадин глубоководных морей (табл. 11а) и островных дуг (табл. 12а). Отмеченные признаки, дополненные слабой корреляционной зависимостью  $K_{\text{int}}$  со средней кривизной  $K_{\text{mean}}$ , достаточно сильной положительной связью  $K_{\text{mean}}$  с  $K_{\min}$  и  $K_{\max}$  и практическим отсутствием зависимости между главными кривизнами  $K_{\min}$  и  $K_{\max}$ , позволяют провести почти полное соответствие между корреляционными матрицами для всех геоструктурных областей с корреляционной матрицей для Северной Евразии в целом (табл. 5). Незначительные

отклонения отдельных коэффициентов корреляции для некоторых геоструктурных областей от соответствующих значений в табл. 5 лишь намечают тенденцию приближения поверхности ВДЗК к тому или иному типу поверхности по сравнению с поверхностью ВДЗК Северной Евразии в целом.

### 5.2.2 Результаты факторного анализа.

Прежде всего следует обратить внимание на высокие и близкие значения весов 1 и 2 факторов: вклад 1 фактора в суммарную изменчивость составляет от 37 до 44%, а доля 2 фактора также имеет значимый вес – от 28 до 35%, что в сумме с весом 1 фактора составляет от 65 до 79% суммарной изменчивости. Наш опыт использования факторного анализа для решения различных задач в геологии и геофизике показывает [Грачев, 1977, 1987; Грачев, Блюмштейн, 1974; Грачев и др., 1996; Мишин и др., 1974], что такой результат свидетельствует о существенной роли обоих факторов. В рассматриваемом случае полная геометрическая характеристика поверхности ВДЗК может быть дана, только если принять во внимание и тот, и другой факторы.

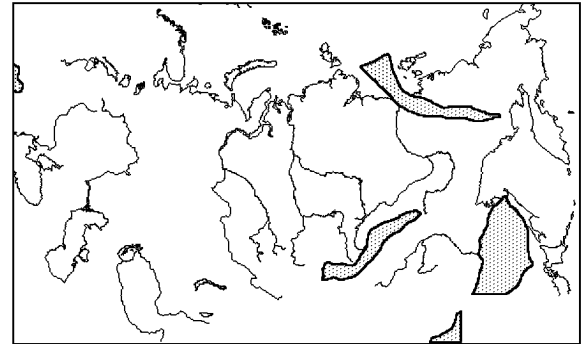
Обычно при факторном анализе, когда ведущий процесс (или признак) ярко выражен вес 1 фактора существенно больше веса 2 фактора. В нашем слу-

**Таблица 9.** Корреляционная матрица (а) и матрица факторных нагрузок (б) для рифтовых зон, построенные по 1740 точкам. На врезке (в) показана исследуемая территория**(а)**

	$w$	$Grad$	$K_{max}$	$K_{min}$	$K_{mean}$	$K_{int}$	$H$
$w$	1,000	-0,071	-0,541	-0,347	-0,617	-0,212	0,125
$Grad$	-0,071	1,000	0,328	-0,521	-0,069	0,605	-0,151
$K_{max}$	-0,541	0,328	1,000	0,075	0,797	0,761	-0,266
$K_{min}$	-0,347	-0,521	0,075	1,000	0,661	-0,590	0,401
$K_{mean}$	-0,617	-0,069	0,797	0,661	1,000	0,215	0,043
$K_{int}$	-0,212	0,605	0,761	-0,590	0,215	1,000	-0,476
$H$	0,125	-0,151	-0,266	0,401	0,043	-0,476	1,000

**(б)**

	Факторы		
	1(41%)	2(35%)	3(12%)
$w$	-0,787	0,01	0,102
$Grad$	0,007	0,910	0,05
$K_{max}$	0,837	0,447	-0,197
$K_{min}$	0,557	-0,677	0,423
$K_{mean}$	0,966	-0,07	0,108
$K_{int}$	0,315	0,803	-0,435
$H$	-0,06	-0,118	0,960

**(в)**

чае, когда исследуются особенности морфологии новейших структурных форм, приходится сталкиваться с конвергенцией признаков. Так, например, новейшие антиклинальные складки в пределах осадочных (пострифтовых) бассейнов материковых платформ и внутригорных впадин орогенических областей могут иметь близкие геометрические характеристики, но разный генезис.

Сравнение главных факторов для разных геоструктурных областей (см. табл. 7–12, а также табл. 13) позволяет, опираясь частично на модельные примеры, рассмотренные в разделе 4, сделать следующие выводы:

1. Орогенические области, континентальные рифты и островные дуги имеют одинаковый 1 фактор, лишь незначительно различаясь весом. Близкие значения как самих факторов, так и факторных нагрузок на отдельные переменные объясняются тем, что здесь мы наблюдаем значительные вариации амплитуд ВДЗК на коротких расстояниях. Геометрическая интерпретация 1 фактора состоит в том, что новейшие структурные формы этих геоструктурных областей описываются параболической или гиперболической поверхностями.

Если принять во внимание 2 фактор, также обла-

дающий большим весом у всех трех областей, то видно отличие орогенов и континентальных рифтов от островных дуг. Хотя по своей геометрической сути 2-е факторы во всех трех случаях отвечают эллиптической поверхности, у островных дуг гауссова кривизна противопоставляется интенсивности кривизны новейших деформаций.

2. В 1 фактор глубоководных морей входят амплитуды ВДЗК, однако вид этого фактора существенно отличается от такового для орогенов, рифтов и островных дуг и отвечает эллиптической поверхности. Интересно отметить, что 2 фактор для глубоководных морей идентичен первому фактору предрифтовых областей (также эллиптическая поверхность) и это понятно. Обладая большими глубинами (роль  $w$ ), дифференциация движений в пределах глубоководных морей отсутствует, что отвечает пострифтовой природе этих впадин.

3. Области предрифтового режима весьма своеобразны и имеют 1 фактор, аналогичный 2 фактору глубоководных морей (эллиптическая поверхность). Интерпретация его очевидна – отсутствие прогибов ниже уровня моря в условиях предрифтового режима. Во 2 фактор с большим весом (35%) входят градиенты движений и интенсивность кривизн,

**Таблица 10.** Корреляционная матрица (а) и матрица факторных нагрузок (б) для областей предрифтового режима, построенные по 1289 точкам. На врезке (в) показана исследуемая территория

(а)

	$w$	$Grad$	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$	$H$
$w$	1,000	0,259	-0,032	-0,447	-0,324	0,372	0,007
$Grad$	0,259	1,000	0,253	-0,381	-0,115	0,526	-0,056
$K_{\max}$	-0,032	0,253	1,000	0,256	0,750	0,517	-0,434
$K_{\min}$	-0,447	-0,381	0,256	1,000	0,832	-0,695	0,079
$K_{\text{mean}}$	-0,324	-0,115	0,750	0,832	1,000	-0,179	-0,195
$K_{\text{int}}$	0,372	0,526	0,517	-0,695	-0,179	1,000	-0,393
$H$	0,007	-0,056	-0,434	0,079	-0,195	-0,393	1,000

(б)

	Факторы		
	1(39%)	2(32%)	3(13%)
$w$	-0,297	0,607	0,04
$Grad$	0,08	0,843	0,02
$K_{\max}$	0,785	0,345	-0,468
$K_{\min}$	0,765	-0,551	0,272
$K_{\text{mean}}$	0,974	-0,178	-0,08
$K_{\text{int}}$	-0,09	0,745	-0,589
$H$	-0,111	0,05	0,926

(в)



что подчеркивает существенную, тем не менее, роль дифференцированности движений.

