

# Скоростное строение мантии и сверхглубинные флюиды Юго-Восточной Азии

© Л. Н. Заец<sup>1</sup>, Као Динг Тру<sup>2</sup>, Т. А. Цветкова<sup>1</sup>, 2012

<sup>1</sup>Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>Институт геофизики ВАНТ, Ханой, Вьетнам

Поступила 29 июня 2012 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

Розглянуто швидкісну будову мантиї під Південно-Східною Азією з метою можливого виділення швидкісних мантийних колонок, установлення зв'язку їх з нафтогазовими басейнами (НГБ). Детально проаналізовано особливості швидкісної будови перехідної зони, зони поділу-1, середньої мантиї, зони поділу-2, нижньої мантиї у зв'язку з вибором мантийних колонок. За швидкісними характеристиками мантиї виявлено змінну активізацію мантиї.

The real work is devoted to consideration of velocity structure of mantle under South-East Asia with the purpose of possible selection of velocity structure of transition zone, communication of them with petroleum-gas pools. The features of velocity structure of transition zone are analysed in detail, transition zone-1, middle mantle, transition zone-2, lower mantle in connection with the selection of mantle columns. By velocity recommendation of mantle the unset activated mantle is certain.

**Введение.** В настоящее время в науках о Земле приняты две модели мантии Земли [Трубицын, 2010]: 1) геофизическая, которая делит мантию Земли на две части (верхнюю и нижнюю) на глубине 670 км; 2) химико-минералогическая модель, предложенная Ю. М. Пушаровским [Пушаровский, 1998], учитывающая результаты сейсмотомографии. Вторая модель не противоречит первой, но дает более детальную характеристику мантии Земли. В ней выделяются следующие слои:

- граница Мохо — 410 км (верхняя мантия);
- 410—650 км (переходная зона верхней мантии);
- 650—850 км (зона раздела 1);
- 850—1700 км (средняя мантия);
- 1700—2200 км (зона раздела 2);
- 2200—2900 км (нижняя мантия).

В сейсмотомографических моделях основной скоростной характеристикой является скоростная инверсность выделяемых слоев [Inoue et al., 1990].

Стабильная мантия определяется следующим: верхней мантии, зоне раздела 1, зоне раздела 2 соответствуют высокие скорости, переходной зоне, средней и нижней мантии — низкие скорости.

Активизированная мантия характеризуется инверсными по отношению к стабильной мантии скоростями: верхней мантии, зоне раздела 1, зоне раздела 2 соответствуют низкие

скорости, переходной зоне, средней и нижней мантии — высокие. Отметим, что средняя и нижняя мантия квазиоднородны и, несмотря на это, могут содержать значительные аномальные области. Существование границы раздела, которая делит мантию на верхнюю и нижнюю, подтверждается по результатам сейсмической томографии, геоэлектрических [Semenov, 1998] и гравитационных [Martinez, Рес, 1989] исследований, методов геодинамики [Баев, Солодовников, 2004].

Сейсмическая томография остается едва ли не единственным направлением в геофизике, которая позволяет получить непосредственные данные о возможных процессах, происходящих в мантии Земли, и на основе этого сформулировать соответствующие гипотезы. Особый интерес в современных исследованиях проявляется к вопросам, связанным со средней и нижней мантией.

Результаты, полученные по сейсмотомографии мантии Земли, послужили одним из толчков к развитию плюм-тектоники. К началу становления плюм-тектоники относятся работы Тузо Вилсона [Wilson, 1963], Дж. Моргана [Morgan, 1971], Л. Зонненшайна [Зонненшайн, Савостин, 1979], Маруямы [Maruyama, 1994]. В работе [Morgan, 1971] высказано предположение, что термальный поток, поднимаясь от границы ядро — мантия, несет горячий материал, ответственный за горячую точку. В настоящее

время плюм-тектоника определяется как тектоника мантийных струй, связанная с тектоникой плит [Добрецов и др., 2009]. В рамках этой гипотезы предполагается, что субдуцирующая холодная плита погружается до границы верхней и нижней мантии, накапливается там, затем через 300—400 млн лет проходит в мантию, достигая ее границы с ядром. Вследствие этого происходит изменение характера процессов во внешнем и внутреннем ядре и их взаимодействия, что приводит к образованию на границе ядро—мантия восходящих плюмов. Последние поднимаются до подошвы литосферы, частично испытывая задержку на границе между нижней и верхней мантией и в тектоносфере могут расщепляться на более мелкие плюмы. В общем виде предполагается, что плюмы — это горячий мантийный поток, движущийся независимо от конвективных течений в мантии. Считается, что плюмы ответственны за траппы, рифты и горячие точки. Визуализация непосредственного проявления плюмов является сложной задачей [Nataf, 2000] в силу несовершенства существующих систем наблюдений. В настоящее время нельзя сказать, что плюм-тектоника признается всеми геофизиками ([www.mantleplums.org](http://www.mantleplums.org)).

