

*А. Г. Родников, А. Г. Гайнанов, Б. В. Ермаков,
Т. Като, В. М. Ковылин, В. А. Селиверстов,
Х. Симамура, Я. Б. Смирнов, П. А. Строев, Ю. К. Щукин*

ГЕОТРАВЕРС СИХОТЭ-АЛИНЬ — ЯПОНСКОЕ МОРЕ — о. ХОНСЮ — ТИХИЙ ОКЕАН

УДК 551.24

В работе приводятся результаты геолого-геофизических исследований, выполненных по программе советско-японского сотрудничества в области геофизики, по изучению строения и динамики земной коры и верхней мантии переходной зоны от Азиатского континента к Тихому океану.

На основе комплексной интерпретации геологических, петрографических, гравиметрических, магнитометрических, электромагнитных данных, измерений теплового потока построен глубинный геолого-геофизический разрез тектоносферы (геотраверс), освещаю-

По программе советско-японского сотрудничества в области геофизики построен геотраверс (глубинный геолого-геофизический разрез) от оз. Ханка в Приморье через Сихотэ-Алинь, Японское море, о. Хонсю (пересекая ц-ов Ога, район «зеленых туфов», массив Китаками, п-ов Одзика), японский желоб, северо-западную котловину Тихого океана (см. рисунок). Вдоль него проведена комплексная интерпретация данных с целью построения геолого-геофизико-петрохимической модели тектоносферы зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Комплексирование результатов различных методов исследований дало возможность представить строение земной коры и верхней мантии, вещественный состав и возраст пород, слагающих их, положение глубинных разломов, магматических комплексов, астеносферных линз в мантии сейсмических очагов, строение фокальной зоны. Выполнены оценки глубинных температур вдоль геотраверса, а также определены глубины залегания уровня фракционного плавления, отождествляемого с верхней границей астеносферного слоя. Выбор направления геотраверса определен тем, что в этом регионе в период действия Геодинамического проекта были проведены разнообразные геолого-геофизические исследования советскими и японскими учеными.

