

Скоростное строение мантии и сверхглубинные флюиды Юго-Восточной Азии

© Л. Н. Заец¹, Као Динг Тру², Т. А. Цветкова¹, 2012

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Институт геофизики ВАНТ, Ханой, Вьетнам

Поступила 29 июня 2012 г.

Представлено членом режколлегии 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 mantle columns, 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, зона 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).

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 телесеismicких 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]:

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

где $S(\zeta)$ — сечение области обобщения на глубине ζ , а $\sum(\zeta)$ — его площадь в координатах φ, λ .

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° . 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-

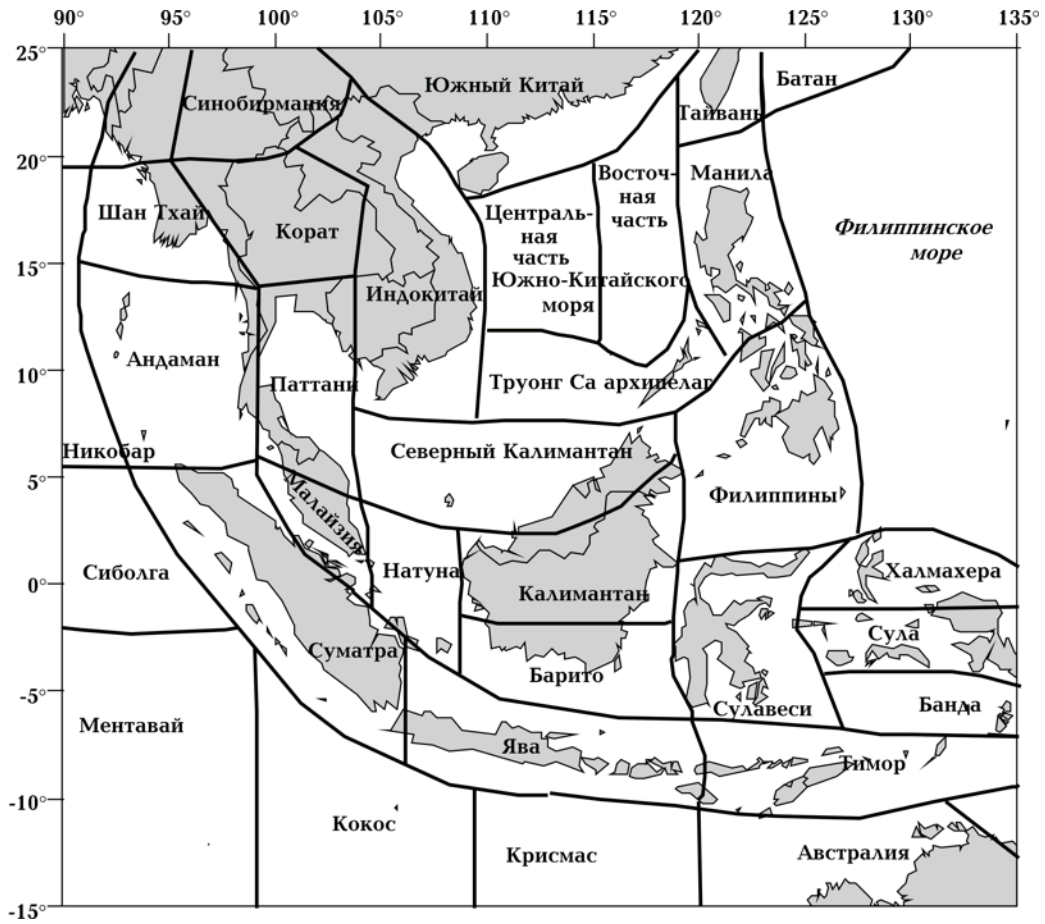


Рис. 1. Тектоническая схема Юго-Восточной Азии, по [Cao Dinh Trieu, 2010].

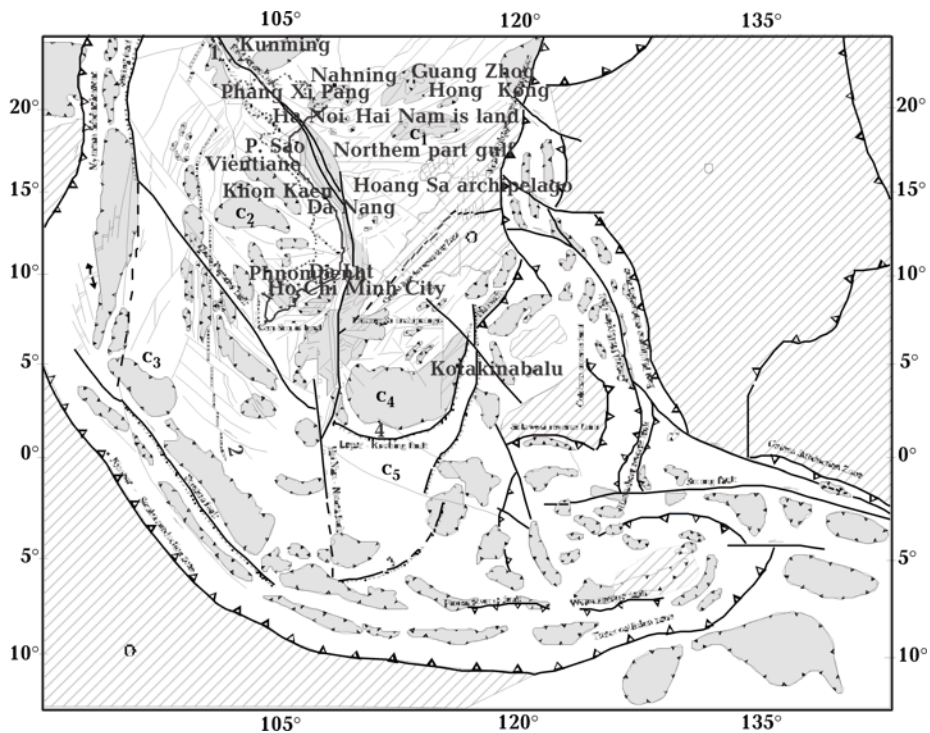


Рис. 2. Кайнозойская активизация Юго-Восточной Азии, по [Cao Dinh Trieu, 2010].