Исходя из представлений о плюмах, отделяющихся от жидкого ядра, приходят к представлениям о гипербарических флюидных системах. В них плюмы выступают в роли газовых потоков, обладающих громадной мощностью и энергоемкостью [Летников, 2003]. Считается, что следствием развития такой флюидной системы является формирование протяженных плотностных неоднородностей, фиксирующих прохождение плюма на верхние уровни литосферы. На телесеизмических расстояниях это приводит к выделению субвертикальных аномалий повышенных и пониженных скоростей. Отсюда следует представление об отражении в мантии сверхглубинных флюидных процессов как субвертикальных скоростных колонок, для которых характерно чередование повышенных и пониженных аномалий распределения скорости.

Настоящая статья посвящена рассмотрению скоростного строения мантии под Юго-Восточной Азией с целью возможного выделения скоростных мантийных колонок, связи их с нефтегазовыми бассейнами (НГБ) и, по существу, продолжает работу [Старостенко и др., 2011] по месторождению Белый Тигр, относящемуся к Меконгскому НГБ.

Трехмерная  $P$ -скоростная модель мантии

под Юго-Восточной Азией была получена в контексте 3D  $P$ -скоростной модели мантии под Евразией и ее окружением. Использован метод Тейлорового приближения, предложенный В. С. Гейко [Геуко, 2004]. Метод не зависит от начального приближения, решение может быть представлено как в сферической, так и в декартовой системе координат. Решение задачи сейсмической томографии принято представлять в виде отклонений от заданной референтной модели. По результатам решения задачи для мантии под Евразией и ее окружением была построена обобщенная средняя скорость  $V_{aver}(z)$  [Гейко и др., 1998]:

$$V_{aver}(z) = z \left( \int_0^z \frac{d\zeta}{S(\zeta)} \iint_{s(\zeta)} \frac{d\varphi d\lambda}{V(\varphi, \lambda, \zeta)} \right)^{-1},$$

где  $S(\zeta)$  — сечение области обобщения на глубине  $\zeta$ , а  $\Sigma(\zeta)$  — его площадь в координатах  $\varphi, \lambda$ .

При графическом представлении результатов обобщенная средняя скорость была использована как референтная модель.

Невязки полученных скоростей относительно указанной выше обобщенной средней скорости представляются в виде  $r = V - V_{aver}$ . Понятно, что области, характеризующиеся значениями  $r > 0$ , определяются как высокоскоростные, области, характеризующиеся значениями  $r < 0$ , — как низкоскоростные относительно  $V_{aver}$ . Изолиния  $r = 0$  выполняет функцию раздела между областями с повышенными и пониженными скоростями.

Для построения модели были использованы данные о первых вступлениях  $P$ -волн, приведенные в бюллетенях ISC с 1964 по 2006 г. Модель представлена в декартовых координатах в виде горизонтальных, широтных и долготных сечений до глубины 2700 км. Горизонтальные сечения с шагом 25 км, широтные и долготные с шагом через  $1^\circ$ . В качестве тектонической основы использованы тектонические схемы, представленные на рис. 1 и 2 [Cao Dinh True, 2010].

**Особенности скоростного строения мантии под Юго-Восточной Азией в связи с проявлениями сверхглубинных флюидов.** В работе [Старостенко и др., 2011] отмечалось, что основные тектонические процессы Юго-Восточной Азии, являющейся зоной сочленения Евразийской, Тихоокеанской и Индо-Австралийской плит, определяются как субдукционные [Хаин, 2001]. В целом, территория характеризуется блоковым строением и линеamentной системой [Хаин, 2001]. Отмечает-