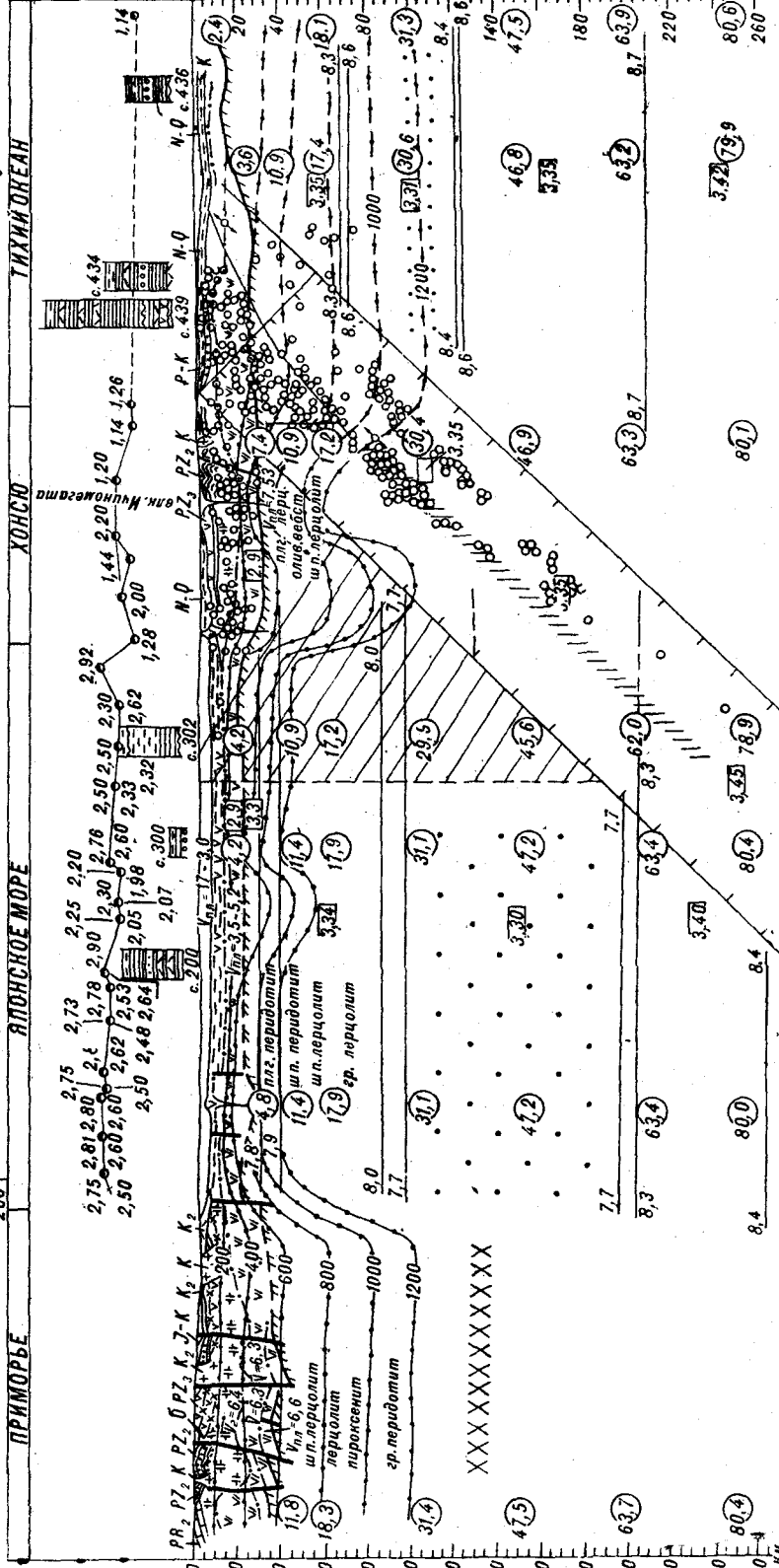
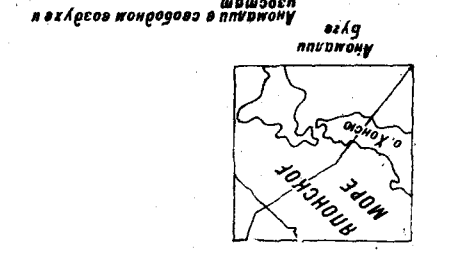
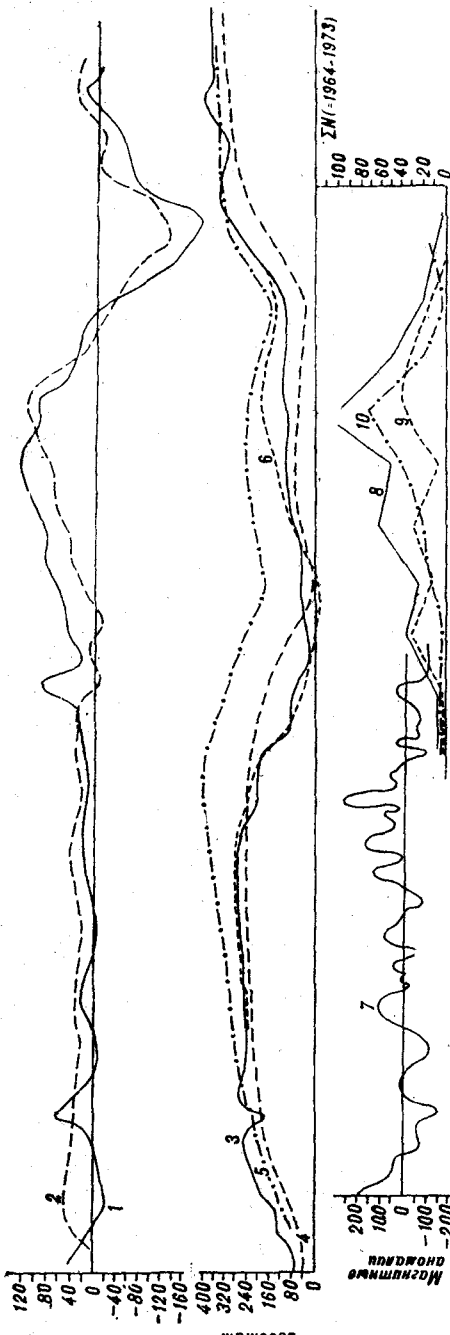
В основу работы положены разработки А. Г. Родникова [9]. Структура земной коры Приморья дана по данным В. В. Аргентова и