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

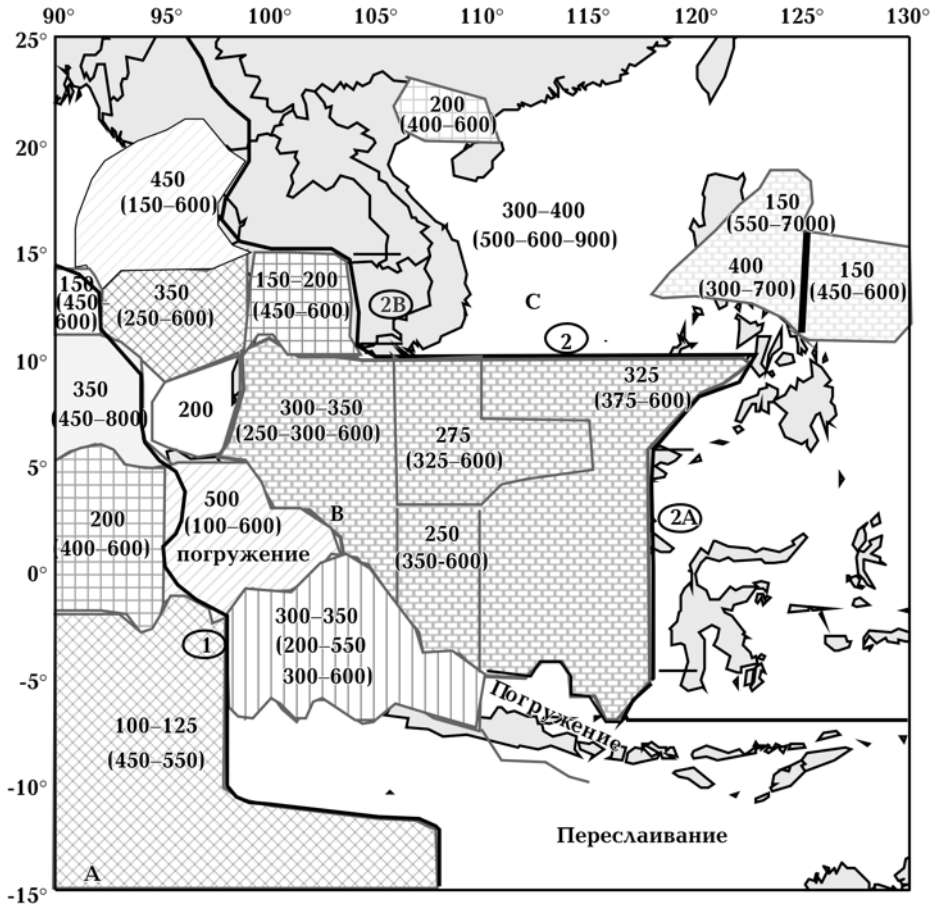


Рис. 3. Схема мощности переходной зоны верхней мантии и выделенные по кровле переходного слоя верхней мантии граница 1 и по подошве переходного слоя верхней мантии граница 2 (цифры в кружках). А — мегаблок, отделяемый границей 1 и соответствующий Индо-Австралийской плите; В — мегаблок между границей 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

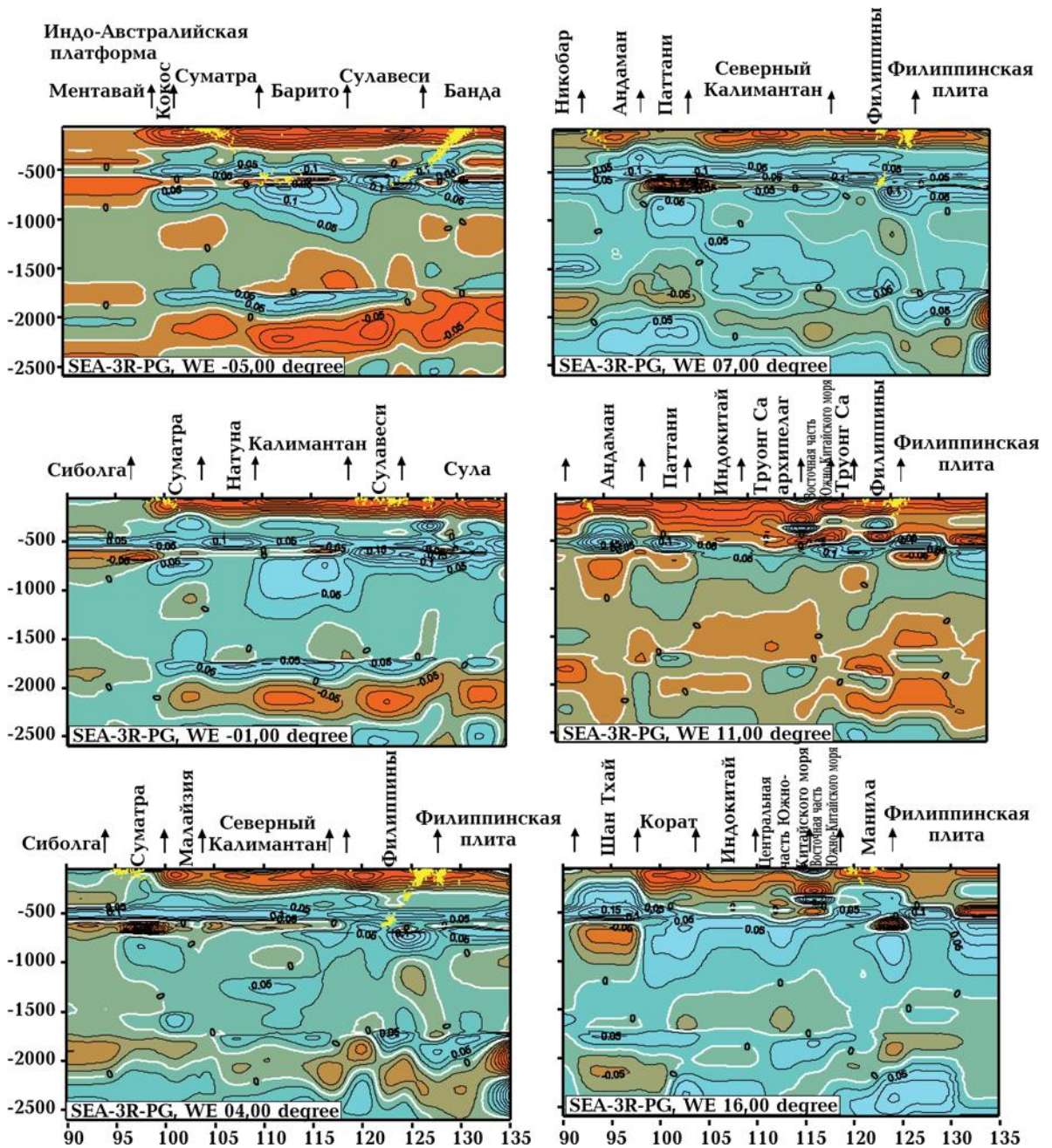


Рис. 4. Широтные сечения 3D Р-скоростной модели мантии под Юго-Восточной Азией.

