

## Особенности скоростного строения мантии под докембрийскими структурами на примере Индийской платформы (по данным сейсмической томографии)

*Л.Н. Заец, И.В. Бугаенко, Т.А. Цветкова, 2021*

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина  
Поступила 8 июля 2020 г.

Приведены дополнительные данные, приближающие к пониманию движущих сил при формировании геологических структур и особенностей развития Индийской платформы. Здесь привлечены результаты сейсмической томографии и представлен их анализ. Получена трехмерная  $P$ -скоростная модель мантии Индийской платформы по методу тейлорового приближения, разработанному В.С. Гейко. Неоспоримые преимущества метода состоят в независимости от начального приближения (референсной модели) и лучшем приближении нелинейности. Согласно данным, мантия под Индийской платформой находится под влиянием как плюмов, так и флюидных систем. Влияние плюмов наблюдаются в виде низкоскоростных субвертикальных выходов из нижней мантии до переходной зоны; флюидов — в виде переслаивания высоко- и низкоскоростных аномалий из нижней мантии (или из переходной зоны верхней мантии) до верхней мантии. Дан анализ как общего скоростного строения мантии платформы, так и скоростного строения мантии под отдельными кратонами (Бандельканд, Сингбум, Бастар и Дарвар), совокупность которых составляет Индийскую платформу, и трапповых провинций. Пониженными скоростями выделяется в мантии область, которая на поверхности соответствует линеаменту Нармада-Сон, переходящему в Центральную Индийскую тектоническую зону. Мантийные скоростные структуры под Деканской трапповой провинцией вместе с областью растекания в переходной зоне мантии разделяют на глубинах 375 км платформу на две части. Выделены и проанализированы области в мантии с наклонными слоями: под кратонами Бандельканд и Сингбум, траппами Раджмахал и северной границей Деканских траппов. Согласно модели, в мантии хорошо выделяется область, граничащая с Гималаями. Показано, как при столкновении Индийской платформы с Евразийской окраиной толща верхней мантии расслаивается на пластины, способные к самостоятельным движениям, в том числе субдукции.

**Ключевые слова:** сейсмическая томография, мантия, Индийская платформа, траппы.

**Введение.** Индийская платформа имеет чрезвычайно динамичное прошлое, характеризующееся активной историей рифтинга, устойчивым эпизодическим магматизмом, множественными взаимодействиями плюмов и высокой подвижностью [Polet, Anderson, 1995; Pandey, Agrawal, 1999]. Это единственный обломок Гондваны, оказавшийся при ее распаде целиком в Северном полушарии и примкнувший около 40 млн лет тому назад к новому суперконтиненту Евразия. С гондванским периодом Индий-

ской платформы связывают деятельность плюмов Кергелен и Реюньон. Внедрение первого под литосферу Восточной Гондваны (130 млн лет назад) в районе сочленения юго-западной Австралии и Антарктиды затронуло континентальные окраины Индии в раннемеловой период, произошло излияние траппов в провинции Раджмахал (100—105 млн лет) [Сущевская и др., 2009]. С подъемом головной части плюма Реюньон над вулканическим о-вом Реюньон в Индийском океане на рубеже мела и

палеогена произошло излияние плато-базальтов Декана [Morgan, 1983]. Однако существуют и другие точки зрения на причину излияния плато-базальтов, основанные на геолого-геофизических данных [Sheth, 2005], одной из которых считают взаимодействие нескольких пересекающихся континентальных рифтовых зон Индии. В этой работе представлены дополнительные данные, которые, возможно, приблизят нас еще на шаг к пониманию движущих сил при формировании геологических структур и особенностей развития платформ. Современная концепция развития Земли, усовершенствованная с помощью методов сейсмотомографии, и следующие из нее прогнозные построения дают возможность сконцентрировать силы на главных, наиболее перспективных областях при поисках полезных ископаемых, изучении сейсмоопасных областей.

В большинстве сейсмотомографических работ, посвященных проблематике Индийской платформы, глубинность сейсмотомографических исследований ограничивается литосферой и переходной зоной верхней мантии. Основное внимание уделяется сейсмически активным областям и структурам с ними связанным, прослеживается поведение в зоне коллизии погружающейся на север Индийской плиты по верхней мантии и переходной зоне. В моделях, представленных в других работах, нет общего представления о скоростном строении мантии Индийской платформы и влиянии на нее окружающих структур [Zhao et al., 2010; Li et al., 2008; Huang, Zhao, 2006; Zhang et al., 2012]. Предлагаемая сейсмотомографическая скоростная модель представляет целостную работу по общим скоростным характеристикам мантии под платформой до глубины 2500 км с описанием влияния на них окружающих скоростных мантийных структур.

Получена 3-мерная  $P$ -скоростная модель мантии Индийской платформы по методу тейлорового приближения, разработанному Гейко В.С. [Гейко, 1997; Геуко, 2004]. Метод развивает идеи обобщенного поля времен прихода волн школы Гамбургца

и определяет локальные неоднородности, получая результат в скоростях. Приближение 3-мерной скоростной модели строится вне зависимости от возможной 1-мерной референтной модели, что отличает ее от других моделей. В работе в качестве исходных использовались данные о временах приходов первых вступлений  $P$ -волн на станции, представленные в бюллетенях ISC, начиная с 1964 г. Было построено обобщенное поле времен прихода  $P$ -волн в формате средней точки и получено 85 годографов — сечений преломленных волн. Максимальное количество сейсмических лучей, соответствующих вертикальному сечению обобщенного поля времен (число точек годографа), составляет 32242, а минимальное — 5246. Согласно проведенному тестированию, точность обращения годографов составляет 0,015 км/с. В работе [Гейко, 1997] для анализа точности полученного методом тейлорового приближения обращения приведен модельный пример. Разрешающая способность метода сейсмической томографии, согласно положениям сейсмической кинематики, составляет  $0,5^\circ \times 0,5^\circ \times 50$  км до глубины 1000 км включительно и  $1,0^\circ \times 1,0^\circ \times 100$  км после 1000 км. Полученные результаты определяются исходной системой наблюдений. Использованы времена прихода первых вступлений  $P$ -волн, представленные в бюллетенях ISC, начиная с 1964 г. Графическое представление скоростной модели мантии определяется горизонтальными сечениями с шагом 25 км в «истинных» скоростях, широтными и долготными сечениями с шагом  $1^\circ$ , которые представлены как изменение с глубиной невязок полученной скорости и обобщенной средней скорости для Евразии [Геуко, 2004].

**Общее скоростное строение мантии под исследуемым регионом.** Полуостровную Индию образует совокупность кратонных ядер: Бандельканд, Сингбум, Бастар и Дарвар, разделенных рифтовыми долинами Гондваны, швами и мегалинеаментами, которые неоднократно омолаживались, начиная с 1500 млн лет до настоящего времени [Meert et al., 2010]. Согласно [Хаин,

Лимонов, 2004], субконтинент Индостан представляет собой древнюю платформу, где центральную часть рассматривают как Центрально-Индостанский щит с наложенными на него позднедокембрийскими синеклизами, позднепалеозойско-раннемезозойскими и кайнозойскими рифтовыми авлакогенами и трапповой синеклизой Декана. Широтный линеймент (рифт) Нармада-Сон с переходом в Центральную Индийскую тектоническую зону делит Центрально-Индостанский щит на северную и южную части, в центре которых находятся соответственно Банделькандский (северная часть щита) и Дарварский древние массивы (южная часть щита или Южно-Индийский блок). Северо-восточная часть платформы включает в себя кратон Сингбум, восточная — кратон Бастар, ограниченные рифтами (рис. 1).

Характеризуя мантию под платформой, можно выделить ее основные скоростные характеристики (согласно делению мантии сверху вниз на верхнюю мантию, переходную зону верхней мантии, зону раздела-1, среднюю мантию, зону раздела-2 и нижнюю мантию [Пушаровский, Пушаровский, 2010] (рис. 2—4)).