щий строение недр Земли. Комплексирование результатов различных методов исследований дало возможность представить строение земной коры и верхней мантии, вещественный состав и возраст пород, слагающих их, положение магматических комплексов, глубинных разломов, астеносферных линз в мантии, сейсмических очагов, строение фокальной зоны. Выполнены оценки глубинных температур вдоль геотраверса, а также определены глубины залегания уровня фракционного плавления, отождествляемого с верхней границей астеносферного слоя.

др. [1 и др.] в геологической интерпретации Б. В. Ермакова, строение земной коры и верхней мантии Японского моря приводится по результатам многочисленных исследований советских и японских ученых [8, 17 и др.]. При построении разреза земной коры и верхней мантии о. Хонсю использованы литературные данные исследователей [11, 14, 15 и др.] с дополнениями Т. Като. Структура земной коры и верхней мантии северо-западной котловины Тихого океана дана в соответствии с работой Т. Асада и С. Асано [12]. Положение фокальной зоны показано по Т. Иосии [23]. Для петрографическо-

Геотраверс Сихотэ-Алинь — Японское море — о. Хонсю — Тихий океан.

1 — рыхлые алевроито-глинистые отложения; 2 — глины, илы; 3 — песчаники; 4 — кремнисто-глинистые породы; 5 — известняки; 6 — кислые эффузивы, туфы; 7 — эффузивы основного состава; 8 — конгломераты; 9 — граниты; 10 — ультраосновные породы; 11 — «гранитный» слой; 12 — «базальтовый» слой; 13 — разломы; 14 — границы сейсмических слоев; 15 — граница Мохоровичича; 16 — гипоцентры землетрясений; 17 — точки измерений теплового потока; 18 — кровля фокальной зоны; 19 — граничные скорости; 20 — изотермы через 200°; 21 — значение плотности ($\rho/\text{см}^3$); 22 — зона повышенной электропроводности; 23 — динамические параметры напряжений в очагах землетрясений; 24 — слой с пониженными скоростями сейсмических волн; 25 — пластовые скорости; 26 — средние значения скоростей продольных волн; 27 — давление, кбар; 28 — контуры зоны Бенюфа, взятые при расчете гравиметрических моделей; 29 — область пониженной плотности. Геофизические поля: 1 — аномалии в свободном воздухе; 2 — изостатические аномалии; 3 — аномалии Буге (наблюденные); 4 — гравитационный эффект земной коры; 5 — гравитационный эффект земной коры и блока фокальной зоны; 6 — суммарный гравитационный эффект плотностных неоднородностей коры, литосферы и астеносферы; 7 — магнитные аномалии; 8 — суммарное количество очагов в земной коре и верхней мантии; 9 — суммарное количество очагов в земной коре; 10 — суммарное количество очагов в верхней мантии.



