

УДК 550.312

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИНЦИПА ИЗОСТАЗИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2002 г. П. О. Соболев, Ю. М. Эринчек

Представлено академиком Д.В. Рундквистом 23.07.2001 г.

Поступило 26.07.2001 г.

Одним из методов изучения изостазии земной коры является использование результатов глубинных сейсмических работ [1, 2]. С другой стороны, использование принципа изостазии позволяет проверять и уточнять модели земной коры. Ранее большинство таких работ проводилось по отдельным профилям, в последние годы обобщения сейсмических профильных работ и развитие методов цифровой картографии позволили перейти к анализу больших территорий. Недавно во Всероссийском геологическом институте завершилась работа по составлению карты рельефа поверхности Мохоровичича (поверхности М) [3]. Карта охватывает всю территорию России и прилегающие акватории, она является одним из последних обобщений глубинных профильных сейсмических исследований. В ходе этой работы выполнена обобщенная количественная характеристика важнейших параметров земной коры и оценены корреляционные связи между ними. Полученные зависимости подтверждают справедливость принципа изостазии в региональных масштабах и допускают простую интерпретацию, указывающую на различие глубинных геодинамических процессов разных областей.

Карта глубин поверхности М показана в виде набора ячеек 50×50 км (рис. 1). Для ее статистического анализа на основе Тектонической карты ... [4] была составлена обобщенная схема тектонического районирования. Всего было выделено 38 тектонических подразделений (рис. 2). В основу их выделения положены два критерия – возраст завершающей складчатости консолидированной коры и структурный тип (складчатая область, плита, шельфовые и океанические области); при этом в связи с достаточно мелким масштабом исследований из рассмотрения исключались

пограничные зоны. Большинство границ выделенных областей соответствует основным границам на тектонической карте или крупным глубинным разломам. Дополнительно были использованы две открытые цифровые базы данных: карта превышений рельефа ETOPO5 (NOAA National Data Centers) – пятиминутная матрица высот для всей Земли и карта глубин до поверхности фундамента с разрешением 10 км для территории Евразии (Geoscience Interactive Databases, Cornell University/INSTOC).

В результате обработки данных по элементарным ячейкам 50×50 км для каждой области были подсчитаны средние значения и стандартные отклонения глубины поверхности М, величины превышения рельефа твердой Земли, глубины фундамента и мощности консолидированной земной коры основных тектонических элементов территории России (табл. 1). Распределения для большинства регионов близки к нормальным. Построенные парные диаграммы показывают четкую взаимную корреляцию средних значений мощности консолидированной коры t_c (получена как разность глубины М и глубины фундамента), превышения рельефа h и мощности осадочного чехла t_s (сумма глубины фундамента и превышения) (рис. 3б). На графиках выделяется два типа структур, каждый из которых образует линейный ряд (несколько областей были исключены из дальнейшего анализа из-за недостатка данных или малого размера). К первому типу (условно будем называть его “переходным”) принадлежат океанические и шельфовые участки Северного Ледовитого океана (за исключением региона Баренцева моря и Таймыра) и окраинные моря Тихого океана, для всех этих структур характерно наличие морских бассейнов разной глубины и сравнительно малая мощность осадочного чехла (2–4 км). Ко второму типу (“континентальный” тип) относится большинство континентальных структур России – древние платформы, молодые плиты и шельфовые области Баренцева и Карского морей, а также складчатые области Забайкалья, Северо-Востока и Дальнего Востока. Вариации мощности осадочного чехла здесь намного боль-

*Международный институт теории прогноза
землетрясений и математической геофизики
Российской Академии наук, Москва*

*Всероссийский научно-исследовательский
геологический институт им. А.П. Карпинского,
Санкт-Петербург*