и вовсе исчезает на границе блоков Северный Калимантан — Филиппины (6° с.ш.) (рис. 4, WE 06°). 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°). После 10° с.ш. подошва высокоскоростного слоя переходной зоны мантии определяется неоднозначно восточнее 105° в.д. (т. е. выделяется тонким слоем либо вообще отсутствует). Рассмотрим часть границы 2В (см. рис. 3). По этой границе по 10 — 11° с.ш.

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

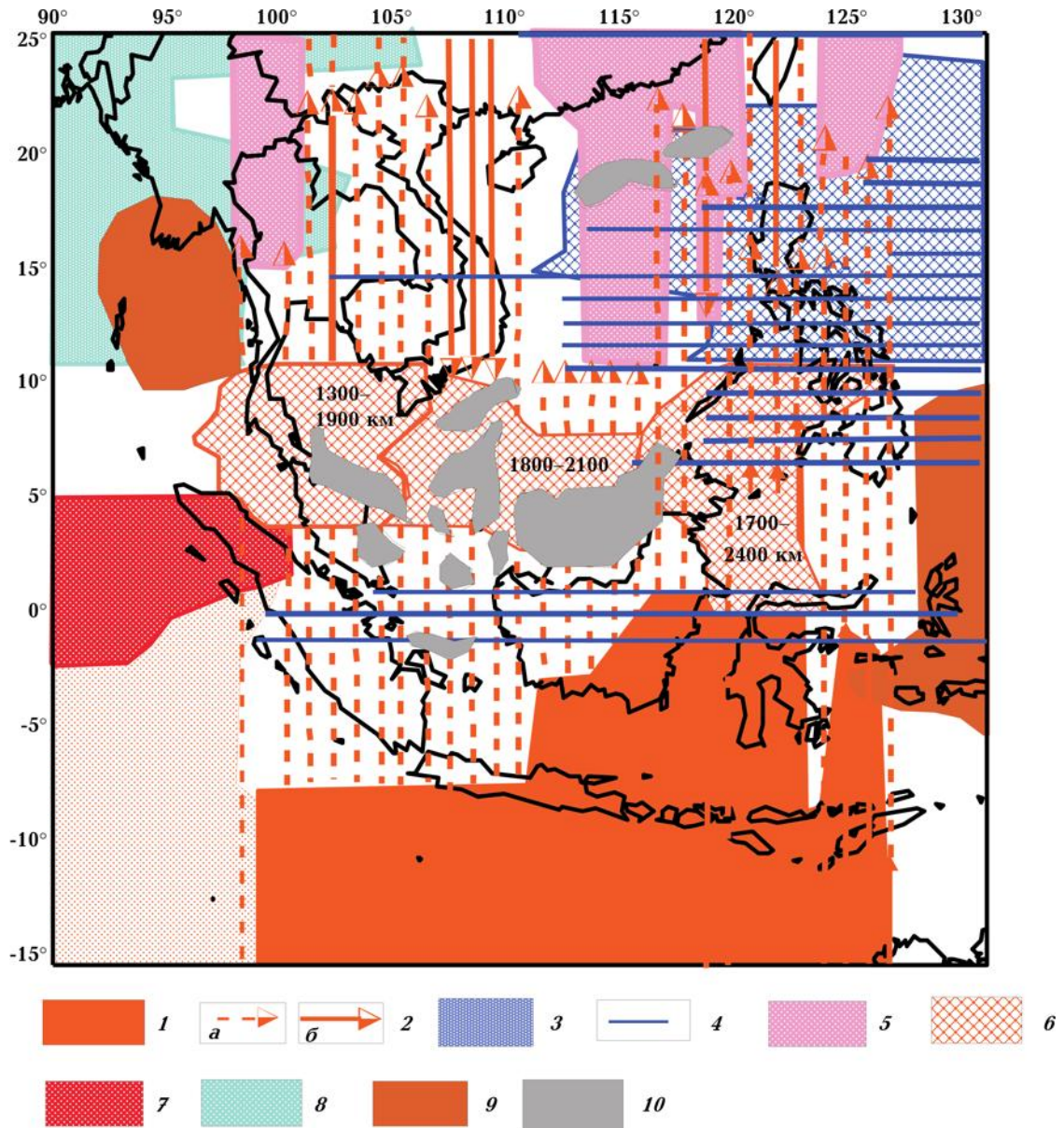


Рис. 7. Схема распространения скоростных слоев зоны раздела 2: 1 — область распространения низкоскоростного слоя зоны раздела 2, соответствующая структурам, идущим с юга; 2 — ветви низкоскоростного слоя зоны раздела 2, их направление и окончание; 3 — область распространения низкоскоростного слоя зоны 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 со стороны Тихоокеанской плиты; 6 — приподнятые блоки низкоскоростного слоя зоны раздела 2 (цифры — глубина залегания кровли и подошвы слоя); 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