4. Материковые платформы характеризуются 1 фактором, который при большом весе (43%) существенно отличается от всех рассмотренных выше случаев. Такой результат достаточно ясен, ибо амплитуды ВДЗК для платформ малы и незначительно варьируют по площади (рис. 14а). Вместе с тем, поскольку градиенты движений и интенсивность кривизн входят в 1 фактор, вполне очевидно, что отдельные районы в пределах материковых платформ обладают повышенной подвижностью.

Факторный анализ геометрических характеристик поверхности ВДЗК, проведенный по геоструктурным областям в целом, убеждает нас в возможности использовать эти характеристики в классификационных целях, что позволит в будущем провести разделение всей территории Северной Евразии по морфологии новейших структурных форм.

### 5.3 Расчет коэффициентов вариации геометрических характеристик

Исследуем вопрос об изменчивости рассчитываемых геометрических характеристик поверхности новейших ВДЗК внутри каждой из основных геоструктурных областей Северной Евразии. Степень однородности распределения того или иного параме-

тра внутри области можно оценить на основе относительного разброса его значений вокруг среднего. С целью решения этой задачи в пределах каждой из областей были рассчитаны средние величины  $M$  всех семи изучаемых параметров, т.е.  $M(w)$ ,  $M(Grad)$ ,  $M(K_{\max})$ ,  $M(K_{\min})$ ,  $M(K_{\text{mean}})$ ,  $M(K_{\text{int}})$  и  $M(H)$ , а также стандартные отклонения  $\sigma$  этих величин:  $\sigma(w)$ ,  $\sigma(Grad)$ ,  $\sigma(K_{\max})$ ,  $\sigma(K_{\min})$ ,  $\sigma(K_{\text{mean}})$ ,  $\sigma(K_{\text{int}})$  и  $\sigma(H)$ . Полученные результаты для всей территории Северной Евразии, представлены в табл. 1.

Относительный разброс каждого параметра оценивался на основе так называемого коэффициента вариации [Корн, Корн, 1974]

$$d = \frac{\sigma}{|M|}$$

Полученные результаты, которые суммированы в табл. 14, показали следующее. Наибольший разброс по областям имеет коэффициент вариации амплитуд  $w$ , изменяясь от 0,9 для областей предрифтового режима до 31 – для платформ. Коэффициент вариации  $Grad$  не сильно зависит от области, оставаясь почти в пределах единицы.

Обратимся к наиболее важным для нас параметрам – кривизнам. Здесь обращает на себя внимание стабильно высокие значения  $d$  для средней  $K_{\text{mean}}$  и гауссовой  $H$  кривизн, которые существенно превы-

**Таблица 11.** Корреляционная матрица (а) и матрица факторных нагрузок (б) для впадин глубоководных морей, построенные по 1600 точкам. На врезке (в) показана исследуемая территория

(а)

	$w$	$Grad$	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$	$H$
$w$	1,000	-0,550	-0,476	-0,151	-0,415	-0,321	-0,101
$Grad$	-0,550	1,000	0,554	-0,136	-0,310	0,600	0,032
$K_{\max}$	-0,476	0,554	1,000	0,264	0,843	0,714	0,083
$K_{\min}$	-0,151	-0,136	0,264	1,000	0,742	-0,487	0,455
$K_{\text{mean}}$	-0,415	0,310	0,843	0,742	1,000	0,224	0,312
$K_{\text{int}}$	-0,321	0,600	0,714	-0,487	0,224	1,000	-0,255
$H$	-0,101	0,032	0,083	0,455	0,312	-0,255	1,000

(б)

	Факторы		
	1(44%)	2(30%)	3(12%)
$w$	-0,763	-0,195	-0,222
$Grad$	0,887	0,08	-0,07
$K_{\max}$	0,567	0,772	-0,239
$K_{\min}$	-0,236	0,743	0,587
$K_{\text{mean}}$	0,263	0,951	0,161
$K_{\text{int}}$	0,685	0,159	-0,643
$H$	0,147	0,149	0,826

(в)



шают соответствующие значения для главных кривизн и для интенсивности кривизны. Среди кривизн  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$  и  $K_{\text{int}}$ , имеющих стабильные умеренные значения коэффициента вариации, наименьшими значениями  $d$  обладает интенсивность кривизны. Значения  $d(K_{\text{int}})$  редко превышают единицу и лишь для платформ достигают величины 3,3.

Интересно отметить, что весьма схожие результаты были получены и при ином способе подсчета коэффициентов вариации, когда сначала рассчитывались средние значения параметров для каждого из регионов, входящих в ту или иную геоструктурную область, затем определялись средние значения и дисперсии в каждой из полученных таким образом групп, после чего определялись коэффициенты вариации. Такой “крупномасштабный” способ расчета дал сравнимые по величинам значения  $d$  и также показал, что из всех параметров кривизны наименьшим коэффициентом вариации обладает интенсивность кривизны  $K_{\text{int}}$ .

Таким образом, если в качестве критерия надежности определения величины той или иной геометрической характеристики кривизны выбрать значение коэффициента вариации, то из полученных результатов следует, что наиболее надежно опреде-

ляется интенсивность кривизны. Наоборот, средней кривизне соответствуют большие значения коэффициентов вариации, и, следовательно,  $M(K_{\text{mean}})$  ненадежно характеризует тот или иной тип тектонического развития. К тому же  $K_{\text{mean}}$ , как было выявлено на примере Восточно-Европейской платформы [Грачев и др., 1995а], проявляет наименьшую устойчивость к процедурам сглаживания данных с различным пространственным масштабом.

#### 5.4 Анализ геометрических характеристик, осредненных по регионам

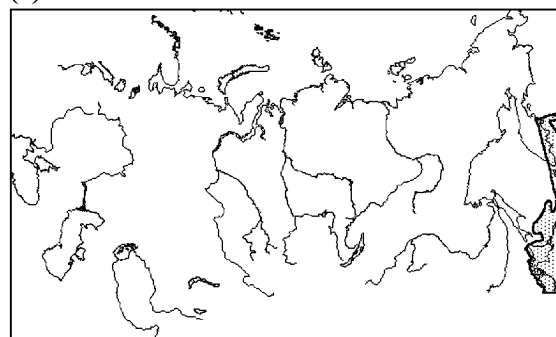
Интенсивность кривизны, надежность определения которой на масштабном уровне геоструктурных областей была отмечена в предыдущем разделе 5.3, имеет и дополнительные важные свойства, которых мы коснемся ниже (см. раздел 6). Поэтому представляет интерес рассмотреть свойства этой характеристики, а также свойства других параметров на масштабном уровне регионов, составляющих геоструктурные области. С этой целью для отдельных регионов в пределах каждой из областей были рассчитаны средние величины  $M$  амплитуды  $w$ , градиента  $Grad$ , максимальной  $K_{\max}$ , минимальной  $K_{\min}$ , средней  $K_{\text{mean}}$  и гауссовой  $H$  кривизн, интенсивно-

**Таблица 12.** Корреляционная матрица (а) и матрица факторных нагрузок (б) для островных дуг, построенные по 511 точкам. На врезке (в) показана исследуемая территория**(а)**