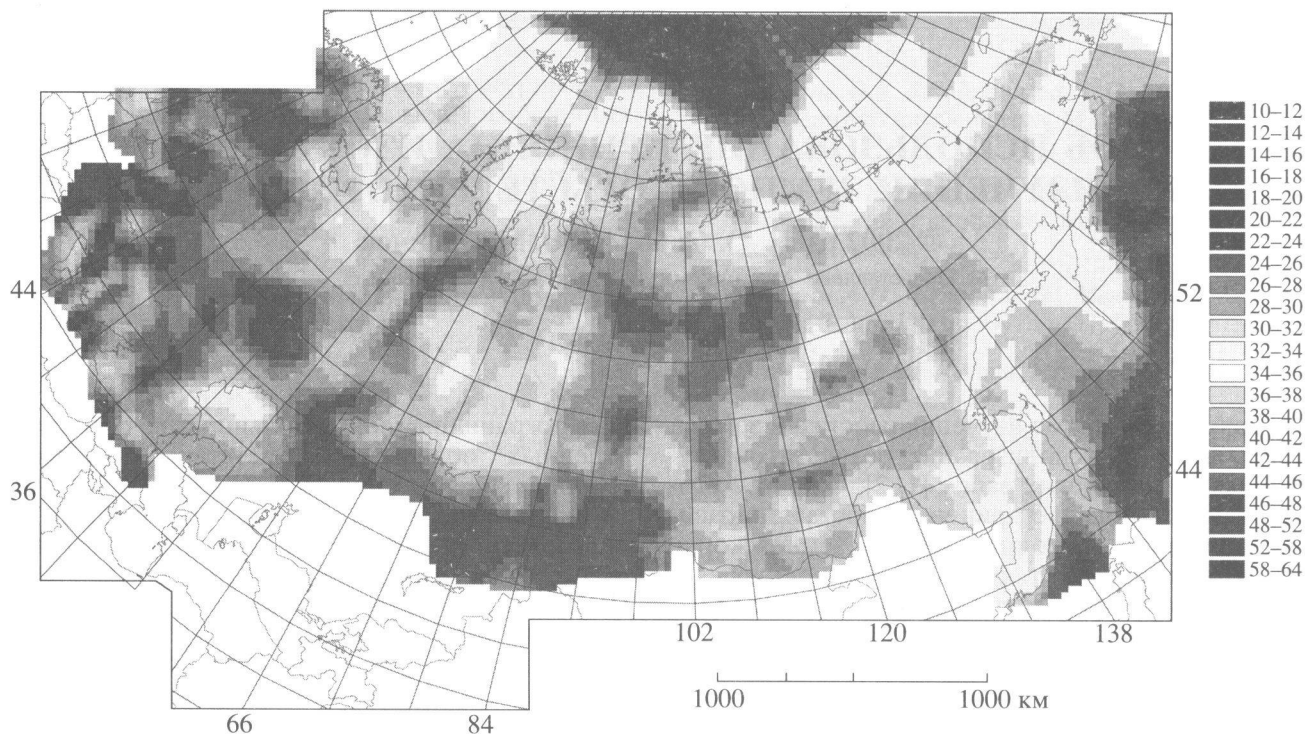


Рис. 1. Карта глубин поверхности М территории России и прилегающих акваторий.