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

го описания верхней мантии о. Хонсю и Японского моря использованы данные Е. Такахаси [21], Приморья — данные советских исследований, обобщенные В. А. Селиверстовым. Графики магнитного и гравитационного полей построены А. Г. Гайнановым и П. А. Строевым [6, 7, 22 и др.] с использованием литературных данных, а также материалов Т. Иосии и Ю. В. Шевалдина [6, 8, 37 и др.]. Расчет глубинных температур по геотраверсу проведен Я. Б. Смирновым. Для определения вещественного состава осадочного слоя в Японском море и в Тихом океане были использованы результаты бурения с судна «Гломар Челленджер» [16]. Проведена комплексная интерпретация полученных вдоль профиля геофизических данных, дающая возможность более полно оценить геологическую информацию, определить особенности глубинной структуры тектоносферы переходной зоны, наметить пути в определении сущности процессов, действующих в недрах Земли, в совокупности с геотектоническими, петрографическими и другими геологическими данными.

Крупные геоструктурные единицы, пересекаемые геотраверсом: Сихотэ-Алинь, глубоководная котловина Японского моря, структуры о. Хонсю и Тихого океана, различаются строением земной коры и верхней мантии. Мощность земной коры в Приморье составляет 35—40 км, в Японском море — 12—15 км, на о. Хонсю — около 30 км и в Тихом океане — примерно 6—8 км. Средняя скорость продольных волн в вулканогенно-осадочном слое Приморья составляет около 5,8 км/с. В основании его установлена граница со скоростью 5,9—6,2 км/с. В «гранитном» слое мощностью 15—17 км — $V_{пл} = 6,2$ км/с. В пределах «гранитного» слоя установлено несколько пологих преломляющих границ. Для одной из них $V_r = 6,4$ км/с. Эти границы слабо изогнуты и почти не отражают напряженных складчатых структур в верхнем слое. Наличие преломляющих границ в «гранитном» слое свидетельствует о его хорошей расслоенности. Выходы «гранитного» слоя в пределах Ханкайского массива позволяют предполагать, что его строение определяется метаморфизованными ниже- и среднепротерозойскими, а возможно, и архейскими породами, пронизанными многочисленными гранитоидными интрузиями докембрийского возраста. Расслоенность «гранитного» слоя можно объяснить тем, что метаморфизму и гранитизации подвергались в основном осадочные отложения, стратиграфические и структурные рубежи которых, по-видимому, обусловили появление преломляющих границ. Нормальный известково-щелочной состав гранитоидных интрузий позднего палеозоя и мела показывает, что их источником мог быть «гранитный» слой,

частично расплавлявшийся в процессе развития Сихотэ-Алинской складчатой области.

«Базальтовый» слой имеет мощность 18—20 км, довольно устойчивую под складчатой системой. Для этого слоя установлены необычно низкие скорости продольных волн — от 6,3 до 6,55 км/с. В других районах такие скорости характерны для нижней части «гранитного» слоя. Вероятно, что «базальтовый» слой сложен метаморфизованными архейско-раннепротерозойскими вулканогенно-осадочными комплексами. Отмечаемая слоистость, по-видимому, отражает следы первичной тектоно-магматической стратификации эффузивно-осадочной толщи, частично сохранившейся при метаморфических преобразованиях.