1. Верхняя мантия под древней структурой в основном двухслойная: верхний слой высокоскоростной, нижний низкоскоростной. Повышенные скорости выделяются в среднем до глубины 200 км (рис. 2, сечения 75°, 80° в.д.). В центральной части максимальная глубина распространения высокоскоростного слоя достигает 300 км под северо-восточной частью кратона Бандельканд (рис. 2, сечение 80° в.д.) и к окраинам платформы утоняется до 100 км (под восточной окраиной кратона Бастар до 75 км). Характерна тенденция уменьшения мощности высокоскоростного слоя верхней мантии с запада на восток. Низкоскоростной слой верхней мантии прослеживается в среднем до глубин 400—450 км. Максимальная глубина распространения низкоскоростного слоя верхней мантии выделяется на границе Деканских траппов с кратоном Бастар, где она опускается до 500 км.

2. Высокоскоростная переходная зона верхней мантии представлена в пределах от 400 км (местами до 450 км) до 600 км (максимум 750 км). На рис. 5 показана карта глубины подошвы переходного слоя верхней мантии, где оранжевый цвет соответствует высокоскоростной интрузии, которая выделяется с верхней мантии до зоны раздела-2 (мантия под Деканскими траппами). Более мощная переходная зона верхней мантии наблюдается в области стыка Индийских (северо-восточная часть кратона Бандельканд) и Гималайских структур за счет внедрения низкоскоростных аномалий. Здесь высокоскоростной слой переходной зоны мантии расположен в пределах глубин 450—700 км (до 800 км) (рис. 2, сечение 75° в.д.). Под кратонами Дарвар и Бандельканд глубины высокоскоростной переходной зоны верхней мантии выделяются в пределах 400—600 км, что характерно для стабильных докембрийских структур; в восточной части платформы подошва переходной зоны опускается до глубины до 650 км (рис. 5, рис. 3, сечение 14° с.ш.).

3. Зона раздела-1 (600—1100 км) под кратоном Дарвар выделяется низкоскоростной аномалией с максимальной невязкой  $-0,05$  км/с (рис. 3, сечение 14° с.ш.). В районе Деканских траппов с восточной стороны зона раздела-1 отсутствует (рис. 3, сечение 18° с.ш.). С западной стороны выделяется прогиб низкоскоростной области до глубины 1200—1500 км (рис. 3, сечение 21° с.ш.). В мантии под кратоном Бандельканд зона раздела-1 выделяется на глубинах 600—800 (местами опускаясь до 1200 км).

4. Средняя мантия под Индийской платформой представлена повышенными скоростями и расположена между зоной раздела-1 (глубины 600—1000 км) и зоной раздела-2 (глубины 1650—2100 км, местами до 1900—2200 км) с пониженными скоростями.

5. В низкоскоростной зоне раздела-2, непосредственно под Индийской платформой, выделяются контрастные низкоскоростные аномалии с невязкой  $-0,125$  км/с,

соответствующие на поверхности кратонам Дарвар и Бандельканд (рис. 2, сечение 75° в.д.). Их разделяет высокоскоростная область, соответствующая Деканским траппам, а далее к востоку низкоскоростной субвертикальный выход из нижней мантии, совпадающий на поверхности с

областью простираения Центральной Индийской тектонической зоны. Тектоническая зона выделяется в мантии флюидами и служит соединяющим звеном между двумя трапповыми провинциями — Раджмахал и Декан. В пределах глубин 600—2000 км низкоскоростные мантийные

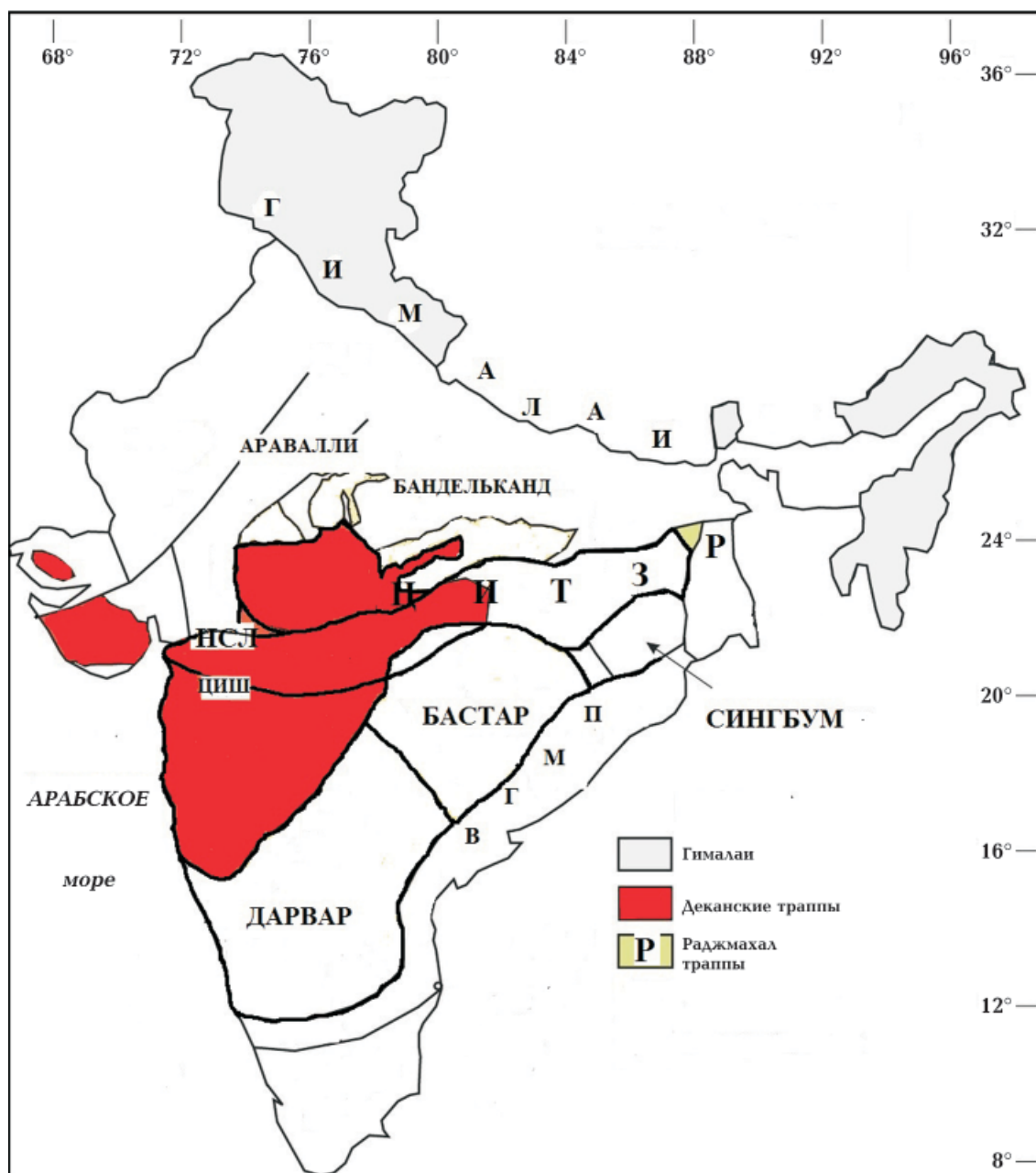


Рис. 1. Обобщенная тектоническая карта Индийского субконтинента: докембрийские кратоны, мобильные пояса и линеаменты. ВГМП — подвижный пояс Восточной Гаты, НСЛ — линеамент Нармада-Сон, ЦИТЗ — Центральная Индийская тектоническая зона, по [Rao, Reddy, 2002].

Fig. 1. Generalized tectonic map of Indian subcontinent: Precambrian Cratons, Mobile Belts and Lineaments. ВГМП — Eastern Ghats Mobile Belt, НСЛ — Narmada-Son Lineament, ЦИТЗ — Central Indian Tectonic Zone (modified from [Rao, Reddy, 2002]).