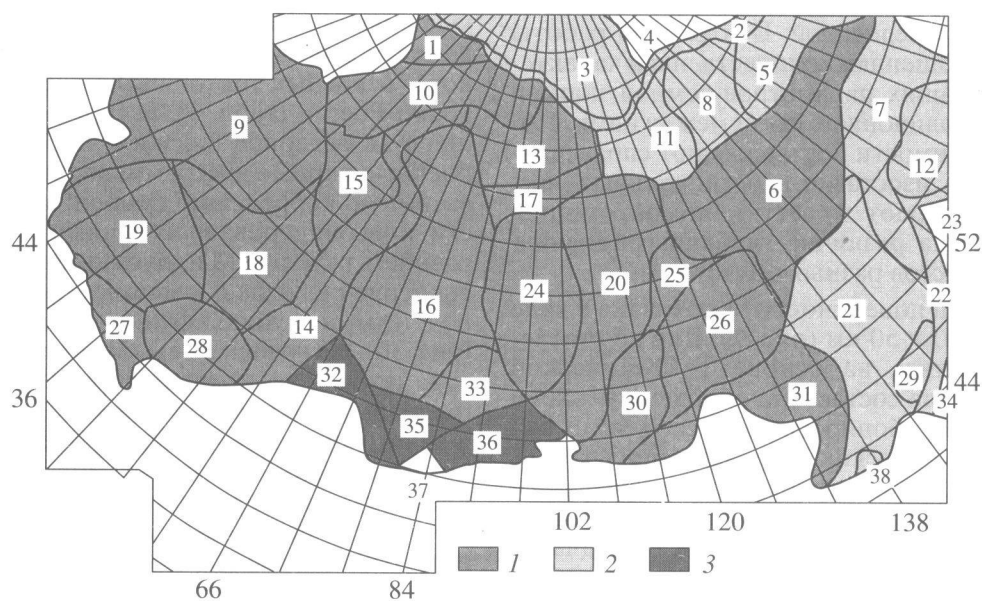


Рис. 2. Схема основных тектонических подразделений территории России (показаны структуры трех типов (1–3), объяснение в тексте). Номера структур соответствуют номерам в табл. 1.

ше, достигают 10–15 км для глубоких прогибов. Как подтип второго ряда можно рассматривать складчатые области Казахстана, Алтая, Тувы, характеризующиеся отсутствием осадочного чехла и повышенной мощностью земной коры.

Сопоставление средних величин глубин поверхности М, фундамента и рельефа позволило оценить изостатическое равновесие земной коры в региональном масштабе и определить плотность консолидированной земной коры. При

Таблица 1. Характеристика земной коры основных тектонических элементов территории России и прилегающих акваторий

№ п.п.	Тектонические элементы	Число ячеек 50 × 50 км	Глубина поверхности <i>M</i> , км		Превышение рельефа твердой Земли, м		Глубина поверхности фундамента, м		Мощность консолидированной коры, км	
			среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.
1	Плита Свальбард	88	35.1	1.9	-232	243	6420	1612	29.3	2.8
2	Континентальный склон	138	29.3	2.9	-1189	703	3391	2043	26.7	4.2
3	Евразийский бассейн	392	16.1	4.6	-3406	574	4950	1513	12.8	5.5
4	Амеразийский бассейн	98	22.5	2.0	-2404	452				
5	Бассейн Чукотского моря	197	31.3	1.3	-47	50	2819	961	29.0	1.8
6	Верхояно-Колымская область	934	38.6	2.3	553	438	259	615	38.6	2.4
7	Камчатский блок	439	31.0	2.1	156	391	1313	2142	30.3	3.9
8	Бассейн Восточно-Сибирского моря	231	35.3	0.9	-47	93	2464	1638	33.4	2.1
9	Фенноскандия	820	43.6	5.1	104	146	998	1381	42.9	5.4
10	Баренцевоморский бассейн	375	35.4	2.7	-236	157	11719	5758	24.2	5.1
11	Бассейн моря Лаптевых	219	31.2	2.1	-40	106	2627	1905	29.0	2.8
12	Бассейн Берингова моря	177	17.4	3.7	-3068	1035	6420	1667	11.4	4.4
13	Таймырский блок	269	39.6	2.7	28	167	1878	2268	38.0	3.6
14	Уральский пояс	494	43.1	3.6	208	189	1998	3111	41.3	4.7
15	Тимано-Печорский блок	217	40.3	2.5	40	87	5329	4123	35.4	4.2
16	Западно-Сибирская плита	904	38.8	2.4	57	73	6665	3927	32.6	4.2
17	Енисей-Хатангский мегапрогиб	118	40.7	2.6	52	35	9873	2450	31.3	3.6
18	Волго-Уралья	474	43.1	3.2	142	44	2748	1635	40.9	4.2
19	Сарматия	545	44.4	3.9	149	74	1910	3082	42.9	5.2
20	Сибирская платформа	643	41.7	3.4	372	197	2422	1516	39.7	3.5
21	Охотоморский блок	729	28.5	3.2	-480	667	3445	1929	25.5	4.1
22	Островная дуга	128	22.6	2.4	-1333	1388	4246	1371	18.8	2.7
23	Глубоководный желоб	32	17.3	3.1	-4944	1141	6808	1039	10.9	3.2
24	Тунгусский прогиб	479	43.7	2.6	421	211	4942	2638	39.2	3.8
25	Вилуйская впадина	97	38.2	2.8	249	186	7066	3939	31.6	5.1
26	Алданский блок	458	40.6	2.2	673	355	643	1497	40.2	2.8
27	Скифская плита	132	43.1	4.1	512	847	4792	4202	38.6	6.5
28	Прикаспийская впадина	244	39.7	3.1	42	74	14047	4395	26.1	6.9
29	Курильская дуга	69	15.6	2.6	-2967	515	7137	1173	8.9	3.1
30	Байкальский пояс	223	41.2	2.4	1002	305	0	2	41.2	2.4
31	Амурский блок	374	37.5	2.7	513	344	92	324	37.4	2.7
32	Казахстанская область	157	45.6	2.5	332	220	477	783	45.3	2.9
33	Саянский блок	164	43.4	2.9	292	226	1287	1980	42.3	4.0
34	Глубоководный желоб	11	24.5	2.2	-3489	1602	8220	1903	16.7	4.0
35	Алтайский блок	116	47.1	2.8	312	270	382	799	46.8	3.2
36	Тувинский блок	186	49.4	3.1	1446	558	0	0	49.4	3.1
37	Южно-Алтайский блок	22	45.0	1.4	853	427	0	0	45.0	1.4
38	Японский бассейн	13	16.6	1.0	-3568	126	5820	585	11.1	1.0