В пределах о. Хонсю фундамент сложен в основном палеозойскими породами. В районе массива Китаками породы фундамента выходят на поверхность, а в пределах региона «зеленых туфов» они расположены на глубине 2—3 км. Слой со скоростью сейсмических волн 5,9 км/с, отождествляемый с «гранитным» слоем, распространен повсеместно и имеет мощность до 15 км. Под массивом Китаками его мощность уменьшается до 10 км. Результаты сейсмических исследований подтверждают геологические данные о существенном различии в строении региона «зеленых туфов» и массива Китаками. Регион «зеленых туфов» является областью интенсивного кайнозойского магматизма. Отделенный от него глубинным разломом массив Китаками представляет собой выступ древних метаморфических палеозойских пород, образования которого слагают фундамент о. Хонсю. Не исключена возможность распространения докембрийских пород [20]. Так, гнейсы высокой степени метаморфизма и ставролит-кианитовые сланцы, развитые в массиве Абукума, силлиманитовые гнейсы, граниты, амфиболиты и кристаллические сланцы, обнаруженные в виде ксенолитов в раннемезозойских серпентинитах в юго-западной части Китаками, относятся к докембрийским породам. Слоистые гнейсы, образующие ксеноблоки в ортоклазовых гранитах Хиками, имеющих возраст 350 (K—Ar) и 339 млн. лет (Pb—Sr), также интерпретируются как докембрийские породы. Вероятно, что морские силурийские отложения трансгрессивно залегают непосредственно на докембрийских породах [20]. Палеозойские породы представлены двумя комплексами пород: силур-девонским и верхнедевон-пермским [18]. Силурийские отложения, сложенные известняками, глинистыми и кремнистыми сланцами с прослоями туфов и конгломератов мощностью не более 300 м, были образованы в эпиконтинентальных условиях. Эвгеосинклинальные условия начались с раннего девона накоплением кератофиров, даци-

тов, туфов и основных вулканических продуктов. Эти породы метаморфизованы в различные кристаллические сланцы зеленосланцевой фации. Эвгеосинклинальные отложения с высоким содержанием основных вулканитов превращены в горнблендитовые сланцы, в меньшей степени в биотитовые сланцы. Девонские породы рассматриваются также как фундамент региона «зеленых туфов», где они сложены серицит-кварцевыми сланцами кислого состава вулканического происхождения. В дальнейшем они были интродуцированы кварцевыми диоритами, гранодиоритами и ультраосновными породами. Распространение лепидодендрона указывает на континентальные условия, установившиеся в позднедевонское время. Верхнедевонские отложения, сложенные черными сланцами с прослоями конгломератов, развиты только в юго-западной части массива Китаками. Карбон представлен мощной толщей песчаников, сланцев, кремнистых пород, в верхней части переходящих в карбонатные фации с прослоями туфов и конгломератов. Пермь состоит из мощного (свыше 4000 м) разреза обломочных пород, таких как песчаники, черные сланцы, конгломераты, кремнистые породы. Мезозойские породы представлены осадочными и вулканогенными образованиями. В меловое время породы массива Китаками, так же как и породы фундамента региона «зеленых туфов», были прорваны гранитоидными интрузиями (гранодиоритами, кварцевыми диоритами плагιοгранитами).

В районе развития «зеленых туфов» неогеновые образования залегают на эродированной поверхности палеозойского фундамента. Миоценовые породы представлены липаритами, андезитами, дацитами, туфами, туфобрекчиями, а плиоценовые — глинистыми сланцами, песчаниками, песками и глинами. Вулканическая деятельность продолжалась и в четвертичное время. На основании изучения ксенолитов из лав вулкана Ичиномегата Е. Такахаси [21] предполагает, что низы коры сложены горнблендитовыми габбро и амфиболитами. Они образуют «базальтовый» слой со скоростью сейсмических волн 6,6 км/с.

Особенностью скоростного разреза северо-западной части о. Хонсю являются пониженные значения скоростей сейсмических волн вдоль поверхности Мохоровичича, составляющие 7,6 км/с, в то время как под массивом Китаками они обычные (8,0—8,1 км/с). Это явление, по-видимому, связано с активными магматическими процессами, протекающими в регионе «зеленых туфов».

В районах, пересекаемых геотраверсом, широко развиты интрузивные породы, состав которых варьирует от ультраосновного до кислого, а возраст — от докембрийского до неогено-

вого, однако среди интрузивных пород преобладают гранитоиды. Гранитоиды Приморья характеризуются повышенным содержанием K_2O , тогда как в пределах о. Хонсю эти породы отличаются натровым уклоном. Исключение представляют каменноугольные граниты Хиками, а также гранитоиды неогенового возраста, отличающиеся пониженной концентрацией CaO и повышенным содержанием K_2O [13]. Эпохи гранитоидного магматизма, как правило, совпадают с эпохами проявления эффузивной деятельности в вулканических поясах и являются практически одновременными для всех основных структурных единиц, пересекаемых геотраверсом.