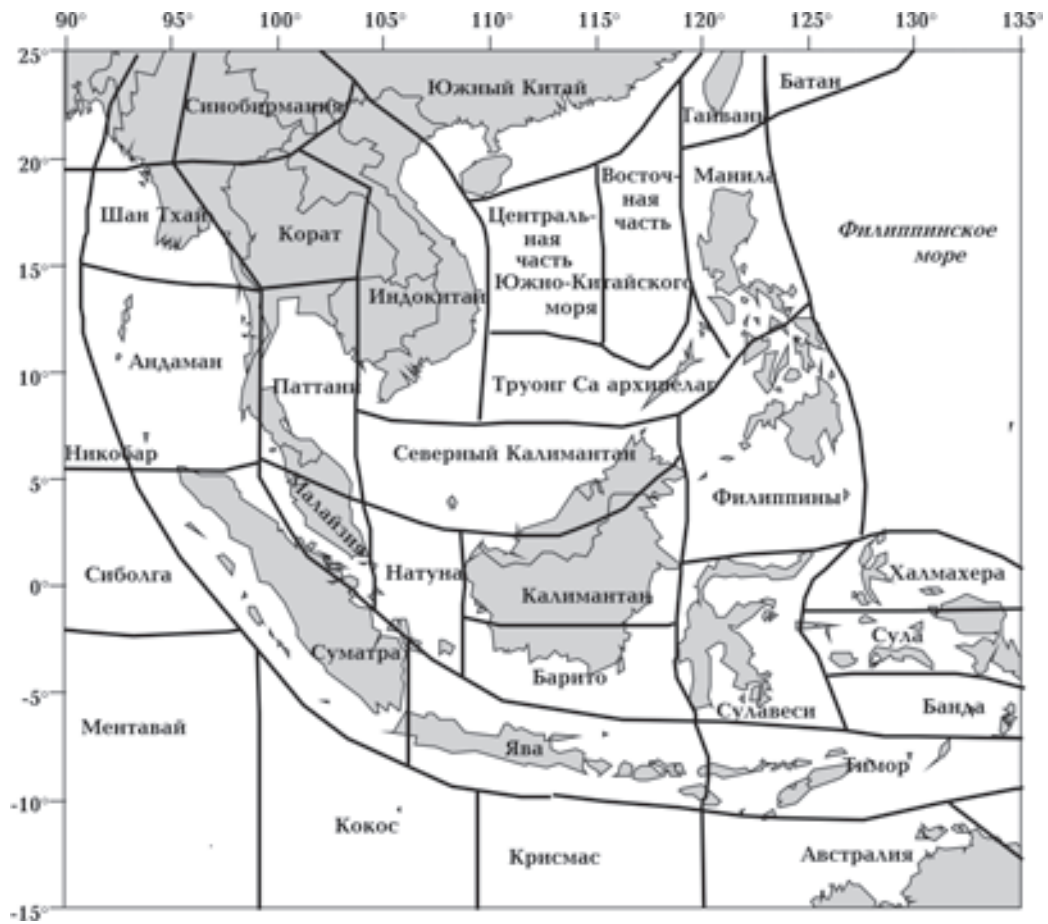


Рис. 1. Тектоническая схема Юго-Восточной Азии, по [Cao Dinh Trieu, 2010].