	$w$	$Grad$	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$	$H$
$w$	1,000	-0,251	-0,572	-0,437	-0,594	-0,175	-0,089
$Grad$	-0,251	1,000	0,147	-0,120	0,023	0,257	-0,015
$K_{\max}$	-0,572	0,147	1,000	0,457	0,868	0,585	-0,095
$K_{\min}$	-0,437	-0,120	0,457	1,000	0,838	-0,454	0,348
$K_{\text{mean}}$	-0,594	0,023	0,868	0,838	1,000	0,106	0,136
$K_{\text{int}}$	-0,175	0,257	0,585	-0,454	0,106	1,000	-0,413
$H$	-0,089	-0,015	-0,095	0,348	0,136	-0,413	1,000

**(б)**

	Факторы		
	1(42%)	2(28%)	3(15%)
$w$	-0,722	-0,03	-0,364
$Grad$	0,04	-0,05	0,937
$K_{\max}$	0,892	-0,385	0,104
$K_{\min}$	0,780	0,530	-0,221
$K_{\text{mean}}$	0,982	0,06	-0,06
$K_{\text{int}}$	0,183	-0,869	0,306
$H$	0,110	0,787	0,166

**(в)**

сти кривизны  $K_{\text{int}}$ , а также стандартные отклонения  $\sigma$  этих величин. Полученные результаты для всей территории Северной Евразии представлены в табл. 1 и на рис. 14а,б.

В настоящем разделе мы ограничимся одной частной задачей, заключающейся в ранжировании регионов внутри геоструктурных областей по величине интенсивности кривизны и анализом поведения при этом других геометрических характеристик. Результаты решения этой задачи для некоторых областей представлены на рис. 15.

На рис. 15а показаны осредненные геометрические характеристики поверхности ВДЗК для восьми платформенных областей, упорядоченные по величине интенсивности кривизны  $K_{\text{int}}$ . Возрастание  $K_{\text{int}}$  влечет возрастание положительных значений максимальной кривизны  $K_{\max}$  и модуля градиента  $Grad$  и уменьшение отрицательных значений минимальной кривизны  $K_{\min}$ . Слабую немонотонность в указанные зависимости вносит Берингова плита. Для нее характерно изометричное прогибание с поверхностью ВДЗК эллиптического типа. На это обстоятельство указывают, в частности, относительно большая положительная величина  $K_{\text{mean}}$  и отрицательное значение амплитуды  $w$ . Заметим, что сильная немонотонность кривой  $w$  свидетель-

ствует о слабой зависимости кривизн от амплитуды поднятия.

Для орогенических областей осредненные по площади региона геометрические характеристики существенно выше по своим абсолютным значениям, чем для платформ. Вместе с тем, график поведения этих характеристик, который построен для 14 орогенических областей Северной Евразии, упорядоченных по возрастанию интенсивности кривизны (рис. 15б), вполне аналогичен соответствующему графику для платформенных областей. Также как и для платформенных областей, ранжирование по осредненной величине  $K_{\text{int}}$  (от Охотско-Монгольского региона и Урала до горных сооружений Центральной Азии) автоматически означает и ранжирование по абсолютной величине главных кривизн. Единственное исключение составляет Таримская плита, для которой характерно заметное превышение средних значений  $K_{\max}$  и  $K_{\min}$  (а также  $K_{\text{mean}}$  и  $Grad$ ) над соответствующими значениями для близких по средней интенсивности кривизны Кавказу и Сахалинской орогенической области. Повидимому, как и для Беринговой плиты (рис. 15а), такое превышение возникает благодаря преобладанию в пределах Таримского бассейна изометричного прогибания эллиптического типа, что в некотором

**Таблица 13.** Факторные нагрузки для основных геоструктурных областей Северной Евразии

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Орогены	$F_{37\%} = \frac{K_{\text{mean}(0,97)} K_{\text{max}(0,8)} K_{\text{min}(0,7)}}{w_{(-0,67)}}$	$F_{35\%} = \frac{Grad_{(0,85)} K_{\text{int}(0,9)}}{K_{\text{min}(-0,65)}}$	$F_{13\%} = H_{(0,95)}$
Платформы	$F_{43\%} = \frac{K_{\text{min}(0,98)} K_{\text{mean}(0,75)}}{Grad_{(-0,75)} K_{\text{int}(-0,84)}}$	$F_{30\%} = \frac{K_{\text{max}(0,82)}}{H_{(-0,77)}}$	$F_{14\%} = w_{(-0,9)}$
Глубоководные моря	$F_{44\%} = \frac{Grad_{(0,89)} K_{\text{int}(0,69)}}{w_{(-0,76)}}$	$F_{30\%} = K_{\text{mean}(0,95)} K_{\text{max}(0,77)} K_{\text{min}(0,74)}$	$F_{12\%} = H_{(0,83)}$
Рифты	$F_{41\%} = \frac{K_{\text{mean}(0,97)} K_{\text{max}(0,84)} K_{\text{min}(0,56)}}{w_{(-0,79)}}$	$F_{35\%} = \frac{Grad_{(0,91)} K_{\text{int}(0,81)}}{K_{\text{min}(-0,68)}}$	$F_{12\%} = H_{(0,96)}$
Предрифты	$F_{39\%} = K_{\text{mean}(0,97)} K_{\text{max}(0,76)} K_{\text{min}(0,77)}$	$F_{32\%} = Grad_{(0,84)} K_{\text{int}(0,75)}$	$F_{13\%} = H_{(0,93)}$
Островные дуги	$F_{42\%} = \frac{K_{\text{mean}(0,98)} K_{\text{max}(0,9)} K_{\text{min}(0,78)}}{w_{(-0,72)}}$	$F_{28\%} = \frac{H_{(0,79)}}{K_{\text{int}(-0,87)}}$	$F_{15\%} = Grad_{(0,94)}$

смысле отличает эту впадину от других внутригорных впадин.<sup>3</sup> Отсутствие, как правило, участков эллиптического типа для орогенических областей подтверждается и малыми значениями осредненной величины  $K_{\text{mean}}$ . Также, как и для платформ, кривизны слабо коррелируют с амплитудами поднятий.

Впадины глубоководных морей, начиная с Черноморской, расположены в порядке возрастания осредненной интенсивности кривизны  $K_{\text{int}}$  на рис. 15в. Особенности поведения геометрических характеристик здесь существенно отличаются от рассмотренных выше орогенических и платформенных областей. В частности, интенсивность кривизны  $K_{\text{int}}$ , сохраняя высокую степень положительной корреляции с модулем градиента  $Grad$  и максимальной кривизной  $K_{\text{max}}$ , уже не коррелирует с минимальной кривизной  $K_{\text{min}}$ , но зато приобретает положитель-