Имеются немногочисленные данные о составе верхней мантии, полученные при изучении ксенолитов. Так, предполагается, что в пределах Приморья верхние горизонты мантии сложены лерцолитами, шпинелевыми лерцолитами и пироксенитами, подстилающимися гранатовыми перидотитами. В строении верхов мантии Японского моря участвуют шпинелевые перидотиты, шпинелевые лерцолиты и плагиоклазовые перидотиты, а верхняя часть мантии о. Хонсю сложена шпинелевыми лерцолитами с подчиненным количеством плагиоклазовых лерцолитов и оливиновых вебстеритов. Кора и мантия о. Хонсю, по данным Е. Такахаси [21], характеризуются также большим содержанием воды и сравнительно низкими температурными условиями образования, чем под Японским морем, где верхняя мантия обезвожена. Вероятно, что породы, слагающие верхи мантии, соответствуют тугоплавким остаткам после отделения базальтовых магм.

Многочисленные исследования, проведенные японскими учеными, основанные на регистрации поверхностных и объемных волн от землетрясений и больших взрывов, позволили выделить в верхней мантии под Японским морем мощный слой (свыше 100 км) с пониженными скоростями как по продольным, так и поперечным волнам [10, 14, 17, 19]. Было установлено, что верхняя мантия между материком и островной дугой характеризуется по сравнению с океанической областью на 0,3—0,4 км/с более низкими значениями скоростей распространения сейсмических волн и более сильным поглощением их энергии. Изменение скоростей в верхней мантии при переходе от Японского моря к котловине Тихого океана происходит не постепенно, а резко. Границей между этими структурами является зона Беньофа шириной 100—150 км, к которой приурочены очаги большинства землетрясений.

Строение верхней мантии в северо-западной котловине Тихого океана, изученное методом взрывной сейсмологии по записям объемных

волн, зарегистрированных при помощи донных сейсмографов [12], характеризуется высокими значениями скоростей сейсмических волн. Слой пониженных скоростей (волновод), расположенный на глубине примерно 100 км, мощностью 30—40 км, имеет значения 8,4—8,6 км/с, в то время как под Японским морем на том же уровне они уменьшаются до 7,7 км/с. Высокие значения скоростей в волноводе верхней мантии северо-западной котловины Тихого океана с незначительной мощностью говорят о возможном резком изменении физических свойств мантии. Не исключено, что пластичная астеносфера, такая же как под Японским морем, здесь отсутствует.

Распространение мощной астеносферы под Японским морем подтверждается геотермическими и гравиметрическими наблюдениями. Расчет глубинных температур по геотраверсу был проведен Я. Б. Смирновым по общепринятой методике для многослойной среды по уравнению Пуассона при условии стационарного поля. Расчет проводился до температуры 1200°, поскольку при более высокой температуре возможно резкое изменение механизма теплопередачи, обусловленное фракционным плавлением вещества верхней мантии.

Глубина залегания изотермы 1200° под Сихотэ-Алинем определена в 100 км, а величина давления, по-видимому, превышает 30 кбар. Под Японским морем и западной частью о. Хонсю (регион «зеленых туфов») эта изотерма резко поднимается до глубины примерно 40 км, где давление составляет 11—17 кбар, в пределах Тихого океана снова погружается до глубины 100—120 км, соответственно возрастает давление до 30 кбар.