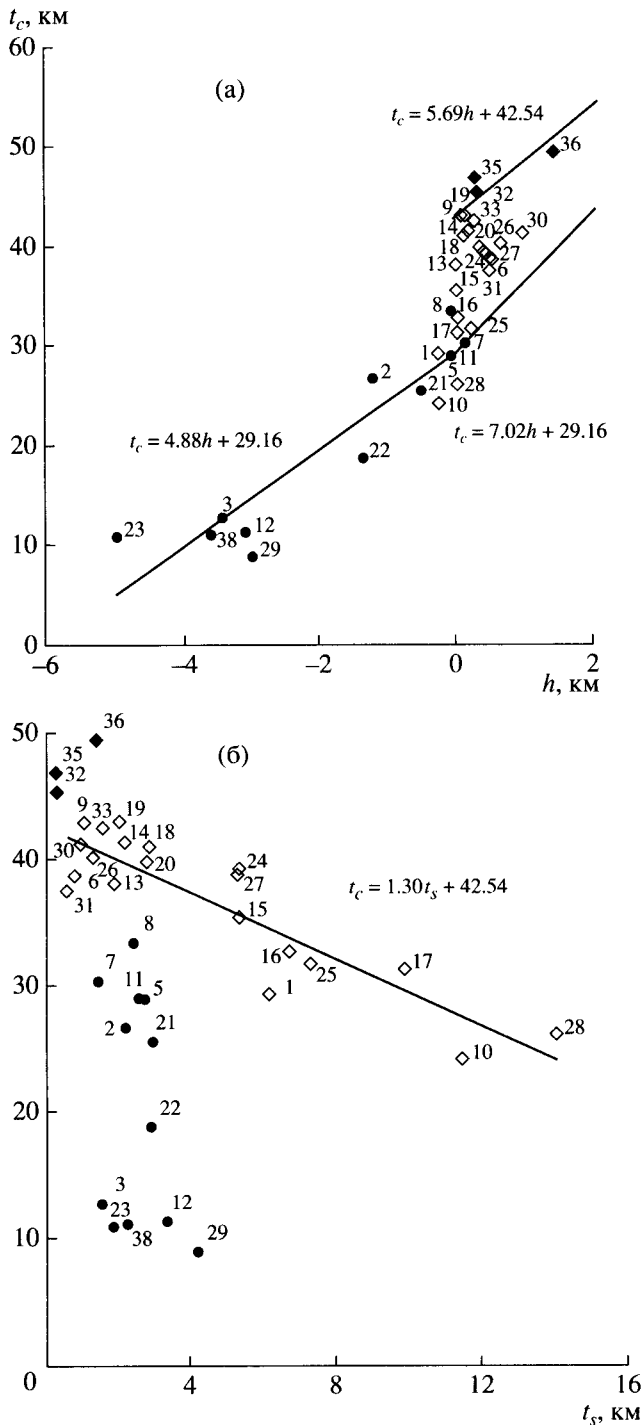


Рис. 3. Парные диаграммы для средних значений мощности консолидированной коры t_c , мощности осадочного чехла t_s и превышения рельефа h . Кружки – структуры первого ряда, ромбики – второго ряда. Цифры соответствуют номерам структур в табл. 1. Также показаны линии регрессии и линии теоретических зависимостей (объяснение в тексте). а – t_c-h ; б – t_c-t_s .

