## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## М. И. Стрельцов

## О КРИВИЗНЕ ОСТРОВНЫХ ДУГ И ГЛУБИНЕ ЖЕЛОБОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Способом Чебышева для выравнивания результатов наблюдений по методу наименьших квадратов найдены эмпирические формулы многочленов, айпроксимирующих в стереографической проекции оси глубоководных желобов и центры четвертичного вулканизма. Сферическая кривизна островных дуг определялась из выражения  $K_s = [(\rho^2 + x_c^2 + y_c^2 - r^2)^2 + 4\rho^2 r^2]^{0.5} \cdot (2R_0\rho r)^{-1}$ , где  $R_0$  — радиус Земли,  $\rho$  — радиус стереографической проекции,  $r, x_c$  и  $y_c$  — соот-

Глубина желобов и кривизна островных дуг северо-западной части Тихого океана варьируют в широких пределах, и на первый взгляд трудно сказать, взаимосвязаны ли эти величины. Вместе с тем нельзя не заметить, что максимальная глубина Мирового океана отмечена в глубоководном желобе одной из наиболее изогнутых островных дуг — Марианской.

Кривизна островных дуг, за исключением, пожалуй, одного только случая [12], определялась путем простейших геометрических построений [4, 5, 7 и др.], в основу которых были положены соображения о возможности аппроксимации рассматриваемых структур дугами малых кругов Земли. Однако уже давно было подмечено [7], что кривизна одной и той же дуги по простиранию может значительно изменяться, в связи с чем полученные ранее значения кривизны следует рассматривать лишь как первое приближение и искать другие пути определения этого параметра.

Исходными данными для определения кривизны островных дуг могут быть центры четвертичного вулканизма и осевые линии глубоководных желобов (рис. 1). Воспользовавшись основным свойством стереографической проекции — конформностью отображения, поставленную задачу можно свести к исследованию кривизны вулканических цепей и глубоководных желобов в декартовых координатах, определяя затем сферическую кривизну (K<sub>s</sub>) из выражения.

$$K_s = \left[ \left( \rho^2 + x_c^2 + y_c^2 - r^2 \right)^2 + 4\rho^2 r^2 \right]^{0.5} \cdot (2R_0 \rho r)^{-1},$$
(1)

ветственно радиус и координаты центра кривизны в декартовых координатах. Установлена прямая зависимость между кривизной островных дуг и глубиной желобов северо-западной части Тихого океана. Принимая модель островной дуги в виде бруса, расположенного на границе океанической и континентальной литосферных плит, можно на основании этой зависимости рассматривать процесс образования глубоководных желобов как результат изгиба островодужного бруса.

где  $R_0$  — раднус Земли,  $\rho$  — раднус стереографической проекции, r,  $x_c$ ,  $y_c$  — соответственно раднус и координаты центра кривизны рассматриваемой линии в декартовых координатах. Возможны различные подходы к исследованию кривизны линий, охарактеризованных совокупностью точек в прямоугольных координатах. Так, путем численного дифференцирования можно определить кривизну дуги в той или иной ее точке [1], но этот метод чувствителен к опибкам исходных данных, а сглаживание последних вносит элемент субъективизма в конечные результаты.

Другой путь исследования кривизны лежит через подбор аналитического выражения, связывающего исходные данные. Достаточно определенных физических соображений относительно характера искомой зависимости в настоящее время нет, но вид исследуемых кривых позволяет полагать, что на первых этапах исследования эмпирическую зависимость можно попытаться искать в виде целых рациональных функций п-ной степени, воспользовавшись способом П. Л. Чебышева для выравнивания результатов наблюдений по методу наименьших квадратов [13]. Лучший из многочленов той или иной степени при этом определяется путем поворота координатных осей на угол (ү), при котором сумма квадратов отклонений вычисленных значений от исходных данных становится минимальной.

Вычисления показали, что исходные данные после приведения их к центру стереографической проекции ( $\rho = 10^3$ ), где искажения минимальны, могут с достаточной точностью представляться в виде многочленов второй

УДК 551.243.21

1988

№ 3



Рис. 1. Глубоководные желоба и центры четвертичного вулканизма северо-западной части Тихого океана в стереографической проекции.