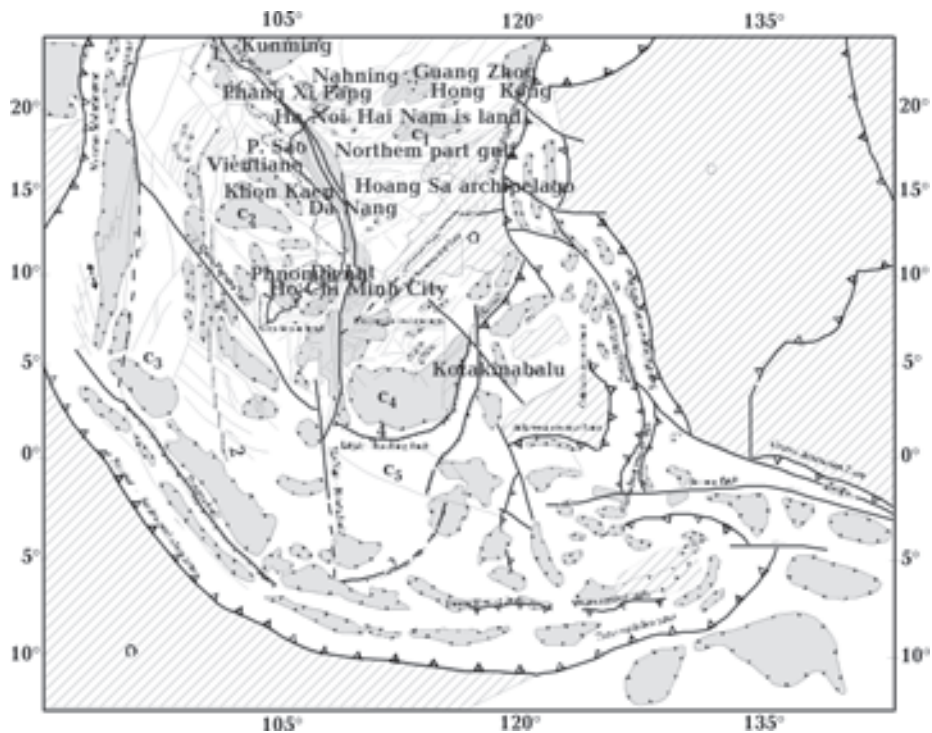


Рис. 2. Кайнозойская активизация Юго-Восточной Азии, по [Cao Dinh Trieu, 2010].

ся выраженная кайнозойская активизация, с которой связано раскрытие Южно-Китайского моря, выделяются соответствующие рифтовые зоны и зона палеоспрединга (см. рис. 2). Раскрытие стало, по-видимому, отражением взаимодействия процессов Индо-Евразийской, Евразийско-Австралийской и Австралийско-Филиппинской коллизий. Как можно видеть на рис. 2, интересующее нас месторождение Белый Тигр [8—10° с.ш., 106—110° в.д.] относится к Меконгскому НГБ, приурочено к области распространения палеоспрединговой зоны в сторону кайнозойского бассейна и пересекается разломом, соответствующим линеamentу — правому сдвигу Хайнань-Сунда.

Как говорилось выше, будем считать проявлением сверхглубинного флюидного процесса наличие субвертикальных скоростных колонок, определяемых чередованием высокоскоростных и низкоскоростных аномалий. В работе [Старостенко и др., 2011] говорилось о возможных мантийных проявлениях сверхглубинных флюидных процессов для мантии под территорией Южно-Китайского моря и его окружением. Общие представления о скоростном строении верхней мантии и переходной зоны приведены в работе [Заец и др., 2009]. В данной статье более детально анализируются особенности скоростного строения переходной зоны, зоны раздела 1, средней мантии, зоны раздела 2, нижней мантии в связи с выделением мантийных колонок. В этом контексте нас будет интересовать проявления, согласно В. Трубицыну, геофизической зоны раздела мантии либо более детально, согласно модели Ю. Пуцаровского, зоны раздела 1 и нижележащих скоростных слоев мантии.

Считается, что как геофизическая граница раздела мантии, так и граница на 400 (410) км между собственно верхней мантией и переходной зоной верхней мантии (слой Голицына) соотносятся с основными фазовыми переходами в мантии. Как правило, на этих границах наблюдается заметный скачок в изменении скорости распространения сейсмических волн, свидетельствующий о соответствующем изменении фазового состояния вещества и о смене с глубиной одних минеральных видов другими. При анализе скоростных мантийных колонок [Старостенко и др., 2011] обращалось внимание на резкое изменение их скоростного строения при переходе через зону раздела. Смена скоростных характеристик при переходе через зону раздела привела к выделению трех типов мантийных колонок. Рассмотрим

более детально скоростные характеристики переходной зоны верхней мантии (скоростной слой Голицына—Гейко) и зоны раздела 1 мантии под Юго-Восточной Азией.

**Переходная зона верхней мантии** под изучаемым регионом характеризуется высокими скоростями. Кровля переходной зоны верхней мантии (подошва верхней мантии) выделяется на разных глубинах (рис. 3). Так, в мантии, соответствующей Индо-Австралийской плите, она расположена на глубине 450 км, начиная с 7° ю.ш.×106° в.д. Поднятие кровли слоя наблюдается от мантии под блоками Суматра, Ява, Тимор, где глубина ее залегания соответствует 250—300 км (рис. 4, WE 05°). По глубине залегания кровли можно четко выделить границу 1, отделяющую скоростные структуры мантии Индо-Австралийской плиты от мантийных скоростных структур Юго-Восточной Азии (см. рис. 3). Блоки, расположенные на запад от границы 1, будем считать мегаблоком А (блоки Кокос, Ментавай, Сиболга, Никобар). До этой границы глубина кровли высокоскоростного слоя переходной зоны верхней мантии постоянна в пределах 400—450 км. Мощность высокоскоростного слоя переходной зоны верхней мантии в данном мегаблоке изменяется от 100—125 км (под блоком Ментавай) и увеличивается к северу до 350 км под блоком Никобар (рис. 4, WE 07°).