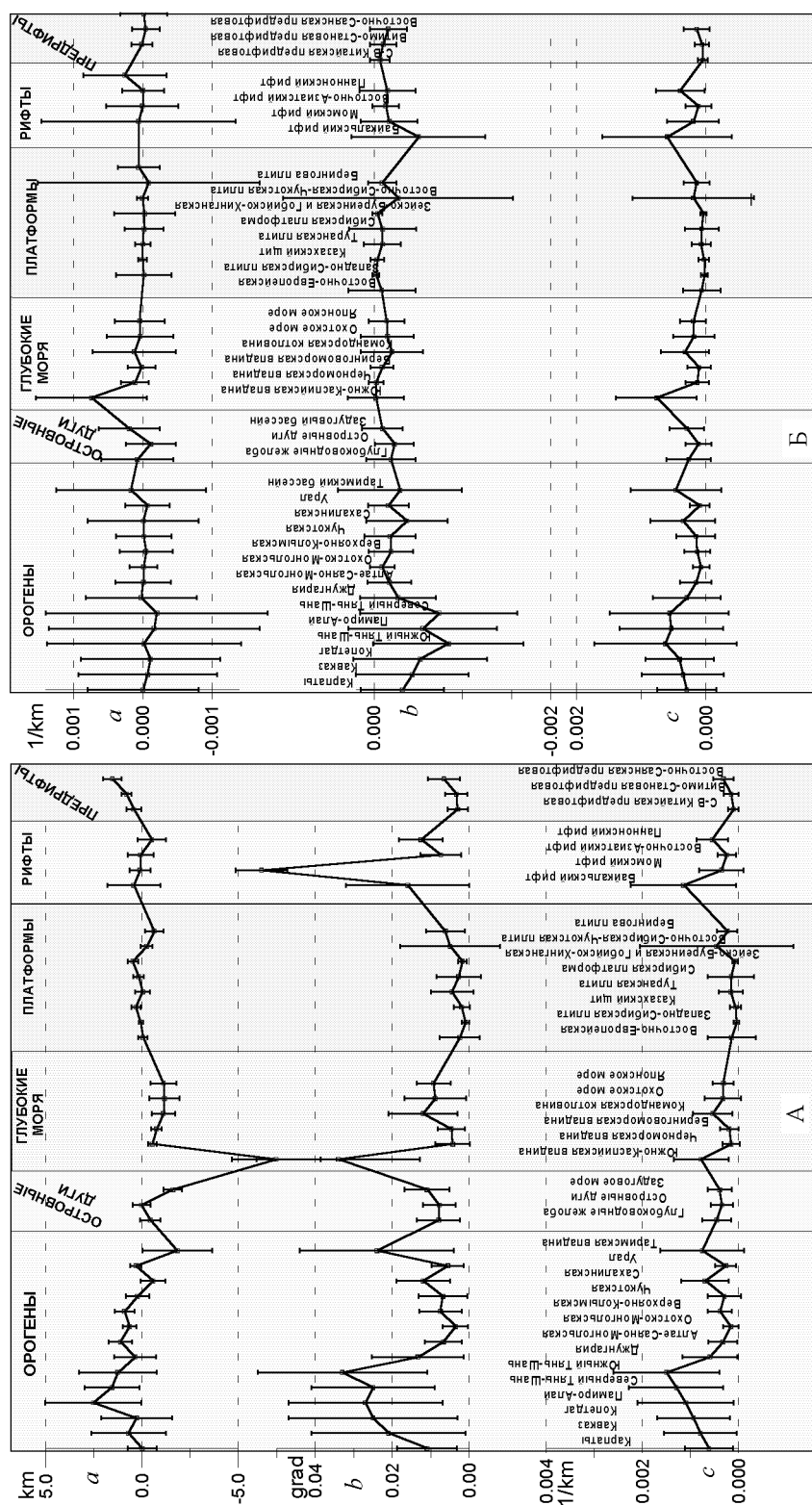
ную корреляцию со средней кривизной  $K_{\text{mean}}$ . Кроме того, коэффициент отрицательной корреляции  $K_{\text{int}}$  с амплитудой  $w$  выше по абсолютной величине, чем для платформ, а главные кривизны  $K_{\text{max}}$  и  $K_{\text{min}}$  приобретают слабую положительную корреляцию. Особое место занимает Южно-Каспийская впадина, которая по всем своим характеристикам полностью приближается к эллиптической поверхности.

Особенности поведения геометрических характеристик, осредненных по площади материковых рифтов, изучались для совокупности четырех рифтов. Из рис. 14г, на котором рассматриваемые регионы распределены по увеличению значений  $K_{\text{int}}$ , следует, что монотонность роста отдельных геометрических характеристик нарушается для Паннонского рифта. Повышенные по абсолютной величине отрицательное значение амплитуды и положительное значение средней кривизны придают поверхности ВДЗК этой рифтовой зоны более выраженные черты сходства с эллиптической поверхностью прогибания, чем для других материковых рифтов.

<sup>3</sup>Заметим, что высказанные предположения о заметном влиянии участков поверхности эллиптического типа в пределах Беринговой плиты и Таримского бассейна подтверждается визуальным анализом карты гауссовой кривизны (рис. 13).

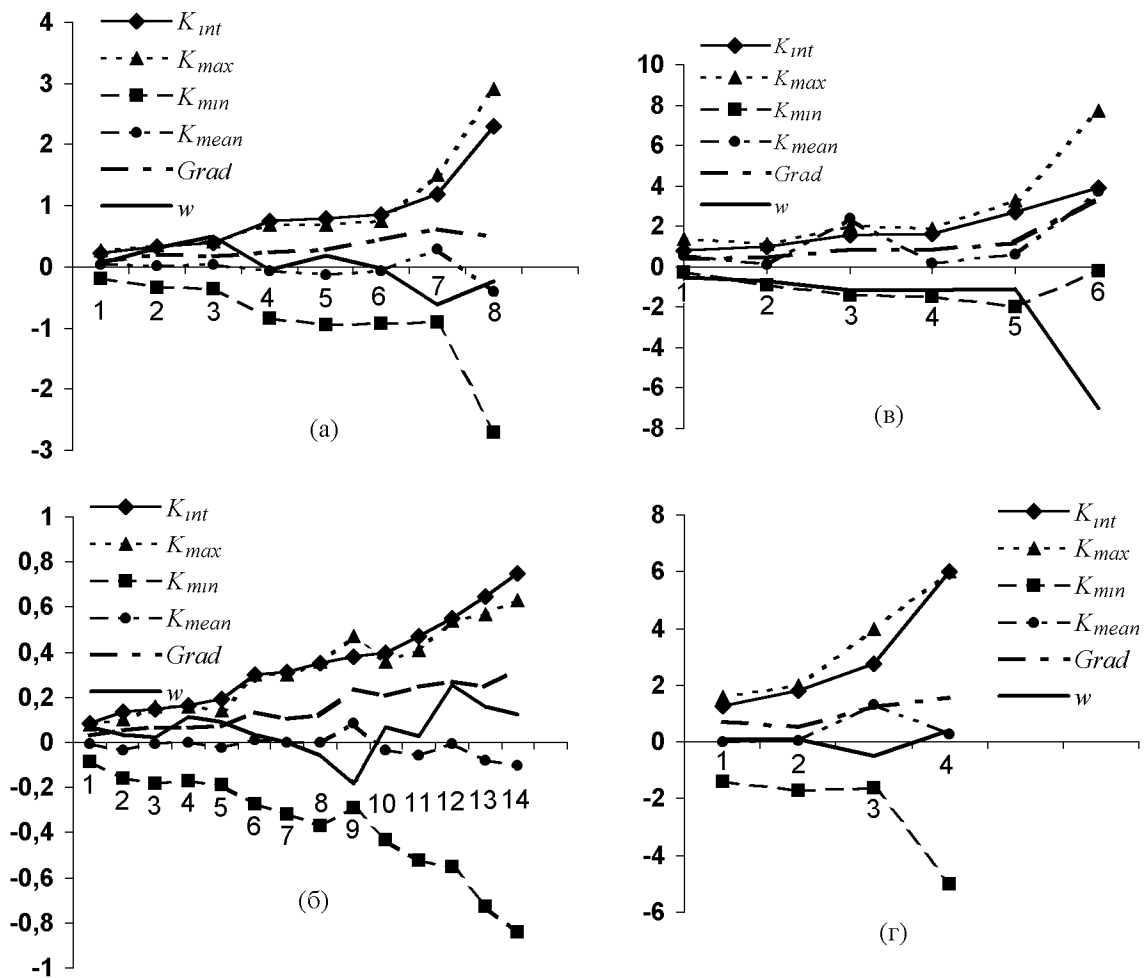
**Таблица 14.** Коэффициенты вариации для геометрических характеристик новейших тектонических движений основных геоструктурных областей Северной Евразии