По-видимому, зона фракционного плавления наиболее полно выражена под Японским морем, где высоким температурам соответствуют низкие давления. Можно считать, что зона частичного плавления подтверждается магнитотеллурическими исследованиями как область повышенной проводимости [3, 4]. Это коррелируется и с магматическими проявлениями. Последние 25 млн. лет магматическая активность проявлялась лишь в пределах наивысшего подъема изотермы 1200°, т. е. в Японском море и в западной части о. Хонсю. В Тихом океане (Северо-Западная котловина) магматическая деятельность (излияния толеитовых базальтов) происходила в основном свыше 100 млн. лет назад в юрско-меловое время. Примерно в то же время в Приморье широко проявился магматизм, главным образом кислый, а в палеогене здесь сформировались разнообразные дайковые серии и субвулканические тела от кислых и щелочных до основных.

При построении плотностной модели по геотраверсу П. А. Строевым и А. Г. Гайнановым

был вычислен гравитационный эффект земной коры. Исключение гравитационного влияния земной коры из наблюдаемой аномалии Буге позволило выделить аномалии, обусловленные плотностными неоднородностями верхней мантии. Удовлетворительное согласование наблюдаемой аномалии силы тяжести с рассчитанной получается при предположении меньшей мощности и плотности литосферы и большей мощности астеносферного слоя под Японским морем, что находит подтверждение в сейсмологических данных. Полученные результаты подтверждают выводы М. Е. Артемьева и Дж. Бодина [2], что под океаническими котловинами остаточные аномалии близки к нулю, они положительны в районах глубоководных желобов и отрицательны под котловинами окраинных морей.

На разрезе фокальной зоны, построенном, по Т. Иосии [23], показаны гипоцентры землетрясений, зарегистрированных с 1964 по 1973 г. Они фиксируют сейсмически активный слой, направленный под углом около 50° до глубины 400 км. Характерные особенности проявления сейсмичности следующие:

- основное количество очагов и основная доля энергии приходится на первые десятки километров (до 50—70 км);

- наличие фронта асейсмичности в блоке верхней мантии, расположенном к северо-западу от осевой части фокальной зоны, что, по-видимому, свидетельствует о различии физико-механических свойств среды, порождающей землетрясения в блоках мантии над и под фокальной зоной;

- различие механизма очагов и поля напряжений в области тектонических (коровых) землетрясений (преимущественно напряжение сжатия), в кровле и подошве фокальной зоны и на ее различных участках;

- наличие двойной фокальной зоны с ориентированными вдоль них напряжениями сжатия и растяжения.

Таким образом, интерпретация геологических, сейсмических, гравиметрических, магнитотеллурических, петрографических, геотермических данных свидетельствует о распространении в верхней мантии Японского моря мощного астеносферного слоя (линзы). В верхней мантии прилегающих регионов Приморья и Тихого океана слой с пониженными скоростями сейсмических волн слабо выражены. В Северо-Западной котловине Тихого океана, где мощность литосферы составляет 100 км, мантия уплотнена, в связи с чем астеносферные слои отсутствуют, а прослеживается слой с несколько пониженными значениями скоростей сейсмических волн (8,4 км/с); которые, однако, значительно более высокие, чем в переходной зоне на том же уровне. Котловина характери-

зуется низкими значениями теплового потока, а магматическая деятельность проявлялась в основном лишь в мезозойское время. Переходная зона отличается повышенным по сравнению с прилегающими регионами тепловым потоком, в соответствии с этим здесь в кайнозойское время проявились магматические процессы.

Такова современная картина глубинного строения региона геотраверса, которое следует учитывать при изучении проблемы развития зем-

ной коры. Процессы, протекающие в верхней мантии, связанные с образованием астеносферной линзы, вероятно, оказывают определяющее воздействие на формирование структур переходной зоны.