структуры со стороны Индийского океана внедряются в мантийные скоростные структуры Индийской платформы (рис. 6). Низкоскоростной слой зоны раздела-2 со стороны Индийского океана проходит через всю центральную часть мантии плат-

формы, достигая Гималайских структур (рис. 2, сечения 75°, 80° в.д.). Под западной окраиной платформы низкоскоростной слой со стороны океана доходит до 15—20° с.ш. Рядом с Деканскими траппами (в мантии под Арабским морем) выделяется

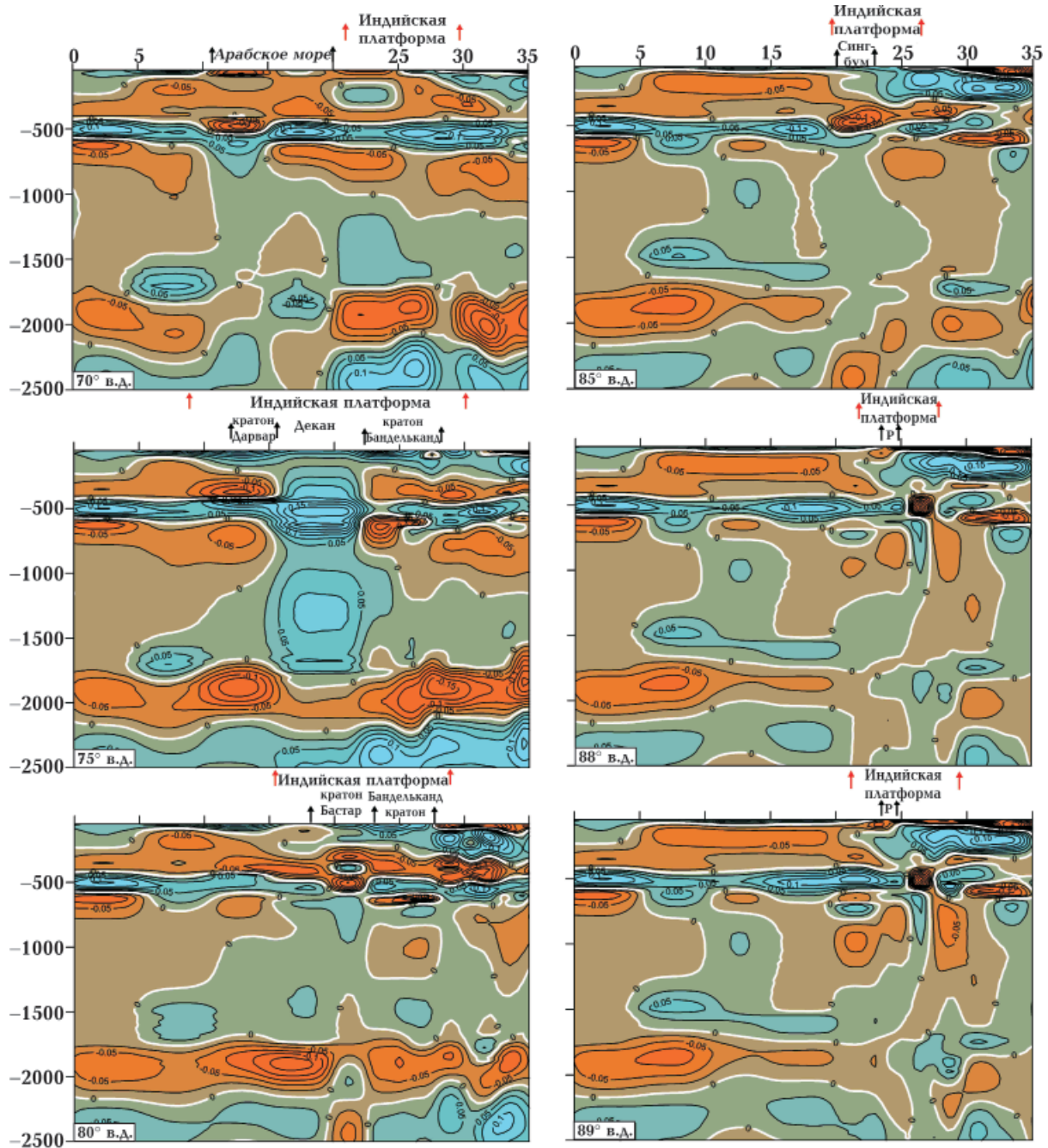


Рис. 2. Долготные вертикальные сечения 70°, 75°, 80°, 85°, 88° и 89° в.д. 3-мерной  $P$ -скоростной модели Индийской платформы до глубины 2500 км.  $P$  — траппы Раджмахал.

Fig. 2. Long-term vertical sections of the three-dimensional  $P$ -velocity model of the mantle of the Indian Platform to a depth of 2500 km at 70°, 75°, 80°, 85°, 88° and 89°.  $P$  — trap Rajmahal.

выход пониженных скоростей из нижней мантии (так называемый плюм) (рис. 3, сечение 18° с.ш.). У восточной окраины низкоскоростной слой со стороны Индийского океана доходит до мантии северо-восточной окраины платформы и, под областью, соответствующей на поверхности траппам Раджмахал, поднимается к переходной зоне, и далее в верхнюю мантию (рис. 2, сечение 89° в.д.). На рис. 6 показано влияние низкоскоростных структур зоны раздела-2 со стороны Индийского океана и Гималайских структур на скоростные мантийные структуры платформы. Как видно, окраинные части находятся под влиянием как Гималайских мантийных структур (северная часть платформы), так и океанических мантийных структур.

**Строение мантии под основными тектоническими структурами Индийской**

**платформы.** Согласно полученным данным и в соответствии с тектоническими структурами на поверхности, мантия под платформой делится на основные блоки: Южно-Индийский блок (кратон Дарвар), Северный (кратон Бандельканд), Северо-Восточный (кратоны Бастар и Сингбум) (см. рис. 1).

Под Южно-Индийским блоком (Дарварский кратон) верхняя мантия двухслойная (рис. 2, сечение 75° в.д., рис. 3, сечение 14° с.ш.). На глубине 50 км под Южно-Индийским блоком (южной частью Центрально-Индостанского щита) она высокоскоростная. Максимальная глубина высокоскоростного слоя под этой частью 200 км. По сравнению с окружающими структурами он является более опущенным вниз и имеет максимальное значение невязки 0,15 км/с. Ниже до глубины

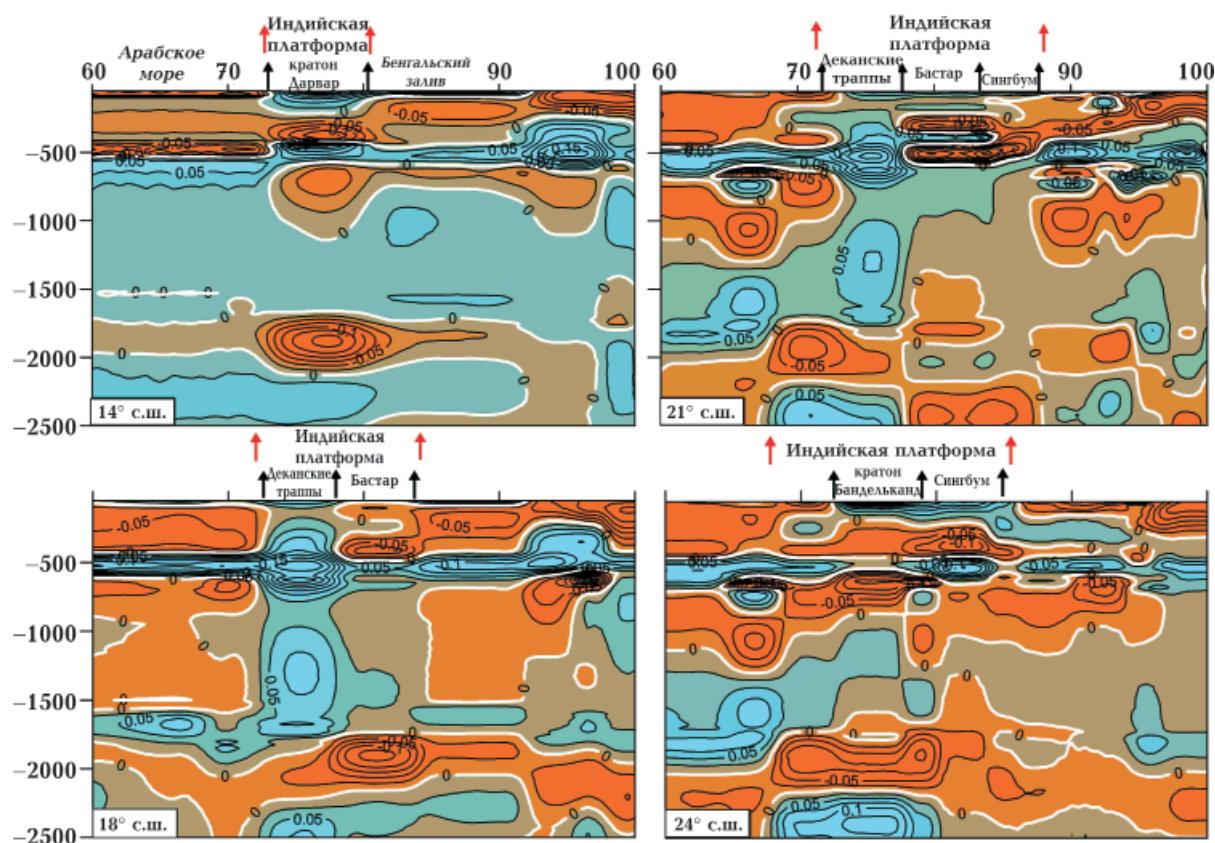


Рис. 3. Широтные вертикальные сечения 14°, 18°, 21° и 24° с.ш. трехмерной *P*-скоростной модели мантии Индийской платформы до глубины 2500 км.