	$w$	$Grad$	$K_{\text{mean}}$	$K_{\text{int}}$	$K_{\text{max}}$	$K_{\text{min}}$	$H$
Платформы	31,0	0,3	32,7	3,3	5,2	6,0	31,1
Орогены	2,1	1,2	26,7	1,1	2,0	1,8	16,0
Предрифты	0,9	0,9	11,5	0,8	1,4	1,6	9,6
Рифты	5,7	1,1	39,5	1,3	2,1	1,9	12,0
Глубокие моря	1,1	0,1	5,0	1,0	1,6	2,1	37,8
Островные дуги	2,4	0,5	18,3	0,6	1,4	1,2	18,1



**Рис. 14.** А – графики средних амплитуд – *a*, градиентов – *b*, и интенсивности кризис – *c*; Б – графики средней – *a*, минимальной – *b*, и максимальной – *c* кривизн для отдельных геоструктур Северной Евразии. Длина вертикальной черты соответствует величине стандартного отклонения внутри соответствующей области.





**Рис. 15.** Осредненные по площади соответствующего региона и упорядоченные по величине интенсивности кривизны  $K_{int}$  геометрические характеристики поверхности ВДЗК.

(а) – платформенные области. Единицы размерности: кривизн  $[10^{-4}/\text{км}]$ , амплитуд ВДЗК  $[\text{км}]$ , градиентов ВДЗК  $[10^{-2}\text{км}/\text{км}]$ . 1 – Западно-Сибирская плита, 2 – Казахский щит, 3 – Зейско-Бурсинская и Гобийско-Хинганская, 4 – Восточно-Европейская, 5 – Сибирская платформа, 6 – Туранская плита, 7 – Берингова плита, 8 – Восточно-Сибирско-Чукотская плита.

(б) – орогенетические области. Единицы размерности: кривизн  $[10^{-3}/\text{км}]$ , амплитуд ВДЗК  $[\text{км}]$ , градиентов ВДЗК  $[10^{-1}\text{км}/\text{км}]$ . 1 – Монголо-Охотская, 2 – Урал, 3 – Чукотская, 4 – Алтае-Саяно-Монгольская, 5 – Верхояно-Колымская, 6 – Джунгария, 7 – Карпаты, 8 – Сахалинская, 9 – Таримский бассейн, 10 – Кавказ, 11 – Копетдаг, 12 – Памиро-Алай, 13 – Северный Тянь-Шань, 14 – Южный Тянь-Шань.

(в) – впадины глубоководных морей. Единицы размерности: кривизн  $[10^{-3}/\text{км}]$ , амплитуд ВДЗК  $[\text{км}]$ , градиентов ВДЗК  $[10^{-2}\text{км}/\text{км}]$ . 1 – Черноморская, 2 – Берингоморская, 3 – Японская, 4 – Охотская, 5 – Командорская котловина, 6 – Южно-Каспийская.

(г) – районы континентальных рифтов. Единицы размерности: кривизн  $[10^{-3}/\text{км}]$ , амплитуд ВДЗК  $[\text{км}]$ , градиентов ВДЗК  $[10^{-2}\text{км}/\text{км}]$ . 1 – Восточно-Азиатский, 2 – Момский, 3 – Паннонский, 4 – Байкальский.

## 6. Обсуждение результатов

Проведенные выше исследования позволили построить набор карт достаточно полной совокупности дифференциальных геометрических характери-

стик новейших ВДЗК Северной Евразии. Проведение такого анализа геометрических (точнее, кинематических) характеристик является абсолютно необходимым первым шагом на пути построения геодинамической модели новейшего развития литосферы.

В дифференциальных характеристиках кривизны поверхности снимается зависимость от длинноволновых изменений амплитуды ВДЗК.<sup>4</sup> Поэтому, если брать в расчет только кинематические факторы, то возникает возможность провести классификацию новейших структурных форм не просто по признаку активности вертикальных движений, а по комплексу гораздо более тонких признаков – величин тех или иных характеристик кривизны или корреляционных зависимостей между ними.

Другая важная задача, которую мы ставили перед собой, заключалась в выявлении относительной важности той или иной геометрической характеристики и возможности ее применения в геолого-геофизических приложениях. В этой связи мы коснемся здесь, в основном, двух характеристик кривизны: гауссовой кривизны  $H$  и интенсивности кривизны  $K_{\text{int}}$ .

Гауссова кривизна (рис. 13, раздел 5) важна для решения вопроса о возможности изометричного изгиба поверхности в некоторую другую заданную поверхность (см. подробнее Приложение 2). Для осуществления такой возможности необходимо, чтобы обе эти поверхности обладали одинаковой гауссовой кривизной. Если предположить, что доновойшая поверхность литосферы была выровненной (т.е. ее гауссова кривизна была равна нулю) и тектонические движения происходили так, что длина любой материальной линии вдоль поверхности ВДЗК не изменялась, то образовавшаяся поверхность ВДЗК обязана обладать нулевой гауссовой кривизной. Наоборот, если при исходной выровненной поверхности образовавшаяся поверхность ВДЗК не принадлежит к параболическому типу, то заведомо при тектонических деформациях длины линий вдоль поверхности ВДЗК менялись. Вполне понятно, что затронутый вопрос имеет прямое отношение к проблеме определения сокращения земной коры (СКЗ) при ее изгибании вследствие тектонических движений.

Рассмотрим теперь некоторые другие геометрические параметры кривизны поверхности ВДЗК. Весьма правдоподобным и часто используемым в геофизической литературе является предположение, что деформирование литосферы при ВДЗК происходит по типу изгиба тонкой пластины или оболочки [см., например, *Мухамедиев, 1992; Теркот, Шуберт, 1985; Ershov, 1999; Goetze and Evans, 1979*]. Согласно гипотезе Кирхгофа-Лява, принятой в теории изгиба тонких пластин и оболочек, при изгибе внутри пластины или оболочки существует нерастяжи-

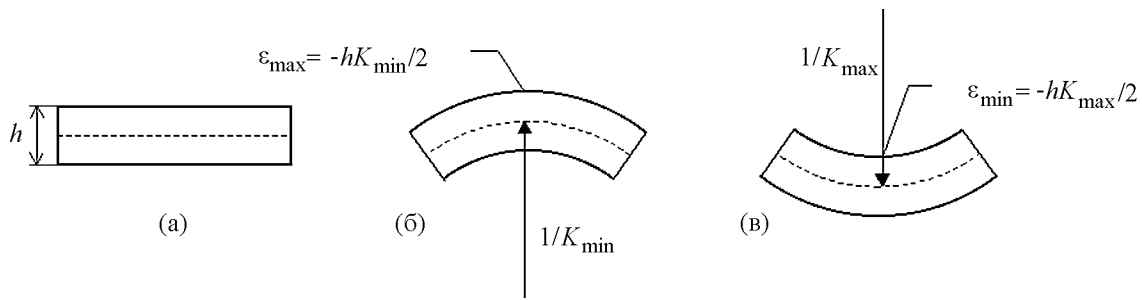
мая (срединная) поверхность, а материальные элементы, ортогональные к срединной поверхности до деформации, остаются нормальными к ней и после того, как пластина или оболочка (а, следовательно, и срединная поверхность) претерпит деформацию изгиба [*Амбарцумян, 1974; Надау, 1969*]. На положение срединной поверхности внутри пластины или оболочки может влиять целый ряд факторов [*Амбарцумян, 1974*], однако для простейшей модели однородной упругой изотропной литосферы при изотермических условиях глубина срединной поверхности в литосфере соответствует семантическому смыслу названия. Предполагается, что на положение срединной поверхности наиболее сильное влияние оказывают температурные изменения в литосфере [*Ershov, 1999*].