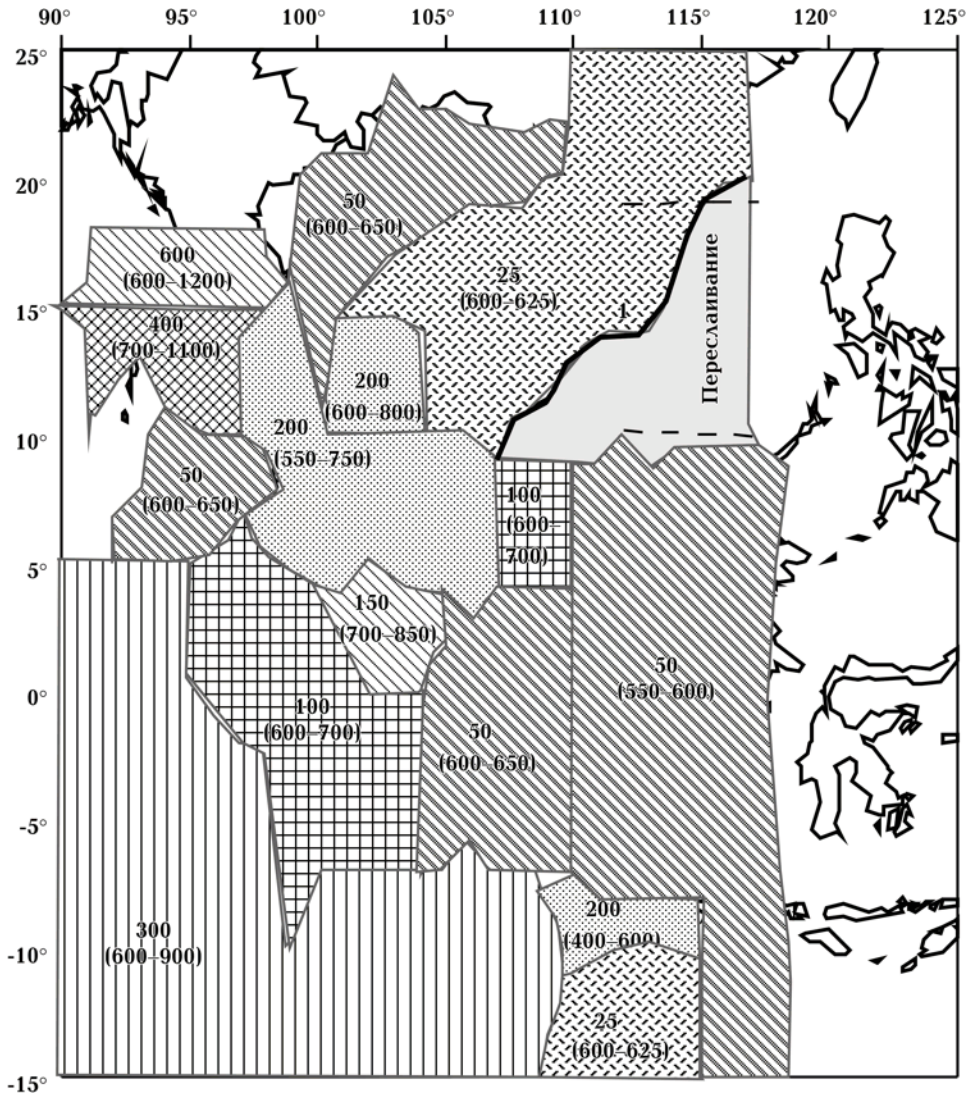


Рис. 5. Схема распределения мощности зоны раздела 1 в мантии под Юго-Восточной Азией. 50 (600—650) — первая цифра — мощность низкоскоростного слоя зоны раздела 1, в скобках — глубина залегания кровли — глубина залегания подошвы слоя зоны раздела 1.

слоями и слэбами, направленными в сторону блока В. Мантия под месторождением Белый Тигр характеризуется приподнятой кровлей переходной зоны и относится к пограничью между мегаблоками В и С.

Зона раздела 1. Под Юго-Восточной Азией низкоскоростная зона раздела 1 выделяется на глубине 600—900 км (местами подошва слоя опускается на глубину 1000 км). Согласно нашей модели мантии, зона раздела 1 не везде выделяется сплошным слоем, приобретая местами расплывчатые очертания или отсутствуя вообще, и характеризуется большой контрастностью по мощности (от 50 до 300 км). Анализируя скоростную картину на этих глубинах можно отметить, что определенная корреляция

между поверхностной тектоникой и скоростной структурой мантии возможна не только до 350 км [Руженцев и др., 1999], но и глубже. Выделенная на рис. 5 область переслаивания с границей 1 соответствует области палеоспрединга, представленной на рис. 2 [Хаин, 2001]. Так, при анализе скоростного строения зоны раздела 1 были сопоставлены особенности скоростного строения зоны раздела 1 и карты напряженно-состояния верхней части литосферы Земли. Существуют ли какие-либо соответствия между зонами сжатия и растяжения в верхней литосфере региона и в характере распределении скоростей в зоне раздела 1 [Шерман, Лукина, 2003]. Верхняя упругая часть литосферы Земли характеризуется сложным напряженным