Fig. 3. Latitudinal vertical sections of the three-dimensional *P*-velocity model of the mantle of the Indian Platform to a depth of 2500 km at 14°, 18°, 21° and 24° NL.

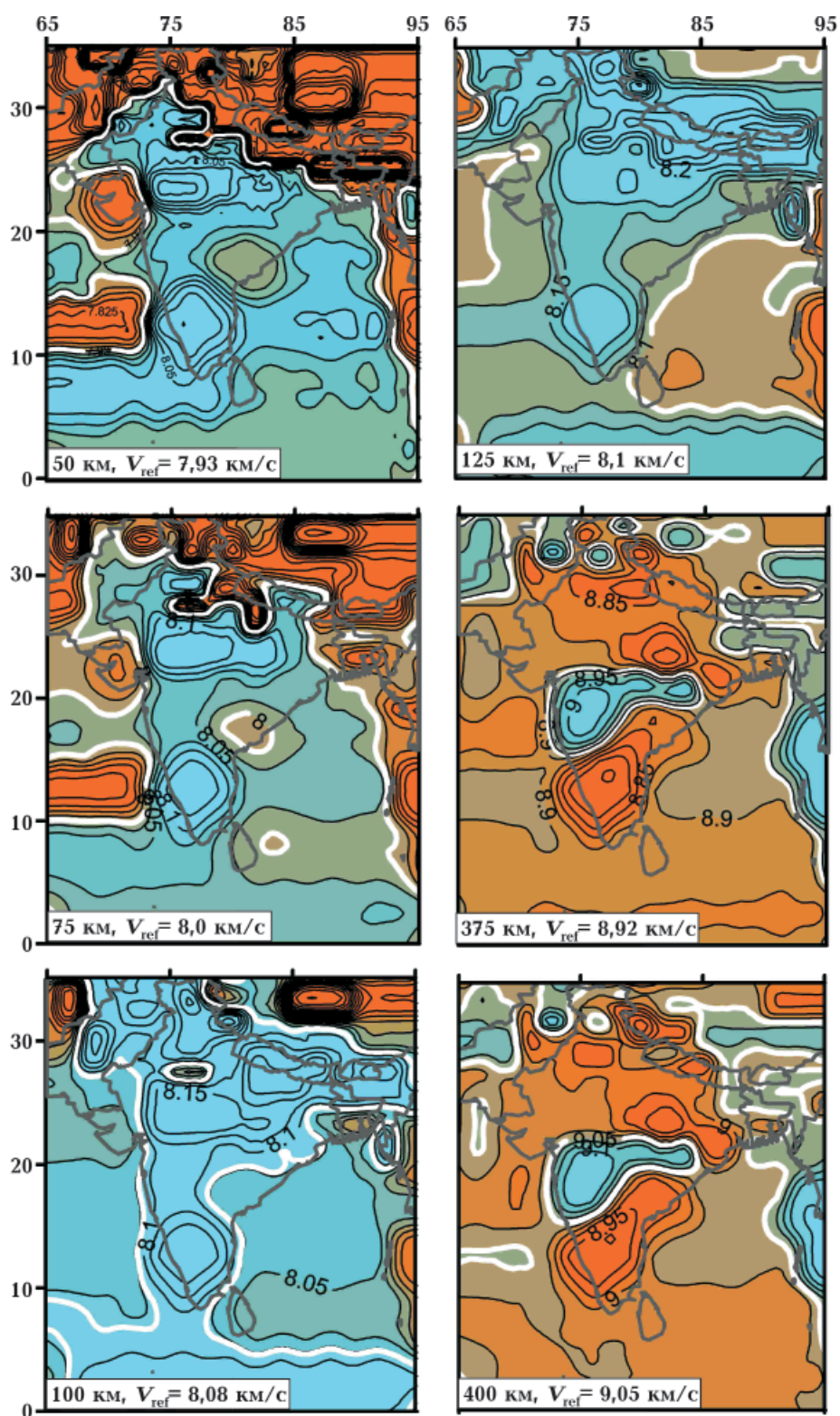


Рис. 4. Горизонтальные сечения трехмерной  $P$ -скоростной модели мантии Индийской платформы (глубины 50, 75, 100, 125, 375 и 400 км); белым выделена изолиния, соответствующая обобщенной средней скорости на данной глубине.

Fig. 4. Horizontal sections of a three-dimensional  $P$ -velocity model of the mantle of the Indian Platform (depths of 50, 75, 100, 125, 375 and 400 km); white isoline, corresponding to the generalized average velocity at a given depth.

400 км, выделяется низкоскоростная часть верхней мантии с максимальным значением отрицательной невязки  $-0,125$  км/с. В низкоскоростной зоне раздела-2 выделяется низкоскоростная аномалия с невязкой  $-0,125$  км/с.

Северо-Восточный блок включает в себя кратоны Бастар и Сингбум, ограниченные рифтами. Кратон Бастар расположен на юге блока (рис. 2, сечение  $80^\circ$  в.д., рис. 3, сечение  $21^\circ$  с.ш.). Здесь верхняя мантия представлена высокоскоростным слоем в среднем до глубины 200 км (под южной окраиной кратона до 50—100 км). Западная окраина кратона Бастар граничит с Деканскими траппами. Под высокоскоростным слоем верхней мантии на глубинах 200—600 км прослеживается слой пониженных скоростей с внедрением слоя повышенных скоростей со стороны Деканских траппов (на глубине 350—450 км). Повышенными скоростями характеризуется область 600—1400 км, здесь также вероятно влияние мантийных скоростных структур со стороны Деканской трапповой провинции. На глубинах 150—250 км выделяется низкоскоростная аномалия с невязкой  $-0,075$  км/с. В низкоскоростной зоне раздела-2 присутствует субвертикальная низкоскоростная аномалия на глубинах 1700—2100 км с невязкой  $-0,125$  км/с, которая распространяется с нижней мантии.