Моделирование деформации литосферы изгибом тонкой пластины весьма привлекательно для интерпретации определенных в настоящей работе геометрических параметров в терминах деформаций, т.к. в уравнения изгиба (при малых деформациях) в первом приближении не входят амплитуды горизонтальных тектонических движений, данные о которых, в силу их недостаточности, нами здесь не привлекались.

В работе [*Мухамедиев, 1992*] уравнения изгиба упругой однородной изотропной литосферы были представлены в таком виде, что в выражение для средних горизонтальных тектонических напряжений входит  $K_{\text{mean}}$ , а в выражение для максимального касательного напряжения в горизонтальной плоскости входит безразмерный параметр  $hK_{\text{int}}/2\gamma$ , где  $h$  – мощность литосферы, а  $\gamma$  – интенсивность горизонтальных глобальных сдвиговых деформаций. Соблазнительный вариант непосредственного перехода к определению тектонических напряжений в литосфере по упомянутым формулам, на основе рассчитанных в настоящей работе геометрических характеристик кривизны, наталкивается на ряд трудностей. Главной из них является отсутствие информации о глобальных (передающихся от краев литосферной плиты) горизонтальных напряжениях, которые не связаны напрямую с ВДЗК. К тому же нуждается в уточнении предположение об упругом характере изгибания, т.к. рассматривается длительный этап неотектонического развития. Поэтому необходимым этапом на пути к определению напряжений является получение на основе геометрических характеристик кривизны поверхности ВДЗК информации о возмущениях деформированного состояния литосферы.

*А. Ф. Грачев и др.* [1996], используя необременительные предположения, получили формулу, в которой тензор скорости неотектонической деформации выражался через скорости изменения средней

<sup>4</sup>Слабая зависимость различных характеристик кривизны от амплитуды  $w$  была продемонстрирована полученными выше результатами.



**Рис. 16.** Связь главных кривизн с главными горизонтальными деформациями на поверхности литосферы в рамках гипотезы Кирхгофа-Лява. Пунктиром обозначена срединная поверхность литосферного блока.

*a* – исходное невозмущенное состояние блока литосферы;

*б* – сечение деформированного блока литосферы вдоль направления главной кривизны  $K_{\min}$ ;

*в* – сечение деформированного блока литосферы вдоль направления главной кривизны  $K_{\max}$ .

кривизны  $K_{\text{mean}}$  и интенсивности кривизны  $K_{\text{int}}$ . Здесь мы продемонстрируем связь характеристик кривизны поверхности ВДЗК с возмущениями горизонтальных деформаций на простейшем примере изгиба при выполнении гипотезы Кирхгофа-Лява (рис. 16). Возмущения деформаций по глубине литосферы распределены линейно, причем экстремальные (главные) значения деформаций достигаются в сечениях, совпадающих с сечениями главных кривизн. На поверхности литосферы в направлении главной кривизны  $K_{\min}$  реализуется максимальная, главная деформация  $\varepsilon_{\max} = -hK_{\min}/2$ , а в направлении  $K_{\max}$  – минимальная главная деформация  $\varepsilon_{\min} = -hK_{\max}/2$ .

В разделе 5.3 было выявлено, что из всех характеристик кривизны наиболее надежно определяется интенсивность кривизны  $K_{\text{int}}$ . Эта характеристика обладает и прозрачным геометрическим смыслом. Действительно из приведенных выше рассуждений следует, что  $K_{\text{int}} = 2\gamma/h$ , где  $\gamma = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/2$  – интенсивность горизонтальных деформаций сдвига в верхних слоях литосферы. Последняя связана с максимальным касательным напряжением и, по-видимому, с сейсмической активностью. Поэтому характеристика интенсивности кривизны  $K_{\text{int}}$  обладает особым значением по сравнению с другими характеристиками кривизны. В частности, можно ожидать корреляции  $K_{\text{int}}(x, y)$  с пространственными особенностями сейсмичности – накопленным сейсмическим моментом, максимально возможной магнитудой землетрясений, их частотой и т.д.

## 7. Заключение

В работе исследованы геометрические характеристики деформирования поверхности литосферы Се-

верной Евразии, вызванные вертикальной составляющей новейших тектонических движений, и построены соответствующие карты-схемы. Выявлены особенности деформирования как для различных геоструктурных областей, так и для отдельных регионов в их пределах, имеющих различный тип тектонического развития. Проведенное исследование результатов на основе визуального, факторного и корреляционного анализа, а также рассмотренные модельные примеры показали наличие на изучаемой территории различных типов деформирования. В частности, для орогенических и, в несколько меньшей степени, для платформенных областей характерны параболический и гиперболический типы поверхности ВДЗК, которым присуще наличие линейных антиклинальных и синклинальных складок основания, а также участков, на которых главные кривизны имеют разные знаки. Поверхность ВДЗК впадин глубоководных морей более близка по типу к эллиптическим поверхностям, характеризуемым изометричными прогибами с положительными главными кривизнами. Разные типы поверхности имеют, по-видимому, разный физический механизм, вызывающий вертикальные тектонические движения.

Если деформирование литосферы на выбранном при расчетах масштабном уровне соответствует гипотезам, принятым в теории тонких пластин и оболочек, то геометрические характеристики кривизны поверхности ВДЗК могут быть истолкованы как кинематические характеристики кривизны изгиба литосферы.

Геометрические характеристики поверхности ВДЗК могут позволить приблизиться к построению полей напряжений на основе постулирования связи надежно определенных элементов поля деформаций с соответствующими элементами напряженного состояния. Например, если принять, что модель из-

гиба литосферы является адекватной, то полученные в настоящей работе результаты после принятия той или иной реологической модели могут позволить определить распределение таких силовых факторов как изгибающие моменты и перерезывающие силы, а также получить приближенное распределение напряжений по глубине. В любом случае, однако, напряжения, получаемые на основе данных о ВДЗК, являются в некотором смысле возмущениями глобального двумерного поля напряжений, возникающего из-за воздействия силовых факторов на границах плиты. Само это поле, строго говоря, без дополнительных гипотез о взаимосвязи ВДЗК с горизонтальными деформациями литосферы на основе используемых данных определено быть не может.

## Приложение 1

### Квадратичные формы и главные кривизны поверхности

Свойства поверхностей изучаются в курсе дифференциальной геометрии (см., например, [Погорелов, 1969; Постников, 1979; Thorpe, 1979]). Поверхность – это образ двумерного открытого множества  $W$ , точками которого являются числа  $u$  и  $v$ , в трехмерное евклидово пространство  $E$ . Отображение задается векторнозначной функцией

$$\Phi: \mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v). \quad (\text{П1.1})$$

Параметры  $u$  и  $v$  называют криволинейными координатами на поверхности. Отношение их приращений  $du/dv$  определяет некоторое направление на поверхности  $\Phi$ .