этом мы приняли допущение, что вне зависимости от процессов в верхней мантии, именно поверхность М является поверхностью компенсации [5]. Это подтверждается многими исследова-

ниями, так же как и применимость в общем случае схемы изостазии по Эри, согласно которой равновесие на региональном уровне осуществляется в значительной степени благодаря изменению мощности земной коры [1, 6].

Физически принцип изостазии заключается в постоянстве массы всего разреза земной коры, приходящейся на единицу площади. Примем, что земная кора состоит из двух слоев: верхнего осадочного слоя и консолидированной земной коры. Тогда условие равновесия запишется в виде

$$\rho_m \cdot h = (\rho_m - \rho_s)t_s + (\rho_m - \rho_c)t_c - \rho_m T_0 \quad (1)$$

для суши, где h – высота над уровнем моря; ρ_m , ρ_c и ρ_s – плотности мантии, консолидированной коры и осадочного слоя соответственно; t_c и t_s – мощности консолидированной коры и осадочного слоя; T_0 – глубина, на которой располагалась бы в равновесии поверхность мантии без нагрузки [7]. Для морей эта формула примет вид

$$(\rho_m - \rho_w)h = (\rho_m - \rho_s)t_s + (\rho_m - \rho_c)t_c - \rho_m T_0, \quad (2)$$

где ρ_w – плотность морской воды и h – глубина (отрицательная величина).

Согласно механизму изостазии по Эри, плотности слоев коры сохраняются, а изостазия осуществляется за счет изменения мощности. На графике t_s-h видно, что для “переходного” типа отсутствует связь между глубиной и мощностью осадков. Считая в данном случае t_s постоянным, получаем теоретическую зависимость между глубиной и мощностью консолидированной коры:

$$(\rho_m - \rho_c)t_c = t_{c0} + (\rho_m - \rho_w)h, \quad (3)$$

где t_{c0} – мощность при $h = 0$. Значения средних величин для первого ряда на графике t_c-h (рис. 3а) также располагаются в виде линии с уравнением регрессии $t_c = 4.88h + 29.16$ (коэффициент корреляции 0.87). Если принять $\rho_m = 3.30$ г/см³, то из равенства коэффициентов в обоих уравнениях получим среднюю плотность консолидированной коры $\rho_c = 2.83$ г/см³ и начальную мощность $t_{c0} = 29.2$ км. Таким образом, для океанических и окраинных морей механизм изостазии связан главным образом с некомпенсированным (т.е. без полного заполнения осадками) прогибанием дна бассейна при значительном утонении земной коры и подъеме мантии. Очевидно, что отсутствие связи между глубиной бассейна и мощностью осадков, а также относительно небольшая мощность последних, по-видимому, обусловлены относительно недавним формированием этих бассейнов. Значения средней мощности консолидированной коры являются пониженными относительно аналогичных параметров большинства внутриконтинентальных структур, что будет показано ниже. Это также косвенно свидетельствует о молодости

и активном тектоническом состоянии этих структур.

Линия второго ряда на диаграмме t_c-h имеет гораздо больший наклон, чем теоретическая линейная зависимость от простого увеличения высоты рельефа (рис. 3б). Очевидно, что это связано с отличием земной коры и иным механизмом изостазии и здесь ведущую роль играет иной фактор. Из уравнения (1) следует

$$(\rho_m - \rho_s)(t_s - t_{s0}) + (\rho_m - \rho_c)(t_c - t_{c0}) = \rho_m h, \quad (4)$$