Кратон Сингбум расположен в северо-восточной части платформы. Верхняя мантия характеризуется повышенными скоростями, максимальная глубина его в центральной части 350 км (рис. 3, сечения  $21^\circ$ ,  $24^\circ$  с.ш., рис. 2, сечение  $85^\circ$  в.д.). К северу высокоскоростной слой погружается под низкоскоростной слой верхней мантии Гималайских структур до  $35^\circ$  с.ш. Низкоскоростной слой верхней мантии прослеживается на глубинах 250—550 км. В южной части кратона в низкоскоростном слое верхней мантии выделяется аномалия с максимальной невязкой  $-0,125$  км/с, в результате чего подошва низкоскоростного слоя опускается до глубины 600 км. В нижней мантии выделяется выход пониженных скоростей (нижнемантийный плюм),

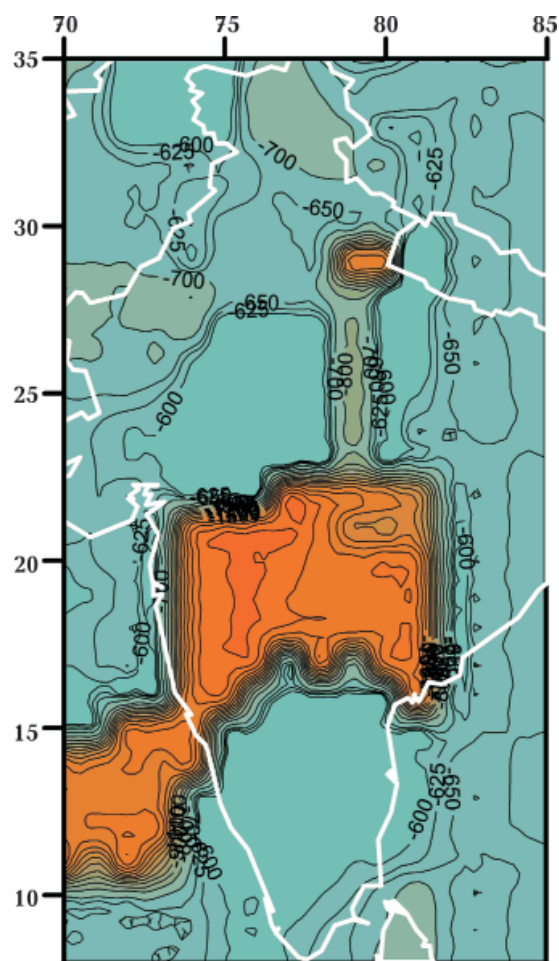


Рис. 5. Карта глубины подошвы переходного слоя верхней мантии Индийской платформы.

Fig. 5. Map of the depth of the bottom of the transitional layer of the upper mantle of the Indian platform.

одна ветвь которого имеет продолжение в зоне раздела-2 в северном направлении, а основная часть доходит до переходной зоны верхней мантии (в пределах кратона).

Северную часть Центрально-Индостанского щита занимает кратон Бандельканд (рис. 2, сечение  $80^\circ$  в.д., рис. 3, сечение  $24^\circ$  с.ш.). Эта часть платформы характеризуется двухслойной верхней мантией: слой повышенных скоростей в верхней мантии прослеживается на юге до глубины 175 км, в северной части — до 225 км. Выделяется пологое погружение высокоскоростного слоя верхней мантии в северо-восточном направлении под Гималайские структуры. Второй слой отличается пониженными скоростями. Он характеризуется



различной мощностью — в южной части кратона до 250 км, в северном и восточном направлениях до 50—100 км. Переходная зона верхней мантии — высокоскоростная с приподнятой подошвой в юго-западной части платформы (граничащей с мантией Деканских траппов), вероятно, за счет низкоскоростной аномалии зоны раздела-1, характеризующейся значением невязки  $-0,125$  км/с (рис. 2, сечение  $75^\circ$  в.д.). В зоне раздела-2 и нижней мантии выделяются низкоскоростная и высокоскоростная аномалии, соответствующие размерам и границам кратона Бандельканд. С восточной окраины кратона в средней мантии прослеживается наклонный слой, идущий в западном направлении с глубины 700 до 2000 км (рис. 3, сечение  $24^\circ$  с.ш.).

Западная окраина Индийской платформы в мантии отличается чередованием низкоскоростных и высокоскоростных аномалий от нижней мантии до переходной зоны верхней мантии включительно. Верхняя мантия низкоскоростная на глубинах 50—550 км ( $10\text{--}15^\circ$  с.ш.  $\times$   $70\text{--}73^\circ$  в.д.) (рис. 3, сечение  $14^\circ$  с.ш., рис. 2, сечение  $70^\circ$  в.д. — Арабское море). Переходная зона верхней мантии высокоскоростная с максимальным значением невязки  $0,15$  км/с. Глубины 500—1200 км характеризуются пониженными скоростями с невязкой  $-0,05$  км/с, а с глубин 1200—1800 км наблюдается внедрение слоя повышенных скоростей с севера (со стороны Деканских траппов). Граница этого внедрения доходит до  $4\text{--}5^\circ$  с.ш. В низкоскоростной зоне раздела-2 на глубинах 1650—2150 км выделяется низкоскоростная аномалия с невязкой  $-0,125$  км/с, которая коррелируется на поверхности с кратоном Дарвар. Кровля и подошва зоны раздела-2 под кратоном приподнята.

Верхняя мантия восточной континентальной окраины Индийской платформы характеризуется тонким высокоскоростным слоем до глубины 100 км на юге и до 75 км на севере и более мощным низкоскоростным слоем. До  $14^\circ$  с.ш. с юга на север подошва низкоскоростного слоя стабильно прослеживается по глубине 425 км, а

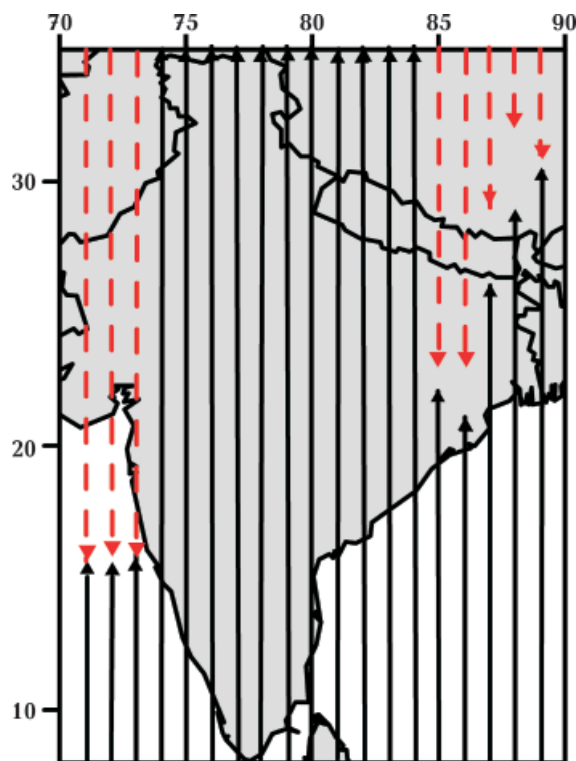


Рис. 6. Распространение низкоскоростных слоев зоны раздела-2: с юга — сплошная линия; со стороны Гималайских структур — прерывистая.

Fig. 6. Distribution of low-velocity layers of the zone of separation-2: from the south — a solid line; from the Himalayan structures — intermittent.

с  $15^\circ$  с.ш. немного погружается в сторону платформы, вероятно, в результате появления контрастной аномалии с невязкой  $-0,1$  км/с (на глубине 350—450 км) на границе с платформой. С  $16^\circ$  с.ш. подошва верхней мантии для восточной окраины платформы более приподнята и выделяется на глубине 400 км. Переходная зона верхней мантии (425—600 км) высокоскоростная. Низкоскоростная зона раздела-1 (с юга на север до  $15^\circ$  с.ш.) мощностью 100 км выделяется до глубины 700 км. После  $15^\circ$  с.ш. мощность низкоскоростного слоя увеличивается и его подошва определяется на глубине 1500 км (рис. 2, сечение  $89^\circ$  в.д.)

Широтный линеament (рифт) Нарманда-Сон (см. рис. 1, НСЛ) вместе с Центральной Индийской тектонической зоной являются одной из наиболее важных тектонических особенностей в геологии Ин-

дийской платформы и представляют собой древний шов между южным (Дарвар) и северным (Бандельканд) протоконтинентами [Radhakrishna, 1989]. В мантии, начиная с  $78^\circ$  в.д. ( $20\text{--}22^\circ$  с.ш.), тектонический шов выделяется субвертикальным выходом из нижней мантии пониженных скоростей на глубинах 2500—1400 км. В верхней мантии наблюдается мантийная скоростная колонка с переслаиванием аномалий: низкоскоростная аномалия со значением невязки  $-0,1$  км/с на глубине 450—575 км; высокоскоростная аномалия  $0,025$  км/с на глубине 350—450 км; низкоскоростная аномалия с невязкой скорости  $0,1$  км/с на глубине 200—350 км. Такая структура отражает реакцию среды на взаимодействие с восходящими потоками флюидов [Летников, 2001].

**Траппы.** На стыке кратона Сингбум (с запада) и Бенгальского бассейна (с востока), располагаются траппы Раджмахал. Предполагают, что они развились в результате расплавления мантийного материала вдоль северо-восточной окраины Индии после раскола Гондваны [Kent et al., 2002].