В настоящей работе рассматриваются лишь гладкие отображения (П1.1). Поверхность  $\Phi$  в (П1.1) называется регулярной поверхностью, если для любой точки  $(u, v)$  векторы

$$\mathbf{r}_u = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u} \text{ и } \mathbf{r}_v = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial v} \quad (\text{П1.2})$$

являются линейно независимыми. Поверхность (П1.1) имеет в каждой точке единственную касательную плоскость, определяемую единичным вектором нормали  $\mathbf{n}$ . В каждой данной точке эта плоскость параллельна векторам (П1.2). Естественно, что параметризация поверхности (П1.1) не единственна – ее всегда можно перепараметризовать (не меняя, конечно, самой поверхности), например, выбрав какие-либо гладкие функции  $u = u(u_1, v_1)$ ,  $v = v(u_1, v_1)$ , подставив их в (П1.1) и выразив  $\mathbf{r}$  уже как функцию этих новых переменных  $u_1, v_1$ .

На основе дифференциала вектора (П1.1)

$$d\mathbf{r} = \mathbf{r}_u du + \mathbf{r}_v dv \quad (\text{П1.3})$$

записывается первая квадратичная форма поверхности  $I$ , определяемая как скалярное произведение вектора  $d\mathbf{r}$  на себя

$$I = d\mathbf{r} \cdot d\mathbf{r} = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2. \quad (\text{П1.4})$$

Форма  $I$  задает метрику поверхности: через нее выражаются длины дуг на поверхности, углы между кривыми на поверхности, площади на поверхности и т.д.

Вторая квадратичная форма поверхности  $II$  зависит от изменения вектора единичной нормали  $\mathbf{n}$  вдоль поверхности

$$d\mathbf{n} = \mathbf{n}_u du + \mathbf{n}_v dv \left( \mathbf{n}_u = \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial u}, \mathbf{n}_v = \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial v} \right) \quad (\text{П1.5})$$

и определяется как

$$II = -d\mathbf{n} \cdot d\mathbf{r} = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2. \quad (\text{П1.6})$$

Значения первой и второй квадратичных форм зависят в каждой точке от выбранного направления  $du/dv$ .

Важные свойства поверхности задаются характеристиками ее кривизны. В конечном счете понятие кривизны поверхности восходит к понятию кривизны кривой, которая определяется как предел отношения угла между касательными в точках  $A$  и  $B$  кривой к длине отрезка дуги  $AB$  при стремлении длины отрезка к нулю. Нормальная кривизна поверхности в данном направлении  $du/dv$  с точностью до знака равна кривизне кривой, которая получается в сечении поверхности с плоскостью, перпендикулярной касательной плоскости и содержащей данное направление  $du/dv$ . В дифференциальной геометрии установлено, что нормальная кривизна поверхности в некотором направлении  $du/dv$  равна отношению квадратичных форм  $II/I$ , вычисленному для этого направления. Таким образом, каждая точка поверхности характеризуется бесконечным множеством нормальных кривизн.

В каждой точке поверхности существует два взаимно-перпендикулярных направления (1) и (2), при дифференцировании по которым приращение  $d\mathbf{n}$  вектора нормали пропорционально приращению  $d\mathbf{r}$

$$d\mathbf{n}_{(1)} = -K_1 d\mathbf{r}_{(1)}, \quad d\mathbf{n}_{(2)} = -K_2 d\mathbf{r}_{(2)}. \quad (\text{П1.7})$$

Эти направления называются главными, а соответствующие коэффициенты пропорциональности  $K_1$  и  $K_2$  в (П1.7) называются главными кривизнами. В шаровой точке ( $K_1 = K_2$ ) и в точке уплощения ( $K_1 =$

$K_2 = 0$ ) любое направление является главным. Главные кривизны совпадают с экстремальными значениями множества нормальных кривизн поверхности в данной точке. Полусумма главных кривизн

$$K_{\text{mean}} = \frac{1}{2}(K_1 + K_2) \quad (\text{П1.8})$$

называется главной кривизной поверхности, а их произведение

$$H = K_1 K_2 \quad (\text{П1.9})$$

определяет гауссову (полную) кривизну. Модуль разности главных кривизн

$$K_{\text{int}} = \frac{1}{2}|K_1 - K_2| \quad (\text{П1.10})$$

мы называем интенсивностью кривизны. Существует следующая классификация точек поверхности: точка является

- параболической, если  $H=0$  и точка не является точкой уплощения (рис. 2),
- эллиптической, если  $H>0$  (рис. 3),
- гиперболической, если  $H<0$  (рис. 4).

Классификация основана на типе параболоида, соприкасающегося с поверхностью в данной точке. Если все точки поверхности являются точками одного типа, то в тексте настоящей работы иногда название типа точки переносится на поверхность, т.е. поверхность может быть названа параболической, эллиптической или гиперболической.

Главные кривизны  $K_1$  и  $K_2$  являются корнями квадратного уравнения

$$K^2 (EG - F^2) - K (LG - 2MF + NE) + (LN - M^2) = 0, \quad (\text{П1.11})$$

коэффициенты которого выражаются через коэффициенты первой (П1.4) и второй (П1.6) квадратичных форм. Если поверхность задана в декартовой системе координат  $x, y, z$  уравнением

$$z = w(x, y), \quad (\text{П1.12})$$

то коэффициенты квадратичных форм вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} E &= 1 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2, \quad F = \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}, \\ G &= 1 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2, \\ L &= \frac{\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2}}, \\ M &= \frac{\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2}}, \\ N &= \frac{\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (\text{П1.13})$$

В случае пологой поверхности, когда квадратами первых производных от функции  $w(x, y)$  можно пренебречь по сравнению с единицей, приведенные формулы для расчета главных кривизн совпадают с формулами для нахождения собственных значений тензора кривизны-кручения  $\nabla \otimes \nabla w$ . В тексте настоящей работы максимальная из главных кривизн обозначается через  $K_{\text{max}}$ , а минимальная – через  $K_{\text{min}}$ .

## Приложение 2

### Отображение поверхностей

Пусть  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – регулярные поверхности. Топологическое отображение  $\Phi_1$  на  $\Phi_2$  называется конформным, если оно сохраняет углы между кривыми в том смысле, что соответствующие кривые на этих поверхностях пересекаются под одинаковыми углами. Для конформности отображения  $\Phi_1$  на  $\Phi_2$  необходимо и достаточно пропорциональности их первых квадратичных форм (при соответствующей параметризации и при сопоставлении точек с одинаковыми координатами).

Поверхности  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  называются изометричными, если существует взаимно-однозначное отображение  $\Phi_1$  на  $\Phi_2$ , при котором соответствующие кривые на этих поверхностях имеют одинаковые длины. Если регулярные поверхности  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  можно параметризовать так, что их первые квадратичные формы будут совпадать, то поверхности изометричны. Обратное, если поверхности  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  изометричны, то они могут быть параметризованы так, что их первые квадратичные формы будут одинаковыми.

Отображение одной поверхности на другую называется эквиареальным, если соответствующие при этом отображении области имеют одинаковую площадь.