на в стереографической проекции. 1 — точки осевых линий глубоководных желобов [2, 16]; 2 центры четвертичного вулканизма [3, 9]. Эволюты: 3 — глубоководных желобов, 4 — вулканических зон. Островные дуги: 1 — Алеутско-Алястинская, II — Курило-Камчатская, III — Японская, IV — Идзу-Бонинская, V — Марианская, VI — Рю-Кю (в числителе — число центров четвертичного вулканизма, в знаменателе — число дасчетных точек осей глубоководных желобов с указанием в скобках координат крайних точек).

степени. Так, для Алеутско-Аляскинского желоба лучший из многочленов второй степени характеризуется минимальными значениями среднего квадратичного отклонения  $\sigma_2 = 3,03$ при  $\gamma = 170^{\circ}$ , тогда как для лучшего из многочленов третьей степени  $\sigma_3 = 2,91$  при  $\gamma = 175^\circ$ . Поскольку ошибки исходных данных δ≤0,2 (величины, примерно соответствующей 00°01'), то можно считать, что значения о, практически перестают убывать, начиная с n=2, что, как известно [6], и определяет оптимальную степень искомого многочлена. Многочлены более высоких степеней, например четвертой, характеризуются существенно меньшими значениями  $\sigma_n (\sigma_4 = 1.05$  при  $\gamma = 7^\circ)$  и позволяют исследовать более тонкие вариации кривизны рассматриваемого желоба, однако ошибки исходных данных в этом случае уже существенно влияют на конечные результаты.

Рекомендации [6] по построению доверительного интервала для точечной оценки значений многочлена дают возможность определить ошибки аргумента, а затем оценить точность полученных значений кривизны дуг. В настоящей работе использованы результаты определения доверительного интервала при 95%-м уровне надежности. Исследование кривизны островных дуг изложенным выше способом показало, что вариации этой величины в одной и той же дуге много больше ошибок ее определения.

Определив по батиметрическим картам [16] глубину желобов в тех точках, где была вычислена кривизна островных дуг, можно графически установить вполне закономерную взаимосвязь исследуемых параметров. Так, для Алеутско-Аляскинской островной дуги со всей определенностью устанавливается, что меньшим величинам радиуса кривизны дуги (R) соответствуют бо́льшие глубины желоба (рис. 2, A). То же самое можно утверждать по всей совокупности имеющихся данных (см. рис. 2, E) и прийти на основанни этого к вы-



Рис. 2. Зависимость между кривизной островных дуг и глубиной желобов (А — Алеутско-Аляскинская ду-

га. Б — данные по всем исследованным дугам). 1, 2 — геодезическая кривизна глубоководных желобов (1) и вулканических зон (2); 3 — сферическая кривизна Алеутско-Аляскинского желоба. Вертикальные черточки — ошибки определения глубины желобов; ошибки определения кривизны дуг не превышают радукся условных значков.



Рис. 3. Деформации бруса, по С. П. Тимошенко [8], (A) и упрощенная модель островной дуги (Б, разрез вкрест простирания).

*R* — радиус кривизны, *h* — высота и *d* — ширина бруса, *E* — модуль Юнга, *v* — коэффициент Пуассона, *M* — изгибающий момент. *I* — континентальная, *2* — океаническая литосфера;
 *3* — астеносфера; *4* — поперечный разрез деформированного островодужного «бруса»; *5* — вода.

воду о том, что глубина желобов связана с кривизной островных дуг прямой зависимостью.

Существуют представления о прямой зависимости глубины желобов от возраста и мощности, а также от скорости и угла субдукции океанической литосферы [17, 18]. Учитывая вышеизложенное, можно заключить, что и кривизна островных дуг связана прямой зависимостью с перечисленными параметрами океанической литосферы. Однако к этому заключению следует относиться пока с осторожностью, ибо возникают, как уже неоднократно отмечалось [4, 5, 14 и др.], определенные затруднения при попытках связывать углы наклона субдуцируемой литосферы с кривизной дуг.