Согласно представленной модели, верхняя мантия под траппами Раджмахал — область стыка высокоскоростных и низкоскоростных слоев с пологим погружением первых на север под низкоскоростной слой. Максимальное распространение погружающегося высокоскоростного слоя по  $35^\circ$  с.ш. до глубины 350 км (рис. 2, сечение  $88^\circ$  в.д.).

Верхняя мантия под трапповой провинцией с юго-запада, со стороны мантии кратона Сингбум, представляет собой погружающийся высокоскоростной слой, глубина подошвы которого достигает до 350 км; восточная окраина характеризуется пониженными скоростями до глубины 100 км.

По переходной зоне верхней мантии выделяются контрастные высокоскоростные аномалии (невязка  $0,15$  км/с) как с севера, так и с юга, разделенные низкоскоростной аномалией со значением невязки  $-0,22$  км/с, которая входит в низкоскоростную область, распространяющуюся

от нижней мантии. В средней мантии под трапповой провинцией Раджмахал на квазиоднородном фоне выделяются субвертикальные области пониженных скоростей с максимальным значением невязок  $-0,05$  км/с. Корни субвертикальных низкоскоростных аномалий идут с нижней мантии и можно предположить, что они и могут служить подпиткой трапповых формаций (рис. 3, траппы Раджмахал).

На западе Индийской платформы на рубеже мел—палеоген происходило формирование крупной фанерозойской трапповой провинции (Деканские траппы) [Biswas, 1987]. Под областью Деканских траппов выделяется вертикальная высокоскоростная область, прослеживающаяся с глубины 1800—1900 км в верхнюю мантию. В переходной зоне высокоскоростные аномалии различаются своей выпуклостью вверх до глубины 100 км. Здесь же на глубинах 400—600 км высокоскоростная область распространяется по переходной зоне верхней мантии. В западном направлении (по переходной зоне) ее граница доходит до  $58^\circ$  в.д.; в северном — до  $39^\circ$  с.ш. (рис. 2, сечение  $75^\circ$  в.д., рис. 3, сечение  $18^\circ$ ,  $21^\circ$  и  $24^\circ$  с.ш.).

Северная граница трапповой провинции Декан выделяется в переходной зоне верхней мантии и нижней мантии наклонным высокоскоростным слоем, который погружается в западном направлении с глубины 600—800 км на глубину до 2000 км (рис. 3, сечение  $21^\circ$  с.ш.). С востока (на границе с кратоном Бастар) вертикальная высокоскоростная неоднородность заканчивается в нижней мантии выходом пониженных скоростей ( $78\text{--}79^\circ$  в.д.). Северо-западное окончание трапповой провинции представлено в мантии переслаиванием высоко- и низкоскоростных аномалий с глубины 2400 до 50 км включительно. Максимальные значения скоростных аномалий здесь наблюдаются в нижней мантии и зоне раздела-2. В сущности, под траппами Декан мантия окружена на глубинах 200—900 и 1700—2100 км контрастными низкоскоростными аномалиями с невязками  $-(0,125\text{--}0,15)$  км/с. Таким образом,

несмотря на то, что мантия непосредственно под Деканской траптовой провинцией находится в так называемом «охлажденном состоянии» (высокие скорости), все

ее скоростное окружение свидетельствует об активизации этого региона в мантии.

**Горизонтальные сечения 3-мерной P-скоростной модели мантии Индийской**

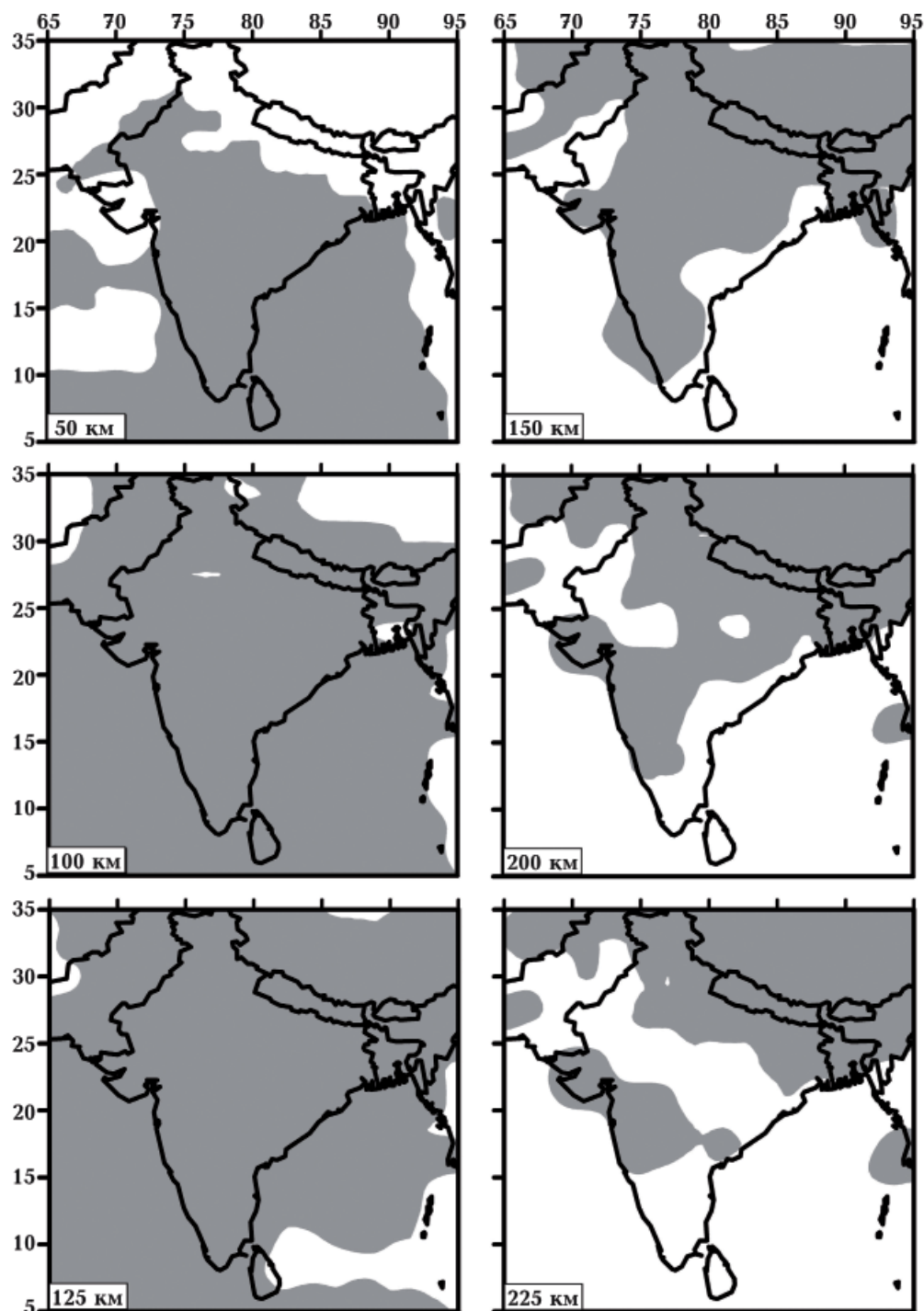


Рис. 7. Продвижение высокоскоростного слоя верхней мантии на разных глубинах 50, 100, 125, 150, 200 и 225 км.

Fig. 7. Promotion of the high-velocity layer of the upper mantle at different depths 50, 100, 125, 150, 200 and 225 km.