При изометричном отображении сохраняются углы между кривыми и площади (т.е. изометричное отображение является одновременно конформным и эквиареальным). Обратное также верно: если отображение одной поверхности на другую конформно и эквиареально, то оно изометрично. Представив поверхность выполненной из гибкого, но нерастяжимого материала и произвольно изгибая ее, мы не изменим длин лежащих на них кривых и, следовательно, получим изометричную поверхность. Основываясь на этом, математики XIX века стали называть изометрии изгибаниями.

Согласно теореме Гаусса (*theorema egregium*) гауссова кривизна  $H$  поверхности не меняется при изгибаниях (изометриях), т.е. изометричные поверхности в соответствующих друг другу точках имеют одинаковую гауссову кривизну. Отсюда, в частности, следует, что никакую сколь угодно малую часть сферы нельзя изогнуть на плоскость. Изометрично изгибаемые (развертывающиеся) на плоскость поверхности должны обладать нулевой, полной кривизной. Хорошо известными примерами развертывающихся поверхностей являются цилиндр и конус, принадлежащих к так называемому классу линейчатых поверхностей.

## Литература

- Амбарцумян С. А., *Общая теория анизотропных оболочек*, 446 с., Наука, Москва, 1974.
- Гзовский М. В., Геофизическая интерпретация данных о новейших и современных глубинных тектонических движениях, в кн.: *Современные движения земной коры*, № 1, сс. 37–63, Изд-во АН СССР, Москва, 1963.
- Гзовский М. В., Градиент скорости движения, напряженное состояние коры и энергия тектонических процессов новейшего времени, в кн.: *Тектонические движения и новейшие структуры земной коры*, сс. 30–37, Недра, Москва, 1967.
- Гзовский М. В., Крестников В. Н., Рейснер Г. И., Геологические методы количественной характеристики среднего градиента скорости вертикальных тектонических движений, *Изв. АН СССР, серия геофиз.*, (8), 41–52, 1959.
- Грачев А. Ф., *Рифтовые зоны Земли*, 238 с., Недра, Ленинград, 1977.
- Грачев А. Ф., *Рифтовые зоны Земли*, 2-е изд., перераб. и доп., 278 с., Недра, Москва, 1987.
- Грачев А. Ф., Основные проблемы новейшей тектоники и геодинамики Северной Евразии, *Физика Земли*, (12), 5–36, 1996.
- Грачев А. Ф., Блюмштейн Э. И., Проблема эволюции вулканизма рифтовых областей Земли, в кн.: *Эволюция вулканизма в истории Земли*, сс. 74–81, Москва, 1974.
- Грачев А. Ф., Калашникова И. В., Магницкий В. А., Скорости деформирования литосферы и сейсмичность, *Докл. АН СССР*, 302, (3), 579–582, 1988.
- Грачев А. Ф., Калашникова И. В., Лапушонков И. Л., Магницкий В. А., О связи кривизны современных деформаций земной коры Паннонского бассейна с сейсмичностью, *Изв. АН СССР. Физика Земли*, (9), 3–8, 1989.
- Грачев А. Ф., Калашникова И. В., Магницкий В. А., Современные движения земной коры и сейсмичность, *Физика Земли*, (11), 3–11, 1990.
- Грачев А. Ф., Калашникова И. В., Магницкий В. А., Современная и новейшая геодинамика и сейсмичность Китая, *Физика Земли*, (10), 3–13, 1993.
- Грачев А. Ф., Магницкий В. А., Мухамедиев Ш. А., Юнга С. Л., Тензорные характеристики современных изгибных деформаций литосферы Восточно-Европейской платформы, *Докл. РАН*, 340, (2), 250–255, 1995а.
- Грачев А. Ф., Магницкий В. А., Мухамедиев Ш. А., Юнга С. Л., Тензорные характеристики неотектонических изгибных деформаций и кривизны поверхности фундамента литосферы Восточно-Европейской платформы, *Докл. РАН*, 340, (3), 396–399, 1995б.
- Грачев А. Ф., Магницкий В. А., Мухамедиев Ш. А., Юнга С. Л., К определению максимально возможных магнитуд землетрясений на Восточно-Европейской платформе, *Физика Земли*, (7), 3–20, 1996.
- Карта новейшей тектоники Северной Евразии в масштабе 1:5000000*, Главный редактор А. Ф. Грачев, Изд. НииЗарубежгеологии, Москва, 1996.
- Корн Г., Корн Т., *Справочник по математике*, 832 с., Наука, Москва, 1974.
- Мещеряков Ю. А., Вековые движения земной коры. Некоторые итоги и задачи исследований, в кн.: *Современные движения земной коры*, № 1, сс. 7–32, Изд. АН СССР, Москва, 1963.
- Мишин В. И., Грачев А. Ф., Блюмштейн Э. И., Кластерный анализ и проблема классификации базальтоидного вулканизма рифтовых областей Земли, *Вестн. Ленинград. ун-та, Серия геол. и географ.*, (12), 133–140, 1974.
- Мухамедиев Ш. А., Изгиб литосферы как причина некоторых сейсмотектонических явлений, *Докл. АН СССР*, 324, (5), 986–989, 1992.
- Надаи А., *Пластичность и разрушение твердых тел*, т. 2, Мир, Москва, 1969.
- Николаев Н. И., Шенкарева Г. А., Карта градиентов скорости новейших тектонических движений территории СССР, в кн.: *Тектонические движения и новейшие структуры земной коры*, сс. 37–43, Недра, Москва, 1967.
- Новейшая тектоника Северной Евразии*, Объяснительная записка к карте новейшей тектоники Северной Евразии масштаба 1:5000000 под редакцией А. Ф. Грачева, 147 с., ГЕОС, Москва, 1998.
- Погорелов А. В., *Дифференциальная геометрия*, 176 с., Наука, Москва, 1969.
- Постников М. М., *Линейная алгебра и дифференциальная*

- геометрия*, 312 с., Наука, Москва, 1979.
- Теркот Д., Шуберт Дж., *Геодинамика*, ч. 1, 374 с., ч. 2, 730 с., Мир, Москва, 1985.
- Турчак Л. И., *Основы численных методов*, 312 с., Наука, Москва, 1987.
- Biot M. A., *Mechanics of incremental deformations*, 561 p., N.-Y., London, Sydney: J. Wiley & Sons. 1965.
- Ekman M., Gaussian and mean curvatures of postglacial land uplift as expanded in surface spherical harmonics and the origin of earthquakes in Fennoscandia, in: *5th Int. Symp. "Geodesy and Physics of the Earth"*, Part III, p. 55–71, Potsdam, 1985.
- Ekman M. Gaussian curvatures of postglacial rebound and the discovery of caves created by major earthquakes in Fennoscandia, in: *6th Int. Symp. "Geodesy and Physics of the Earth"*, Part III, p. 48–61, Potsdam, 1989.
- Ershov A. V., Effective middle surface of lithosphere, *Earth and Planetary Science Letters*, 173, (1–2), 129–141, 1999.
- Goetze C., and Evans B., Stress and temperature in the bending lithosphere as constrained by experimental rock mechanics, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 59, (4), 463–478, 1979.
- Lisle R. J., Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 78, 1811–1819, 1994.
- Nothard S., McKenzie D., Haines J., and Jackson J., Gaussian curvature and relationship between the shape and the deformation of the Tonga slab, *Geophys. J. Int.*, 127, 311–327, 1996.
- Thorpe J. A., *Elementary topics in differential geometry*, 360 p., N.-Y., Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag. 1979.

(Поступила в редакцию 15 февраля 2000.)