Характерной особенностью для переходной зоны верхней мантии под Юго-Восточной Азией является неоднозначность при определении подошвы последней. Поэтому нами выделяется граница 2, которая отделяет область мантии (мегаблок С), где неоднозначно определяется подошва переходной зоны верхней мантии или вообще отсутствует (блоки Сулавеси, Филиппины, Центральная и Восточная части Южно-Китайского моря, Северная часть Индокитая, восточная часть блока Корат, Синобирмания).

Мегаблок В расположен между границей 1 и границей 2. Здесь кровля приподнята по большей части территории до глубины 300 км, при этом на фоне общей приподнятости выделяется поднятие кровли до 200 км под блоком Суматра и небольшое опускание до 350 км под блоком Натуна (рис. 4, WE 01°) (2° ю.ш.), а также в районе 123—124° в.д.×0—5° с.ш. до глубины 400 км. Под блоком Паттани наблюдается поднятие кровли переходного слоя до 250 км, под границей между блоками Андаман и Паттани выделяется высокоскоростные аномалии с вязкой 0,05 км/с. Наиболее погружена кровля высокоскоростного слоя переходной зоны



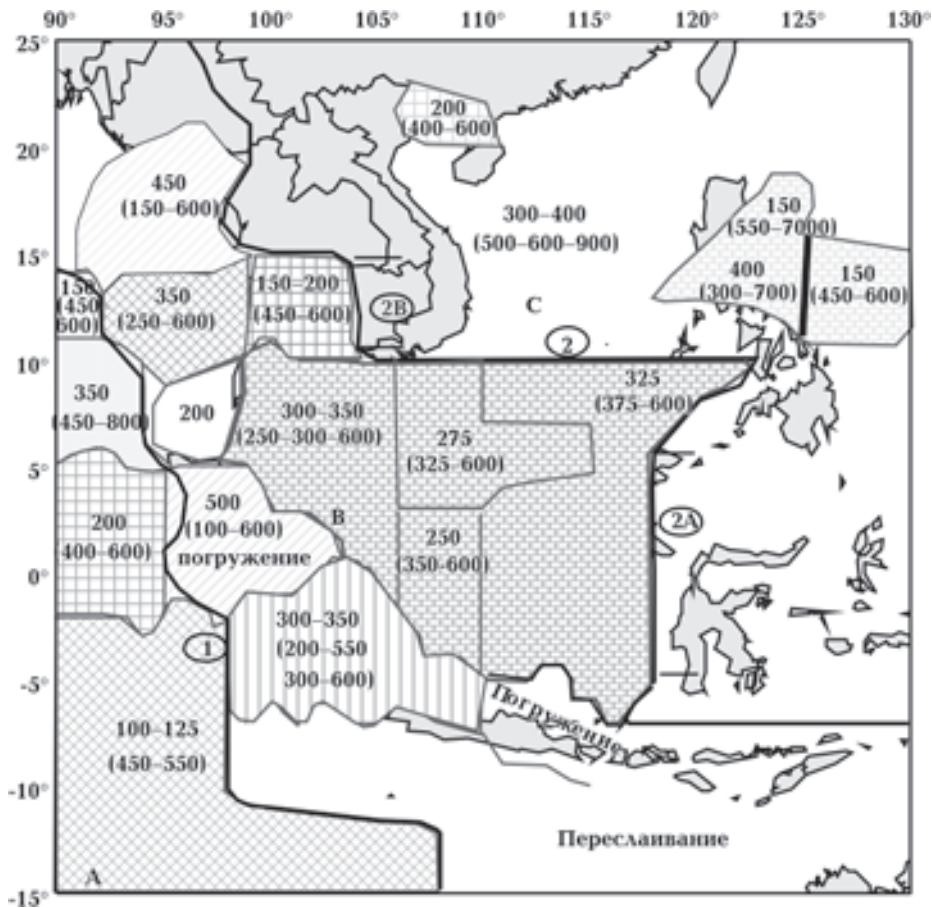


Рис. 3. Схема мощности переходной зоны верхней мантии и выделенные по кровле переходного слоя верхней мантии граница 1 и по подошве переходного слоя верхней мантии граница 2 (цифры в кружках). А — мегаблок, отделяемый границей 1 и соответствующий Индо-Австралийской плите; В — мегаблок между границей 1 и границей 2; С — мегаблок, отделенный границей 2. (200 (400–600)) — первая цифра — мощность, в скобках — глубина залегания кровли переходной зоны — глубина залегания подошвы переходного слоя верхней мантии.