**платформы.** Скоростная модель мантии представляется также в виде горизонтальных сечений (см. рис. 4) в истинных скоростях с шагом 25 км по глубине. Согласно горизонтальным сечениям, на глубине 50 км высокоскоростные аномалии обособляют кратоны Бандельканд и Дарвар. Мантийная скоростная граница, проходящая по изолинии со значением референтной скорости, на данной глубине не соответствует границам платформы на поверхности. На глубине 75 км наблюдается заезд низкоскоростного слоя верхней мантии с севера-запада, со стороны Гималайско-Тибетской окраины. Высокоскоростные аномалии со значением скорости 8,1 и 8,06 км/с выделяют соответственно кратон Дарвар (Южно-Индийский блок платформы) и кратон Бандельканд (Северный блок платформы). Аномалии выделяются и на глубине 100 км. Высокоскоростная область захватывает часть Гималайской области, и на глубине 125 км Гималаи становятся высокоскоростными. Таким образом, на горизонтальных сечениях выделяется продвижение (въезд) Индийской платформы в Евразийскую окраину. До глубины 150—175 км повышенные скорости занимают большую часть платформы, за исключением Восточных Гат и центральной части пояса Аравалли (см. рис. 1). На глубине 225 км повышенные скорости характерны для Деканской трапповой провинции и северной окраины Индостанской платформы.

Пониженными скоростями выделяется в мантии область, соответствующая на поверхности линеаменту Нармада-Сон, переходящего в Центральную Индийскую тектоническую зону. На горизонтальных сечениях (см. рис. 4) хорошо видно, как мантийные скоростные структуры под Деканской трапповой провинцией вместе со своей областью растекания в переходной зоне мантии разделяют на глубинах 375 км платформу на две части.

На рис. 7, составленном по горизонтальным сечениям, показано, как при столкновении Индийской платформы (коллизии) с Евразийской окраиной толща верхней

мантии расслаивается на крупные пластины, способные к самостоятельным движениям, в том числе и субдукции. Высокоскоростная область на глубине 50 км охватывает всю Индийскую платформу, включая Арабское море и Бенгальский залив. Такая ситуация наблюдается до глубины 125 км включительно. Высокоскоростная область захватывает и Гималайские структуры. С глубины 150 км область распространения повышенных скоростей сужается: на 150 км она ограничивается Индийской платформой (за исключением складчатых структур восточной окраины платформы) и Гималайскими структурами, на 200—225 км область уменьшается и в пределах платформы.

**Выводы.** Мантия под Индийской платформой находится под влиянием нижнемантийных плюмов и флюидных систем. Плюмы выделяются в виде низкоскоростных субвертикальных выходов с нижней мантии до переходной зоны. На поверхности они коррелируются с широтным линеаментом Нармада-Сон с переходом в Центральную Индийскую тектоническую зону и разделяют платформу на две части. По переходной зоне платформу разделяет на две части высокоскоростная область растекания, которая распространяется от высокоскоростной интрузии в мантии под Деканскими траппами (из низов средней мантии).

Мантия под траппами Декан и Раджмагал имеет различное скоростное строение. Деканские траппы выделяются в мантии вертикальным высокоскоростным слоем, выпуклым в верхней мантии и растекающимся по переходной зоне верхней мантии. Окраины кратонов Бандельканд, Дарвар, граничащие с Деканской трапповой провинцией, представлены низкоскоростными аномалиями, наиболее интенсивными в нижней части верхней мантии и зоне раздела-2. Максимальные значения невязки наблюдаются на глубине 1800—2200 км (–0,1 км/с) и на глубине 550—800 км (–0,125 км/с). Верхняя мантия под траппами Раджмагал — область стыка высокоскоростных и низкоскоростных сло-

ев с пологим погружением первых на север до глубины 350 км. В средней мантии выделяются субвертикальные области пониженных скоростей с максимальным значением невязок  $-0,05$  км/с. Корни субвертикальных низкоскоростных аномалий идут с нижней мантии и, вероятно, являются подпиткой трапповых провинций. Трапповые провинции отделены от прилегающих к ним кратонов флюидными зонами, представляющие собой так называемые мантийные скоростные колонки с переслаиванием высоко- и низкоскоростных аномалий, которые выделяются с нижней мантии до верхней [Летников, 2001]. Непосредственно трапповые провинции (Декан и Раджмахал) в мантии объединены ослабленными зонами и переходят одна в другую.

Выделены области в мантии с наклонными слоями:

– под кратоном Бандельканд наблюдается пологое погружение высокоскоростного слоя верхней мантии в северо-

восточном направлении под Гималайские структуры;

– под восточной окраиной кратона Бандельканд в средней мантии прослеживается наклонный слой, идущий в западном направлении с глубины 700 до 2000 км;

– под траппами Раджмахал в верхней мантии в области стыка высокоскоростных и низкоскоростных слоев — пологое погружение первых на север до глубины 350 км;

– в верхней мантии под кратоном Сингбум высокоскоростной слой погружается в северо-восточном направлении под низкоскоростной слой верхней мантии Гималайских структур. Граница простирается до  $35^\circ$  с.ш.;

– северная граница Деканской трапповой провинции выделяется в переходной зоне верхней мантии и нижней мантии наклонным высокоскоростным слоем, который погружается в западном направлении с глубины 600—800 км на глубину до 2000 км.

### Список литературы

- Гейко В.С. Тейлорово приближение волнового уравнения и уравнения эйконала в обратных сейсмических задачах. *Геофиз. журн.* 1997. Т. 19. № 3. С. 48—68.
- Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы и проблемы рудогенеза. *Геология рудных месторождений.* 2001. Т. 43. № 4. С. 291—307.
- Пушаровский Ю.М., Пушаровский Д.Ю. Геология мантии Земли. Москва: ГЕОС, 2010. 138 с.
- Сущевская Н.М., Беяцкий Б.В., Лейченко Г.Л., Лайба А.А. Эволюция глубинного плюма Кару-Мод в Антарктике и его влияние на магматизм ранних стадий раскрытия Индийского. *Геохимия.* 2009. № 1. С. 3—20.
- Хаин В.Е., Лимонов А.Ф. Региональная геотектоника (тектоника континентов и океанов): учебное пособие. Тверь: Герс, 2004. 270 с.
- Biswas, S.K. (1987). Regional Tectonic Framework, Structure and Evolution of the Western Marginal Basins of India. *Tectonophysics*, 135, 302—327. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90115-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90115-6).
- Geyko, V.S. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 1. С. 3—32.
- Huang, J., & Zhao, D. (2006). High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions, *Journal of Geophysical Research*, 111, B09305. <https://doi.org/10.1029/2005JB004066>.
- Kent, R.W., Pringle, M.S., Müller, D., Saunders, A., & Ghose, N.C. (2002).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology of the Rajmahal Basalts, India, and their Relationship to the Kerguelen Plateau. *Journal of Petrology*, 43(7), 1141—1153. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.7.1141>.
- Li, C., van der Hilst, R., Meltzer, A.S., Engdahl, E.R. (2008). Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. *Earth and Planetary Science Letters*, 274, 157—168, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.016>.

- Meert, J.G., Pandit, M.K., Pradhan, V.R., Banks, J., Sirianni, R., Stroud, M., Newstead, B., & Gifford, J. (2010). Show more Precambrian crustal evolution of Peninsular India: A 3.0 billion year odyssey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6), 483—515. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.04.026>.
- Morgan, W.J. (1983). Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, 94(1-4), 123—139. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90013-6).
- Pandey, O.P. & Agrawal, P.K. (1999). Lithospheric Mantle Deformation beneath the Indian Cratons. *The Journal of Geology*, 107(6), 683—692. <https://doi.org/10.1086/314373>.
- Polet, J. & Anderson, D.L. (1995). Depth extent of cratons as inferred from tomographic studies. *Geology*, 23(3), 205—208. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0205:DEOCAI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0205:DEOCAI>2.3.CO;2)
- Radhakrishna, B.P. (1989). Suspect tectono-stratigraphic terrane elements in the Indian subcontinent. *Journal of the Geological Society of India*, 34(1), 1—24.
- Rao, V.V. & Reddy, P.R. (2002). A Mesoproterozoic supercontinent: evidence from the Indian shield. *Gondwana Research*, 5, 63—74. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70889-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70889-3).
- Sheth, H.C. (2005). From Deccan to Réunion: No trace of a mantle plume. In G.R. Foulger, J.H. Natland, D.C. Presnall, D.L. Anderson (Eds.), *Plates, plumes, and paradigms* (pp. 477—501). Geological Society of America Special Paper 388.
- Zhao, J., Yuan, X., Liu, H., Kumar, P., Pei, S., Kind, R., Zhang, Z., Teng, J., Ding, L., Gao, X., Xu, Q., & Wang, W. (2010). The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. *PNAS*, 107(25), 11229—11233. <https://doi.org/10.1073/pnas.1001921107>.
- Zhang, H., Zhao, D., Zhao, J., & Xu, Q. (2012). Convergence of the Indian and Eurasian plates under eastern Tibet revealed by seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(6), Q06W14. <https://doi.org/10.1029/2012GC004031>.