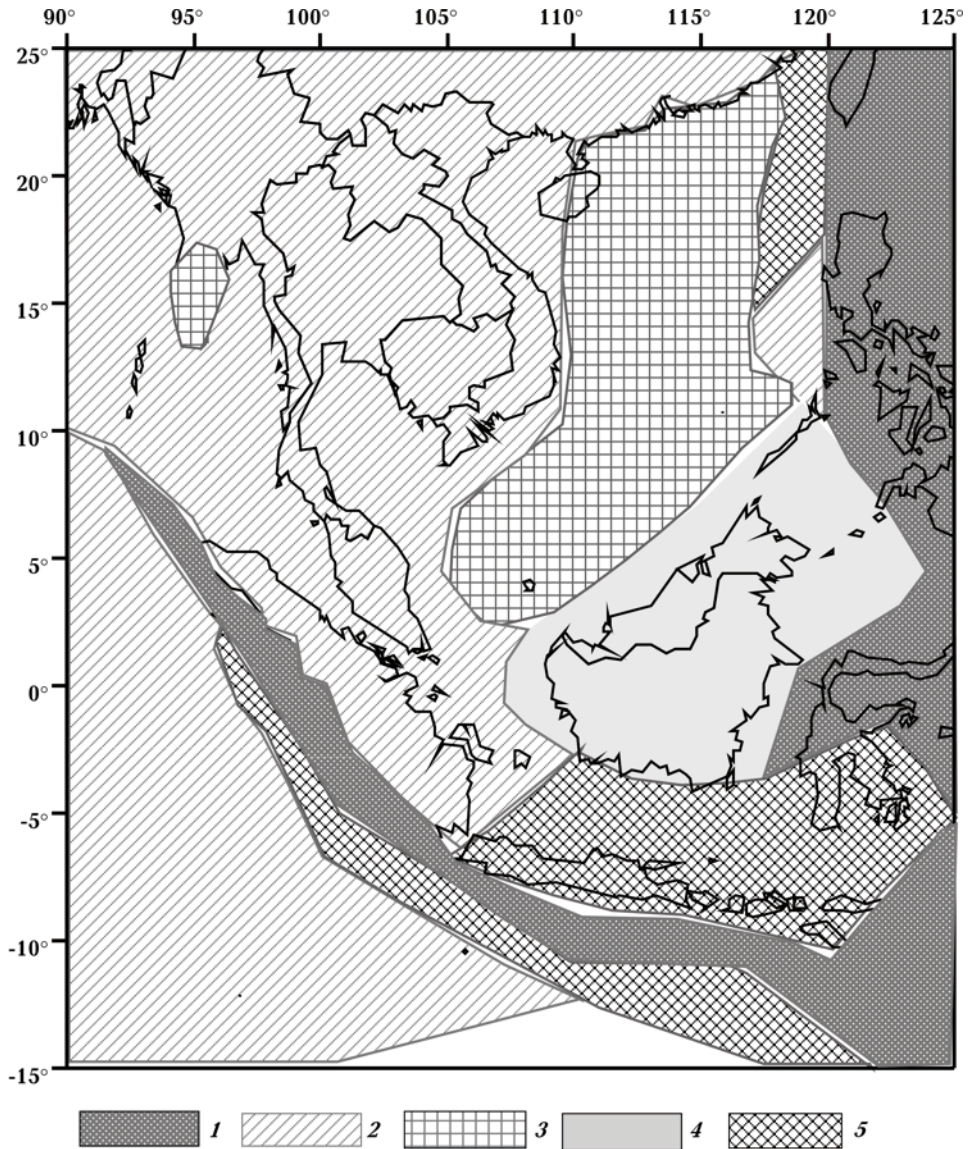


Рис. 6. Карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли по С. И. Шерман, О. В. Луниной: 1 — зона сжатия, 2 — зона сдвига, 3 — зона растяжения, 4 — тектонически-нейтральное напряженное состояние, 5 — зона сжатия со сдвигом.

состоянием, общие закономерности которого показаны на рис. 6. Обратим внимание на схему распространения низкоскоростного слоя зоны раздела 1. Области растяжения, которую выделяют в районе Южно-Китайского моря, соответствует в зоне раздела 1 очень тонкий низкоскоростной слой мощностью менее 75 км (блоки Центральной и Восточной части Южно-Китайского моря). Согласно карте напряжений в районе блока Шан Тхай выделяется зона растяжения, в мантии ей соответствует области выхода из нижней мантии низких скоростей (рис. 7, см. выше на стр. 114).

Согласно Ю. М. Пуцаровскому [Пуцаровский, 1999], допускается существование на всех уровнях мантии зон сжатия и растяжения, отражающих различное по скоростным характеристикам мантийное вещество. В соответствии с нашей моделью можно предположить, что существует корреляция между процессами, происходящими в низах мантии (по нашим данным — это распространение пониженных скоростей в нижней мантии, поведение зоны раздела 1), явлениями, наблюдаемыми на поверхности (в нашем случае речь идет о напряженном состоянии литосферы).

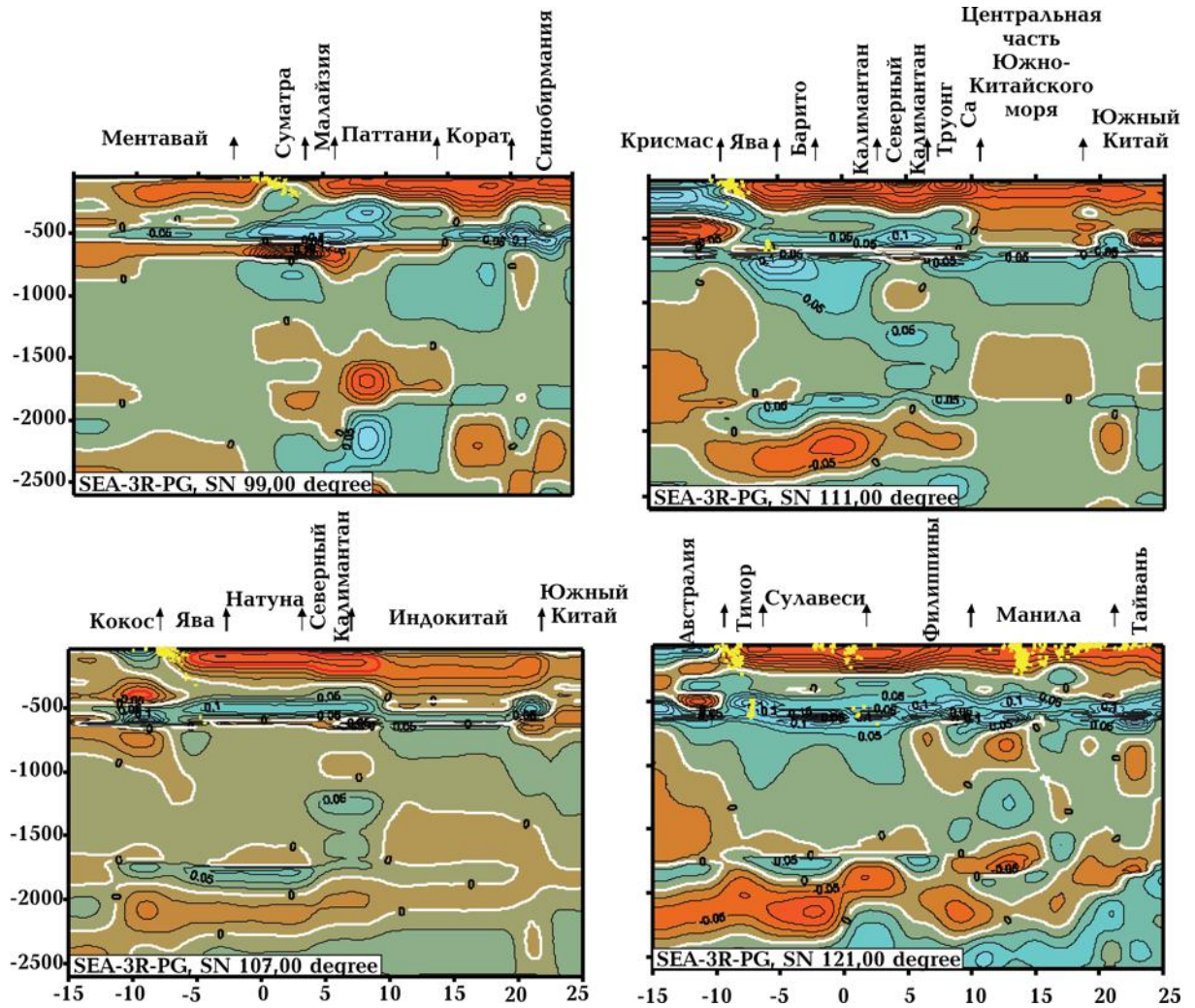


Рис. 8. Долготные сечения 3D P-скоростной модели мантии под Юго-Восточной Азией.