верхней мантии под блоками Индокитай (до 500 км) и Труонг Са (до 575 км) (рис. 4, WE 11°).

К югу от 10° с.ш. кровля переходной зоны верхней мантии более дифференцирована по глубине. Окраинные блоки на западе (рис. 4, WE 16°) характеризуются выпуклостями кровли высокоскоростного слоя — под блоком Андаман до 250 км, далее к северу под блоком Шан Тхай (до 150–200 км). На восточной окраине наблюдается поднятие кровли переходного слоя верхней мантии до глубины 150–200 км под восточной частью блока Труонг Са и блоком Филиппины.

Рассмотрим поведение высокоскоростного слоя вдоль границы 2. Напомним, что западнее ее прослеживается классический высокоскоростной слой переходной зоны верхней мантии, т. е. имеющий как кровлю, так и подошву (уже рассмотренный мегаблок В). Иначе обстоит дело в восточном направлении от этой границы. Здесь высокоскоростной слой

погружается в среднюю мантию. Саму границу можно разделить на части. Рассмотрим часть границы 2А (см. рис. 3). Как было отмечено, со стороны блоков Сулавеси, Филиппины подошва высокоскоростного слоя переходной зоны мантии отсутствует. Граница проходит по 118° в.д., и здесь же наблюдается погружение высокоскоростного слоя в западном направлении: сначала пологое и распространяющееся до 109° в.д., далее под низкоскоростной слой зоны раздела 1 (рис. 4, WE 01°). Глубина его погружения под блоком Барито до 1200 км (при этом кровля приподнята до 300 км), под границей мантии под блоками Барито — Сулавеси погружение доходит до 1300 км и распространяется до блока Ментавай. Максимальное погружение (до 1500–1600 км), как и максимальный угол падения части высокоскоростного слоя, наблюдается по 3–4° с.ш. и погружающийся слой доходит до блоков Натуна и Малайзия (рис. 4, WE 04°). Наклонный слой уменьшается