## Features of the velocity structure of the mantle under the Precambrian structures on the example of the Indian platform (according to seismic tomography)

L.N. Zaiets, I.V. Bugaienko, T.A. Tsvetkova, 2021

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

The paper presents additional data, approaching to understanding the driving forces in the formation of geological structures and the development of the Indian platform. The results of seismic tomography are attracted here and their analysis is presented. A 3-dimensional *P*-velocity model of the mantle of the Indian platform was obtained according to the Taylor approximation method developed by V. Geyko. The undeniable advantages of the method are independence from the initial approximation (reference model) and the best approximation of nonlinearity. According to the data, the mantle under the Indian platform is influenced by both plumes and fluid systems. The influence of plumes is observed in the form of low-velocity subvertical exits from the lower mantle to the transition zone; fluids — in the form of interbedding of high and low velocity anomalies from the lower mantle (or from the transition zone of the upper mantle) to the upper mantle. An analysis is presented of both general velocity structure of the platform mantle and the velocity structure of the mantle under individual cratons (Bandelkand, Singbhum, Bastar and Darvar), the totality of which forms the Indian platform and the trap provinces. At lower velocity, an area is distinguished in the mantle that corresponds to the surface of the Narmada-Son lineament moving into the Central Indian Tectonic Zone. The mantle high-

velocity structures under the Deccan trap province, together with their spreading area in the transitional zone of the mantle, subdivide the platform into two parts at depths of 375 km. Areas in the mantle with inclined layers were identified and analyzed: under the cratons Bandelkand and Singbum, the Rajmahal traps and the northern border of the Deccan traps. According to the model, an area bordering the Himalayas is well distinguished in the mantle. It is shown how, when the Indian platform collides with the Eurasian margin, the upper mantle stratifies into plates capable of independent motions, including subduction.

**Key words:** seismic tomography, mantle, Indian platform, traps.

## References

- Geyko, V.S. (1997). Taylor approximation of the wave equation and the eikonal equation in inverse seismic problems. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 19(3), 48—68 (in Russian).
- Letnikov, F.A. (2001). Super-deep fluid systems of the Earth and problems of ore formation. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 43(4), 291—307 (in Russian).
- Pushcharovskiy, Yu.M., & Pushcharovskiy, D.Yu. (2010). *Geology of the Earth's mantle*. Moscow: Geos, 138 p. (in Russian).
- Sushevskaya, N.M., Belyatskiy, B.V., Leichenkov, G.L. & Layba, A.A. (2009). Evolution of the Karu-Mod deep plume in the Antarctic and its effect on magmatism of the early stages of the Indian revelation. *Geokhimiya*, (1), 3—20 (in Russian).
- Khain, V.E. & Limonov, A.F. (2004). *Regional geotectonics (tectonics of continents and oceans): a training manual*. Tver: Gers, 270 p. (in Russian).
- Biswas, S.K. (1987). Regional Tectonic Framework, Structure and Evolution of the Western Marginal Basins of India. *Tectonophysics*, 135, 302—327. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90115-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90115-6).
- Geyko, V.S. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 1. С. 3—32.
- Huang, J., & Zhao, D. (2006). High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *Journal of Geophysical Research*, 111, B09305. <https://doi.org/10.1029/2005JB004066>.
- Kent, R.W., Pringle, M.S., Müller, D., Saunders, A., & Ghose, N.C. (2002).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology of the Rajmahal Basalts, India, and their Relationship to the Kerguelen Plateau. *Journal of Petrology*, 43(7), 1141—1153. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.7.1141>.
- Li, C., van der Hilst, R., Meltzer, A.S., Engdahl, E.R. (2008). Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. *Earth and Planetary Science Letters*, 274, 157—168. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.016>.
- Meert, J.G., Pandit, M.K., Pradhan, V.R., Banks, J., Sirianni, R., Stroud, M., Newstead, B., & Gifford, J. (2010). Show more Precambrian crustal evolution of Peninsular India: A 3.0 billion year odyssey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6), 483—515. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.04.026>
- Morgan, W.J. (1983). Hot-spot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, 94(1-4), 123—139. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90013-6).
- Pandey, O.P. & Agrawal, P.K. (1999). Lithospheric Mantle Deformation beneath the Indian Cratons. *The Journal of Geology*, 107(6), 683—692. <https://doi.org/10.1086/314373>.
- Polet, J. & Anderson, D.L. (1995). Depth extent of cratons as inferred from tomographic studies. *Geology*, 23(3), 205—208. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0205:DEOC AI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0205:DEOC AI>2.3.CO;2)
- Radhakrishna, B.P. (1989). Suspect tectono-stratigraphic terrane elements in the Indian subcontinent. *Journal of the Geological Society of India*, 34(1), 1—24.
- Rao, V.V. & Reddy, P.R. (2002). A Mesoproterozoic supercontinent: evidence from the Indian shield. *Gondwana Research*, 5, 63—74. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70889-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70889-3).
- Sheth, H.C. (2005). From Deccan to Réunion: No trace of a mantle plume. In G.R. Foulger, J.H. Natland, D.C. Presnall, D.L. Anderson (Eds.), *Plates, plumes, and paradigms* (pp. 477—501). Geological Society of America Special Paper 388.

- Zhao, J., Yuan, X., Liu, H., Kumar, P., Pei, S., Kind, R., Zhang, Z., Teng, J., Ding, L., Gao, X., Xu, Q., & Wang, W. (2010). The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. *PNAS*, 107(25), 11229—11233. <https://doi.org/10.1073/pnas.1001921107>.
- Zhang, H., Zhao, D., Zhao, J., & Xu, Q. (2012). Convergence of the Indian and Eurasian plates under eastern Tibet revealed by seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(6), Q06W14. <https://doi.org/10.102/20912GC004031>.

## Особливості швидкісної будови мантії під докембрійськими структурами на прикладі Індійської платформи (за даними сейсмічної томографії)

Л.М. Заєць, І.В. Бугаєнко, Т.О. Цветкова, 2021

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Наведено додаткові дані, які наближають до розуміння рушійних сил при формуванні геологічних структур і особливостей розвитку Індійської платформи. Залучено результати сейсмічної томографії та подано їх аналіз. Отримано тривимірну *P*-швидкісну модель мантії Індійської платформи за методом Тейлорового наближення, розробленим В.С. Гейко. Незаперечні переваги методу полягають у незалежності від початкового наближення (референсної моделі) і найліпшим наближенням нелінійності. Згідно з даними, мантія під Індійською платформою знаходиться під впливом як плюмів, так і флюїдних систем. Вплив плюмів спостерігається у вигляді низькошвидкісних субвертикальних виходів із нижньої мантії до перехідної зони; флюїдів — у вигляді чергування високо- і низькошвидкісних аномалій з нижньої мантії (або з перехідної зони верхньої мантії) до верхньої мантії. Проаналізовано як загальну швидкісну будову мантії платформи, так і швидкісну будову мантії під окремими кратонами (Бандельканд, Сінгбум, Бастар і Дарвар), сукупність яких складає Індійську платформу, і траповими провінціями. За зниженими швидкістями в мантії виділено зону, яка відповідає на поверхні лінеamentу Нармада-Сон, що переходить у Центральну Індійську тектонічну зону. Мантіїні швидкісні структури під Деканською траповою провінцією разом із своєю ділянкою розтікання в перехідній зоні мантії поділяють на глибинах 375 км платформу на дві частини. Виділено і проаналізовано зони мантії з похилими шарами: під кратонами Бандельканд і Сінгбум, трапами Раджмахал і північною межею Деканських трапів. Відповідно до моделі, в мантії добре виділяється область, що межує з Гімалаями. Показано, як при зіткненні Індійської платформи з Євразійською країною товща верхньої мантії розшаровується на пластини, здатні до самостійних рухів, зокрема і субдукції.

**Ключові слова:** сейсмічна томографія, мантія, Індійська платформа, трапи.