Под южной частью блока Андаман низкоскоростной слой зоны раздела 1 имеет минимальную мощность (50 км). Низкоскоростные аномалии с максимальным значением невязок наблюдаются под блоками Суматра ($-0,3$ км/с), Паттани ($-0,2$ км/с), Корот ($-0,2$ км/с), Манила ($-0,125$ км/с).

Особенностью зоны раздела 1 является прерывание наиболее утоненных областей низкоскоростного слоя «холодными» высокоскоростными неоднородностями, распространяющимися из верхней мантии и переходной зоны, их дальнейшее простирается в среднюю мантию. Речь идет о наклонных слоях. В западной части Юго-Восточной Азии со стороны блока Синобирмания выделяется наклонный высокоскоростной слой, распространяющийся под углом 45° из переходной зоны верхней мантии в южном направлении в среднюю мантию, где этот слой под блоками Паттани, Малайзия

принимает субгоризонтальное положение. Результатом погружения высокоскоростного слоя является разрыв зоны раздела 1 между блоками Корот и Синобирмания (рис. 8, SN 99°). Далее в восточном направлении (сечение SN 101°) снова выделяется тонкий низкоскоростной слой зоны раздела 1 (с невязкой $-0,125$ км/с), внедряющийся в наклонный высокоскоростной слой, идущий со стороны блока Синобирмания. Две контрастные низкоскоростные аномалии с невязками $-0,2$ и $-0,25$ км/с выделяются на глубине $550-700$ км под южной частью блока Паттани. Чередование низкоскоростных и высокоскоростных аномалий, но с меньшими значениями невязок (максимальная невязка для низкоскоростной аномалии составляет $-0,05$ км/с на глубине $1650-1750$ км, для высокоскоростной — $0,075$ км/с на глубине $750-1150$ и $1900-2300$ км), фиксируется до глубины нижней мантии.

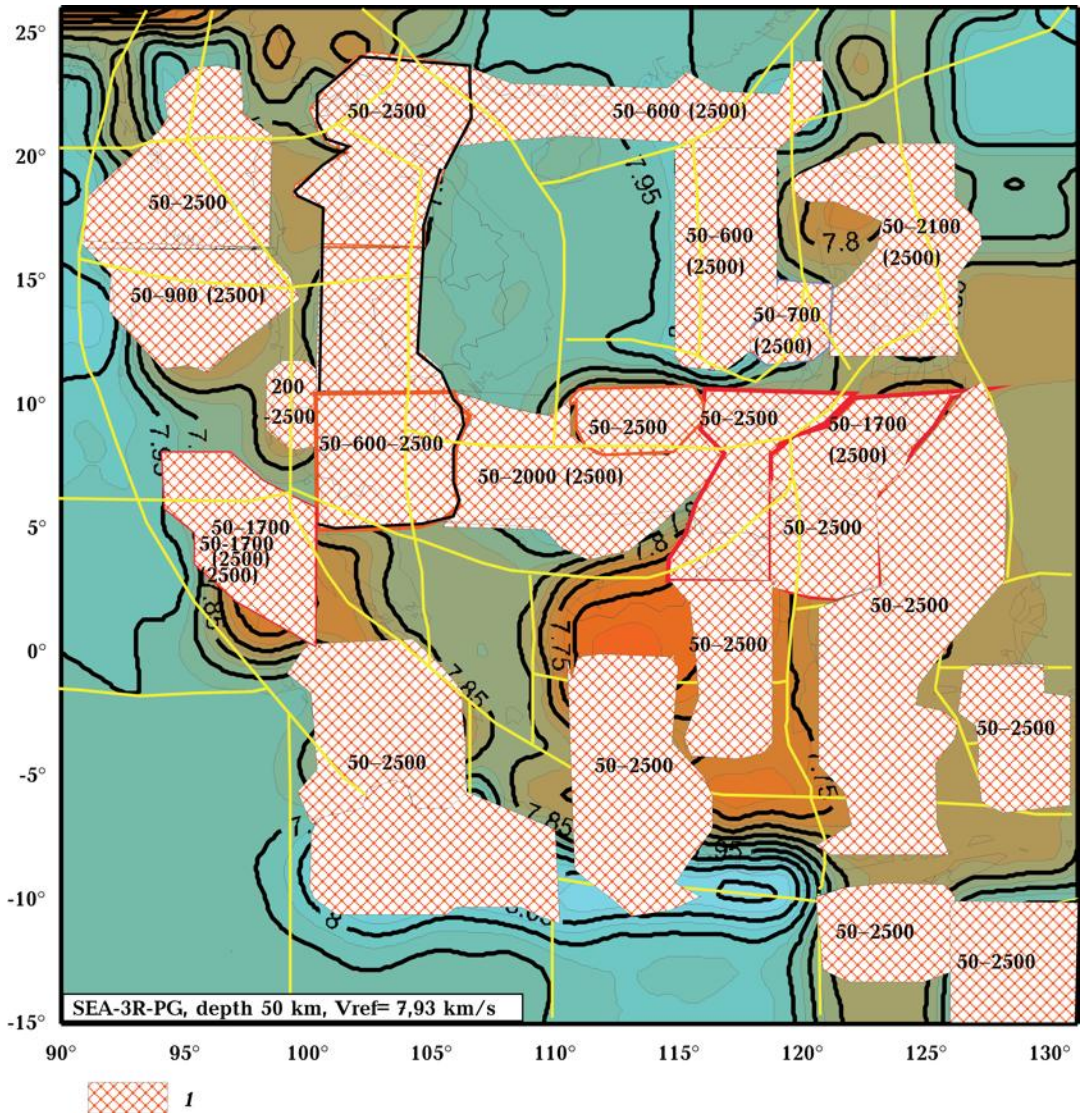


Рис. 9. Мантийные скоростные колонки (1), выделяемые по данным сейсмической томографии в мантии под Юго-Восточной Азией (50 км — минимальная глубина, 2500 км — максимальная глубина).