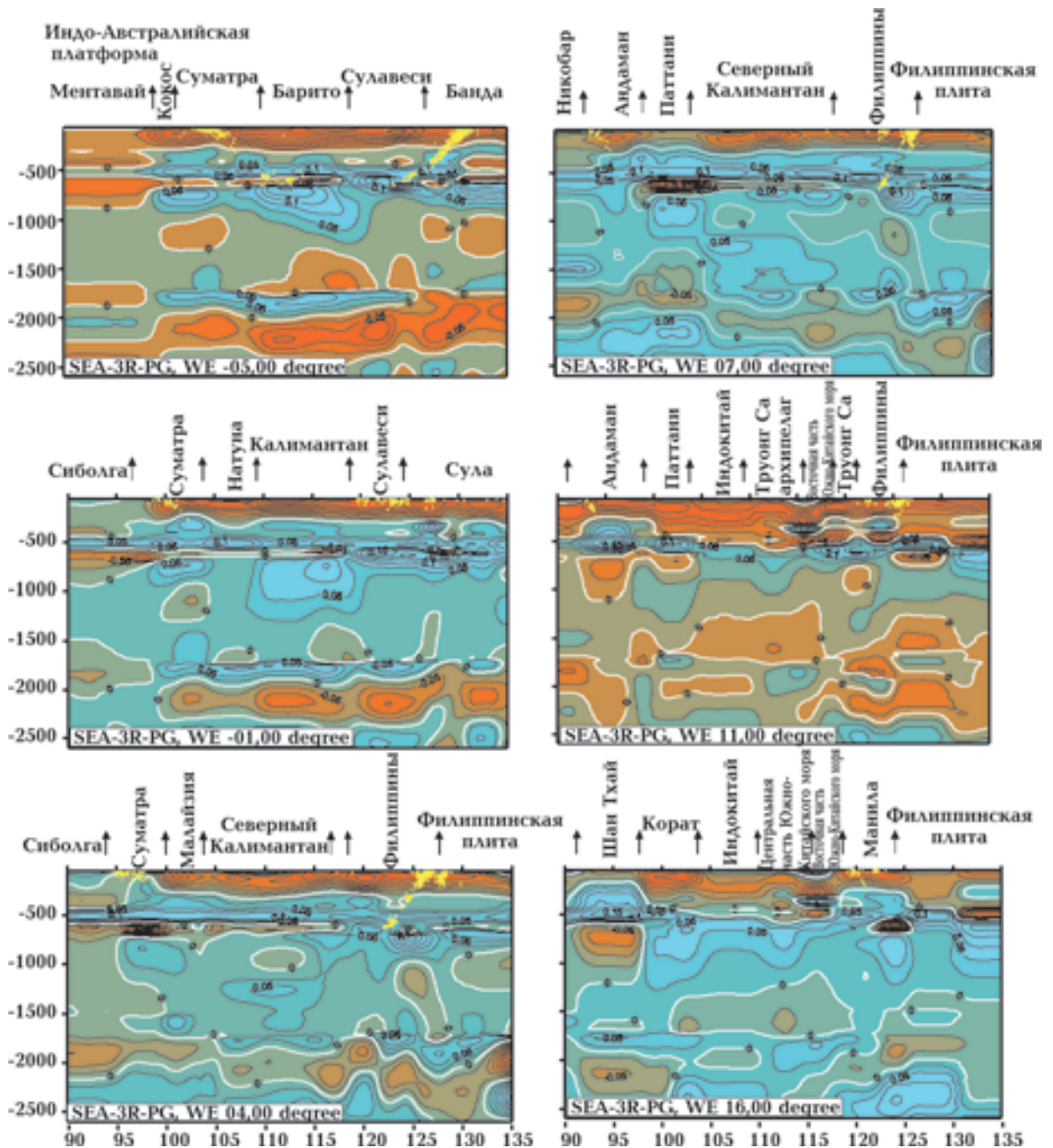


Рис. 4. Широтные сечения 3D Р-скоростной модели мантии под Юго-Восточной Азией.

и вовсе исчезает на границе блоков Северный Калимантан — Филиппины ( $6^\circ$  с.ш.) (рис. 4, WE  $06^\circ$ ). В западном направлении остается слэб, расположенный на глубине 650—800 км с невязкой 0,05 км/с под блоком Северный Калимантан (рис. 4, WE  $07^\circ$ ). После  $10^\circ$  с.ш. подошва высокоскоростного слоя переходной зоны мантии определяется неоднозначно восточнее  $105^\circ$  в.д. (т. е. выделяется тонким слоем либо вообще отсутствует). Рассмотрим часть границы 2В (см. рис. 3). По этой границе по  $10$ — $11^\circ$  с.ш.

вдоль  $105^\circ$  в.д. наблюдается погружающийся в западном направлении высокоскоростной слой. Максимальная глубина погружения 1300 км (рис. 4, WE  $11^\circ$ ). Он проходит под низкоскоростной слой зоны раздела 1 в мантии под блоком Паттани и доходит до мантии под блоком Андаман ( $98^\circ$  в.д.). На север и юг от этой области выделяются слэбы (высокоскоростные аномалии, невязка 0,025 км/с): от средней мантии под блоком Синобирмания на севере и под блоком Ментавай на юге до блока Паттани