где t_{s0} и t_{c0} – мощности осадочного слоя и консолидированной коры при $h = 0$. Примем $t_{s0} = 0$, $\rho_s = 2.55$ г/см³, $\rho_m = 3.30$ г/см³. Величины t_s и h в первом приближении можно считать независимыми. На графике t_c-t_s (рис. 3б) видна отчетливая линейная зависимость между этими величинами для данного ряда, уравнение регрессии $t_c = -1.30 t_s + 42.54$ (коэффициент корреляции 0.79). Сравнивая коэффициенты этого уравнения с формулой (4), получим $\rho_c = 2.72$ г/см³ и $t_{c0} = 42.5$ км. Итак, согласно этой оценке большинство континентальных структур имеют консолидированную кору со средней плотностью 2.72 г/см³, что меньше соответствующей величины для окраинных морей и океанов. Это подтверждает более основной характер структур “переходного” типа, к которому относятся краевые моря и океанические зоны. Также эта величина достаточно хорошо согласуется с оценками среднего состава верхней части континентальной земной коры близкими к гранодиоритам или кварцевым диоритам с плотностью 2.7–2.75 г/см³ и средней скоростью P -волн 6.25 км/с [8]. Для большинства континентальных частей изменения мощности коры достаточно хорошо объясняются погружением фундамента с полным заполнением бассейна осадками (компенсированное прогибание) при сохранении изостазии по схеме Эри, исходная мощность континентальной коры оценивается величиной 42.5 км. Мощность коры при этом постепенно уменьшается, но не настолько резко, как в случае “переходного” типа коры.

Наконец, три смежные складчатые области – Казахстанскую, Алтайскую и Тувинскую можно считать разновидностью структур, относящихся к “континентальному” типу. Они имеют наибольшие средние мощности консолидированной коры (45–50 км). Увеличение мощности коры исключительно вследствие изменения высоты рельефа можно получить из уравнения (4). При той же средней плотности коры $\rho_c = 2.72$ г/см³, $\rho_m = 3.30$ г/см³, $t_s = t_{s0} = 0$, $t_{c0} = 42.5$ км получается уравнение $t_s = 5.69h + 42.54$ (рис. 3б), что соответствует полученным данным.

Таким образом, сравнительный анализ параметров земной коры основных структур России, осредненных для достаточно больших территорий, позволил наметить два типа. Если принять в качестве первого приближения полное изостатическое равновесие для данных структур и считать компенсационной поверхностью границу М, то изменение основных параметров коры достаточно удовлетворительно объясняется в рамках простой модели коры, состоящей из двух слоев – консолидированной коры и осадочного чехла. Исходя только из этих условий, получим, что для океанов и окраинных морей ведущий механизм – некомпенсированное прогибание дна бассейна – резким утонением коры, тогда как для континентальных структур – компенсированное прогибание с более равномерным утонением коры и заполнением бассейна осадками, либо (реже) вздымание. Оценки средней плотности и начальной мощности консолидированной коры обоих типов подтвердили более основной состав для океанической и переходной коры и ее меньшую мощность.

Выполненные оценки носят предварительный характер и требуют дальнейшего уточнения. Тем не менее использование принципа изостазии позволяет объяснить наиболее общие связи между глубинным и поверхностным строением земной коры, а также косвенно указывает на различие глубинных геодинамических процессов разных областей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 99–05–65056), МНТЦ (грант 57183 и гранта NSF EAR-9804859).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резанов И.А., Файтельсон А.Ш. // Геология и геофизика. 1985. № 5. С. 115–123.
2. Юров Ю.Г., Ефимкина З.Н. // В кн.: Изостазия. М.: Наука, 1973. С. 53–67.
3. Эринчек Ю.М., Соболев П.О., Колесник Н.Н. и др. В сб.: Третьи геофизические чтения им. В.В. Федьнского. Тезисы. М.: ГЕОН, 2001. С. 124.
4. Тектоническая карта территории СССР и прилегающих акваторий масштаба 1 : 16 000 000 / Под ред. Л.И. Красного и С.И. Стрельникова. Геологическое строение СССР. Л.: Недра, 1989. Т. 10.
5. Павленкова Н.И. // Регион. геология и металлогения. 2000. № 10. С. 12–21.
6. Артемьев М.Е. В кн.: Изостазия. М.: Наука, 1973. С. 3–11.
7. Люстих Е.Н. Изостазия и изостатические гипотезы. Тр. Геофиз. ин-та. М.: Изд-во АН СССР, 1957. № 38. 90 с.
8. Браун Д., Массет А. Недоступная Земля. М.: Мир, 1984. 262 с.