Под блоком Ява, вследствие погружения Индо-Австралийской плиты под структуры Юго-Восточной Азии, нарушается непрерывное горизонтальное простирание низкоскоростного слоя зоны раздела 1. Нарушение связано с погружением под крутым углом окончания низкоскоростного слоя зоны раздела 1, который относится к структурам Индо-Австралийской плиты (блок Кокос), с глубины 600 км на глубину 1250 км. При этом низкоскоростной слой зоны раздела 1 (со стороны структур Юго-Восточной Азии) испытывает разрыв (рис. 8, SN 107°). Именно здесь фиксируются очаги землетрясений до зоны раздела 1 включительно. Реакция скоростной среды на погружение, начиная со 110° в.д., изменяет-

ся. В месте разрыва низкоскоростного слоя формируется высокоскоростной наклонный слой, погружающийся в среднюю мантию (его характеристика будет дана при описании средней мантии). В месте разрыва низкоскоростного слоя выделяется высокоскоростная аномалия с невязкой 0,1 км/с (SN 110°). Разрыв низкоскоростного слоя под блоками Крисмас и Ява наблюдается до 111° в.д. (рис. 8, SN 111°). Далее зона раздела 1 в этой части региона представлена сплошным низкоскоростным слоем до границы его существования (119° в.д.). После этого низкоскоростной слой зоны раздела 1 отсутствует (рис. 8, SN 121).

Неоднородность строения зоны раздела 1 — это следствие воздействия на регион

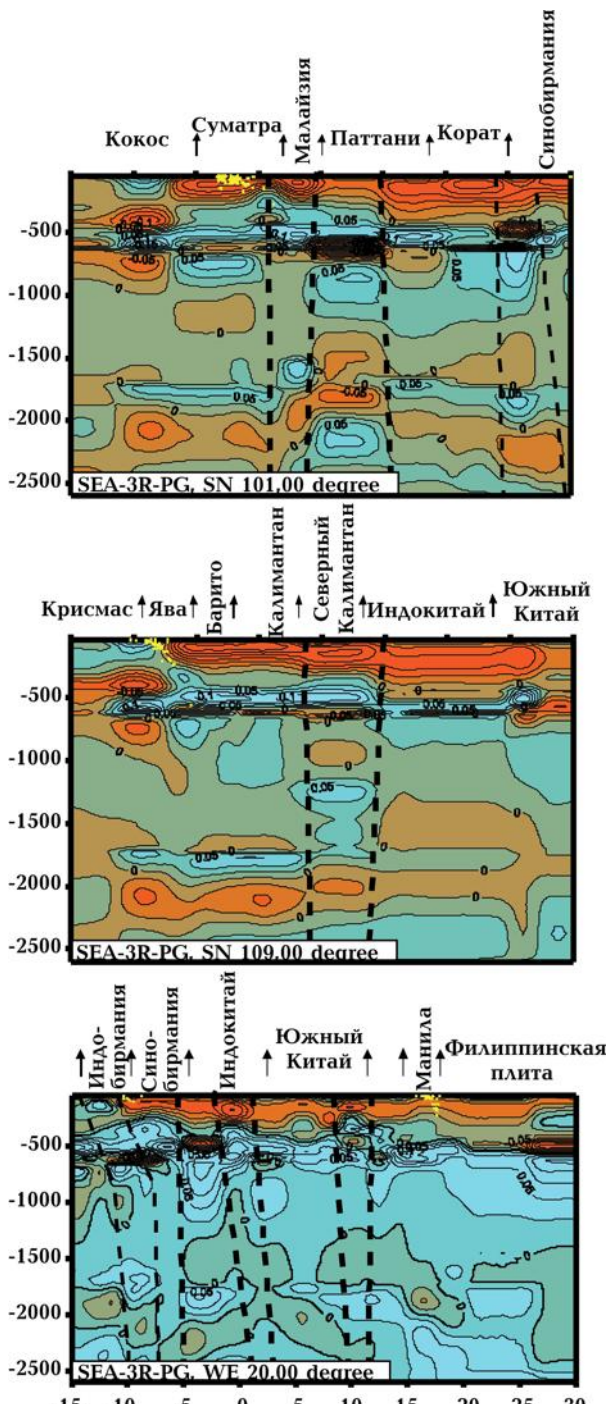


Рис. 10. Вертикальные сечения и выделенные мантийные колонки.

Индо-Австралийской плиты с запада, а Тихоокеанских структур с востока. Влияние на западе мантийных структур со стороны Индо-Австралийской платформы отражается в виде внедрения высокоскоростного слоя зоны раздела 1 Индо-Австралийской плиты в низкоскоростную зону раздела 1 скоростных

структур Юго-Восточной Азии. На востоке граница распространения низкоскоростного слоя зоны раздела 1 в определенной степени соответствует границе области сжатия (за исключением моря Сулавеси). Граница низкоскоростного слоя зоны раздела 1 проходит в мантии под Манильским желобом, Палаваном, восточной окраиной о-ва Калимантан, западным побережьем о-ва Сулавеси. Со стороны Австралийской плиты (блоки Австралия, южная часть Явы) зона раздела 1 однозначно не определяется — мантия в районе 8—15° ю.ш. и 110—125° в.д. характеризуется переслаиванием высоко- и низкоскоростных слоев.

На рис. 9 показано распределение выделенных по результатам представленной сейсмографической модели мантийных скоростных колонок для мантии под всей территорией Юго-Восточной Азии. Особенностью распределения мантийных колонок является выделение колонок под мантией центральной области, включающей южную половину блока Паттани, блок Северный Калимантан, восточную часть блока архипелага Труонг Са, блок Филиппины. По отношению к колонкам под указанной центральной частью выделяются две кольцевые области. Первая включает в себя мантийные колонки, соответствующие мантии под блоком Паттани, восточной половиной блока Корат, северо-западной частью блока Индокитай, южной частью блока Южный Китай и блоком Манила. По отношению к центральной части она расположена на север до южной оконечности склона Южно-Китайской платформы. Вторая кольцевая область расположена на юг от центральной части до северной оконечности Австралийской платформы. Южная кольцевая структура включает в себя, кроме уже представленной центральной части, мантийные колонки под южной частью блока Никобар, северной частью блока Суматра и западной частью блока Малайзия, южной частью блока Суматра, юго-западной частью блока Натунга и западной частью блока Ява, северной частью блока Кокос, центральными частями блоков Ява и Барито, центральной частью блока Тимор и блоком Сулавеси, блоками Сулу, Банда, Халмагера, Филиппины.

Всем приведенным мантийным колонкам (см. рис. 9) соответствуют НГБ. Интересующее нас месторождение Белый Тигр Меконгского НГБ относится к северной кольцевой структуре.