Думается, что возможны поиски и иных путей интерпретации установленной зависимости «кривизна дуги — глубина желоба», в частности в рамках предложенной ранее [10] модели островной дуги в виде изгибающегося бруса, расположенного на границе океанической и континентальной литосферных плит. Известен ряд соотношений, связывающих кривизну бруса с его упругими свойствами и размерами (рис. 3). Так, при прочих равных условиях кривизна бруса связана обратной зависимостью с его поперечными размерами (см. выражение (2) на рис. 3). Наиболее отчетливо эта зависимость выражена в Алеутско-Аляскинской островной дуге, где наименее изогнутая западная часть ее характеризуется максимальными поперечными размерами. Другое выражение ((3), см. рис. 3) указывает на обратную зависимость между радиусом кривизны бруса и его вертикальными, по оси z, деформациями. По-видимому, мерой вертикальных деформаций островной дуги может служить разность  $\Delta h$ между глубинами желоба и прилегающей к нему океанической плиты. Возвращаясь к рис. 2, Б, можно наблюдать ожидаемую зависимость в графическом выражении. Практически все точки на этом графике попадают в область, ограниченную гиперболами, которые были рассчитаны в предположении, что поперечные размеры островодужного бруса могут варьировать в пределах от 100 до 500 км, вертикальные — от 100 до 200 км, а сам брус сложен материалом, имеющим коэффициент Пуассона  $\gamma = 0,3$ .

Уже отмечалось, что аналогии между островной дугой и изгибающимся брусом справедливы лишь при ряде допущений [10]. Наиболее существенные поправки к изложенным выше результатам следует ожидать в случае, если топографические оси, а также глубины современных желобов будут существенно отличаться от таковых для «истинных» желобов, например, вследствие заполнения последних осадками [15]. Полагая же приемлемыми перечисленные и подразумеваемые здесь допущения, процесс образования глубоководных желобов можно рассматривать как результат изгиба островодужного бруса.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бронштейн П. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике.— М.: Наука, 1981.
- Гнибиденко Г. С., Быкова Т. Г., Веселов О. В. и др. Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба.— М.: Наука, 1980.
- Гущенко И. И. Извержедия вулканов Мира: каталог.— М.: Наука, 1979.
- Заварицкий А. Н. Избранные труды. Т. 1.— М.: Изд. АН СССР, 1956.
   Зубкова З. Н. Алеутские острова.— М.: ОГИЗ.—
- 5. Зубкова З. Н. Алеутские острова.— М.: ОГИЗ.— Географгиз, 1948.
- 6. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии.— М.: Мир, 1969.
- 7. Островные дуги. М.: ИЛ, 1952.

- 8. Румшинский Л. В. Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971.
- 9. Стрельцов М. И. К вопросу о закономерностях расположения вулканов Курило-Камчатской дуги // Докл. АН СССР.— 1974.— Т. 216, № 6.
- 10. Стрельцов М. И. О сдвигах на флангах и кривизне островных дуг // Докл. АН СССР.— 1977.— Т. 236, № 1.
- Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. Т. 1.— М.: Наука, 1965.
- Токарев П. П. О фокальном слое, сейсмичности и вулканизме Курило-Камчатской зоны // Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1970.— № 3.
- Хотимский В. И. Выравнивание статистических рядов по методу наименьших квадратов (способ Чебышева).— М.: Госстатиздат, 1959.
  - ИМГиГ ДВО АН СССР, Новоалександровск

- 14. Шарапов В. Н., Симбирева И. Г., Бондаренко П. М. Структура и геодинамика сейсмофокальной зоны Курило-Камчатского региона.— Новосибирск: Наука, 1984.
- Шолл Д. Геология континентальных окраин. Т. 2.— М.: Мир, 1978.
- Bathymetric atlas of the North Pacific Ocean.-U. S. Naval oceanographic office.- Washington D. C. 20373, 1973.
- Grellet C., Dubois J. The depth of trenches as a function of the subduction rate and age of the lithosphere // Tectonophysics.— 1982.— V. 82, N 1/2.
   Hilde T. W. Geodynamics of the Western Pacific

Indonesion.- Washington, 1983.

Поступила в редакцию 27 окт. 1986 г.