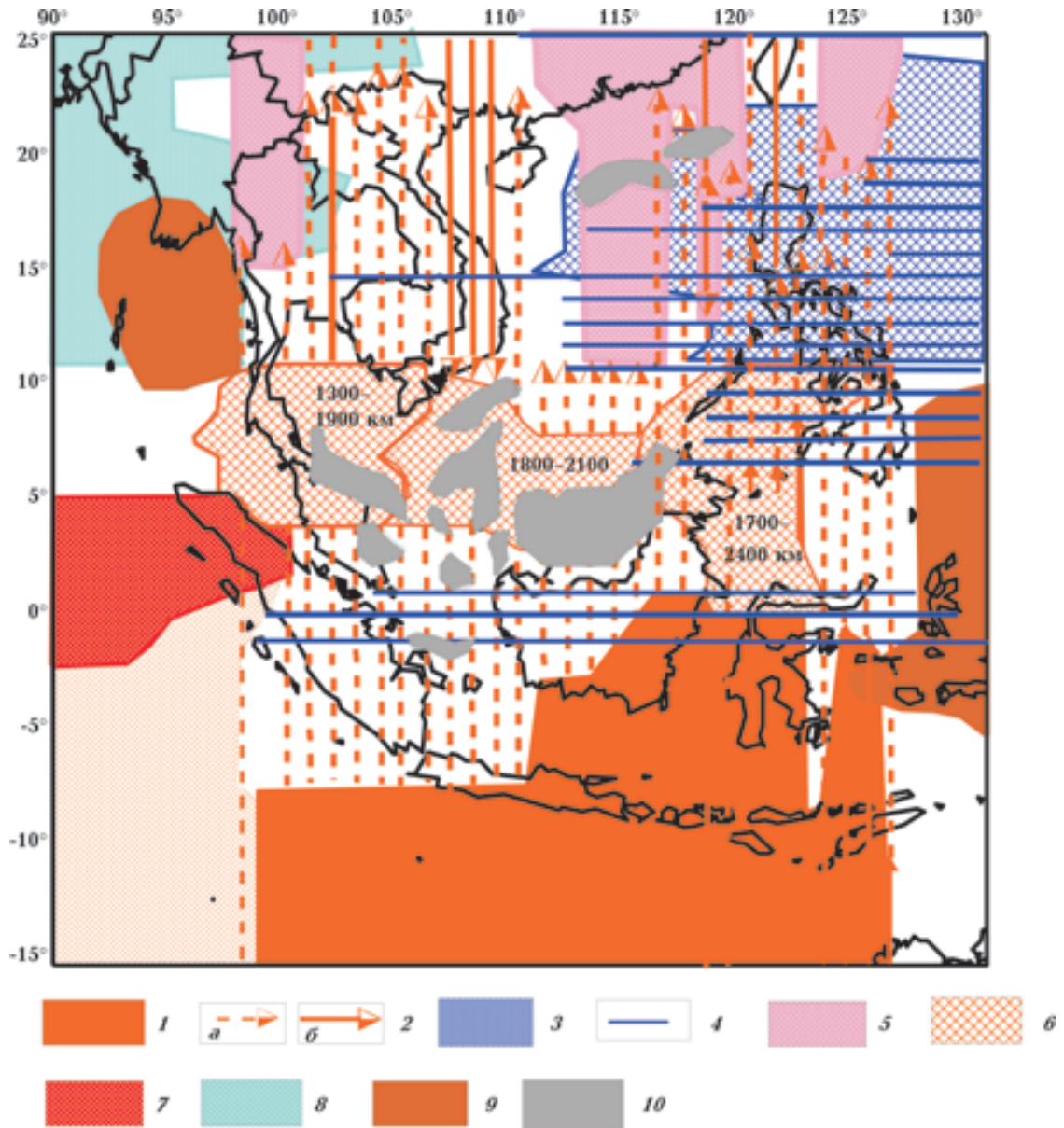


Рис. 7. Схема распространения скоростных слоев зоны раздела 2: 1 — область распространения низкоскоростного слоя зоны раздела 2, соответствующая структурам, идущим с юга; 2 — ветви низкоскоростного слоя зоны раздела 2, их направление и окончание; 3 — область распространения низкоскоростного слоя зоны раздела 2 со стороны Тихоокеанской плиты; 4 — вторая ветвь низкоскоростного слоя зоны раздела 2 со стороны Южного Китая; 5 — область распространения низкоскоростного слоя зоны раздела 2 (цифры — глубина залегания кровли и подошвы слоя); 6 — приподнятые блоки низкоскоростного слоя зоны раздела 2; 7 — область, где зона раздела 2 не выделяется, низкие скорости наблюдаются на глубине 600—2200 км; 8 — область распространения низкоскоростного слоя зоны раздела 2 со стороны скоростных структур, влияющих на регион с северо-запада; 9 — выходы низких скоростей из нижней мантии в зону раздела 2; 10 — месторождения нефти и газа.

Таким образом, по глубине залегания кровли высокоскоростного слоя переходной зоны верхней мантии выделяется мегаблок В, охватывающий блоки Шан Тхай, Андаман, Синобирмания, Корат, Паттани, Индокитай, Северный Калимантан, Калимантан, Барито, архипелаг Труонг Са. Мегаблок В приподнят

относительно скоростных структур, соответствующих Индо-Австралийской плиты (мегаблок А). Выделен мегаблок С (см. рис. 3), где отсутствует (или очень тонкая) подошва высокоскоростного слоя переходной зоны мантии. Между этими мегаблоками выделена граница 2, которая сопровождается наклонными