Авторы считают своим долгом выразить искреннюю благодарность сотрудникам Института по изучению землетрясений и Геологического института Токийского университета докторам С. Асано, Т. Иосии и Е. Такахаси за предоставленные научные материалы и обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аргентова В. В., Гнибиденко Г. С. и др.* Глубинное строение Приморья (по данным ГСЗ): М.: Наука, 1976.
2. *Аргемьев М. Н., Бодин Дж.* Плотностные неоднородности мантии под системами глубоководных желобов, островных дуг и окраинных морей.— Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1978, № 2.
3. *Борец В. В., Мардерфельд Б. Е., Чернявский Г. А.* К результатам магнитотеллурических зондирований на Дальнем Востоке.— Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1975, № 4.
4. *Ваньян Л. Л., Борец В. В. и др.* Изучение глубинной электропроводности в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану.— В кн.: Структура и геодинамика литосферы северо-запада Тихого океана по геофизическим данным. Владивосток, 1978.
5. *Васильковский Н. П.* Основные черты геологического строения дна Японского моря. М.: Наука, 1978.
6. *Гайманов А. Г., Павлов Ю. А. и др.* Аномальные гравитационные поля дальневосточных окраинных морей и прилегающей части Тихого океана. Новосибирск: Наука, 1974.
7. Гравиметрические карты Японского моря в редукциях в свободном воздухе, Буге и изостатической. М-б 1:2 000 000/Под ред. П. А. Строева.— ГУГК, 1979.
8. *Ковылин В. М.* Строение земной коры в области Японского моря. М.: Наука, 1979.
9. *Родников А. Г.* Островные дуги западной части Тихого океана. М.: Наука, 1979.
10. *Рябой В. З.* Структура верхней мантии территории СССР по сейсмическим данным.— М.: Недра, 1979.
11. *Asada T., Asano S.* Explosion Seismology.— In: The crust and upper mantle of the Japanese area.— Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 1972.
12. *Asada T., Shimamura N.* Observation of earthquakes and explosions at the bottom of the Western Pacific: Structure of oceanic lithosphere revealed by longshot experiment.— Amer. Geophys. Un., Geophys. Monogr. Washington, 1976, N 19.
13. *Atamaki S., Nozawa T.* A reference book of chemical data for Japanese granites. Geodynamics Project of Japan.— Geol. Surv. Japan, 1978.
14. The crust and upper mantle of the Japanese area, Pt. I, Geophysics.— Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 1972.
15. The crust and upper mantle of the Japanese area, Pt. II, Geology and Geochemistry.— Geol. Surv. Japan, Kawasaki, 1973.
16. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project. Washington: U. S. Government Printing Office, 1973, 1975, 1980.
17. *Kanamori H.* Mantle beneath the Japanese arc.— Phys. Earth Planet. Inter., 1970, N 3.
18. *Kitamura N., Onuki Y.* Geological and Crustal sections of the A-Zone, northeast Japan.— In: The crust and upper mantle of the Japanese area, Pt. II, Geology and Geochemistry.— Geol. Surv. Japan, Kawasaki, 1973.
19. *Maki T.* P-wave velocity structure in the upper mantle beneath the Japanese islands.— J. Seism. Soc. Japan, 1976, v. 29, N 3.
20. *Minato M., Hunahashi M., Watanabe J., Kato M.* Basement complexes and the Japanese Variscan (Abean) orogeny in northern main island (Honshu).— Nat. Sci. Japan, 1978, v. 3.
21. *Takahashi E.* Petrologic model of the crust and upper mantle of the Japanese island arcs.— Bull. Volcanol. IAVCEI, ser. vol. Proc. Intern. Geodyn. Conf. Magma Genesis. Tokyo, 1978.
22. *Tomoda Y.* Maps of free air and Bouguer gravity anomalies in and around Japan.— Univ. Tokyo Press, 1973.
23. *Yoshii T.* A detailed cross-section of the deep seismic zone beneath Northeastern Honshu, Japan.— Tectonophysics, 1979.

ИФЗ АН СССР

Москва

Междуведомственный геофизический комитет

АН СССР

Москва

Хоккайдский университет

Саппоро

Поступила в редакцию
8 декабря 1981 г.