В пределах северной и южной мантийных кольцевых структур выделяются мантийные

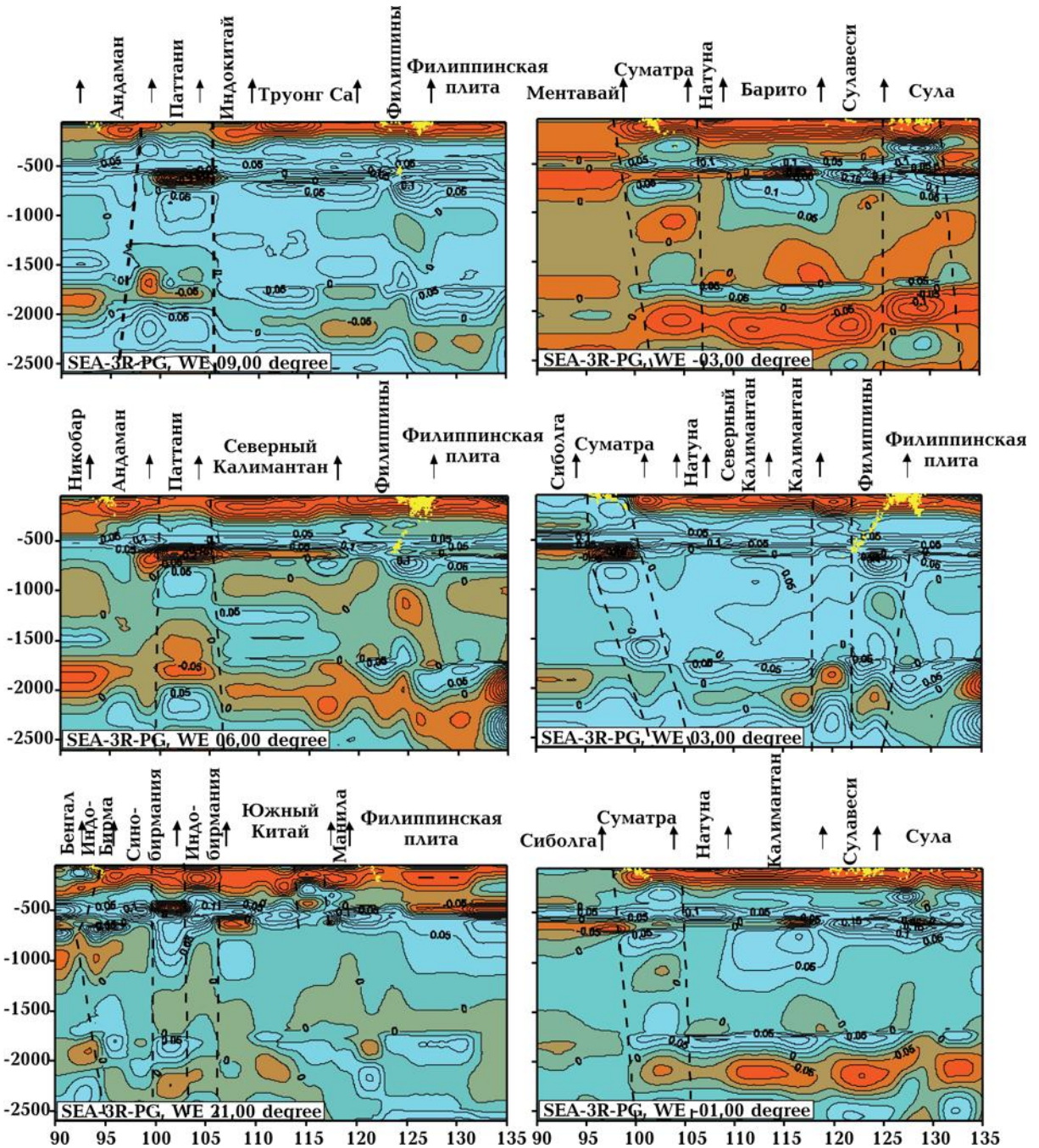


Рис. 11. Широтные сечения и выделенные мантийные скоростные колонки в мантии под Юго-Восточной Азией (пунктирные линии).

скоростные колонки трех типов (рис. 10, 11). Их типизация определяется скоростными характеристиками как верхней, так и нижней мантии. Скоростные колонки первого типа, к которым относится месторождение Белый Тигр, приурочены к мантийной области тройного сочленения скоростных структур под Индо-Австралийской, Тихоокеанской (Филиппинской) и Евразийской (Южно-Китайской)

плитами и соответствуют мантии под южной половиной блока Паттани, блоком Северный Калимантан, восточной частью блока архипелага Труонг Са, блоком Филиппины. Нижняя мантия этой области характеризуется распространением в ней скоростных слоев мантии под окружением Индо-Австралийской, Филиппинской, Южно-Китайской плит и выделением субгоризонтальных, контрастных,

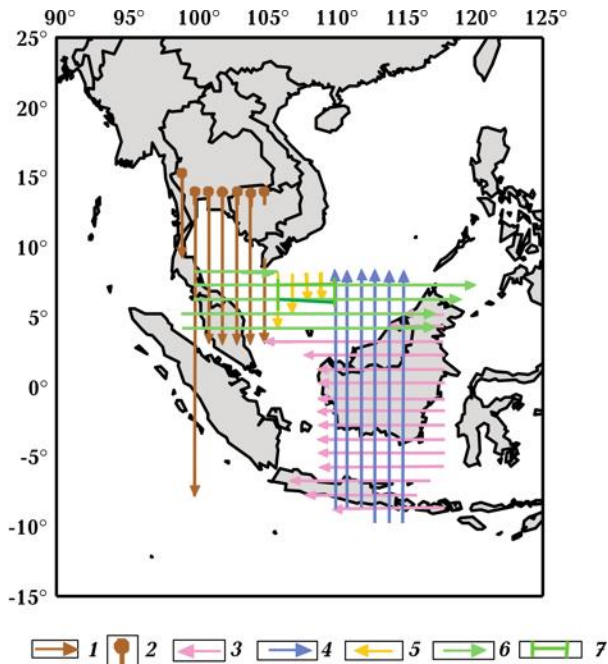


Рис. 12. Схема размещения наклонных скоростных слоев под Меконгским НГБ: 1 — погружающийся высокоскоростной слой переходной зоны верхней мантии в среднюю мантию, идущий со стороны блоков Синобирмания, Кораг; 2 — точка перегиба в наклонном слое; 3 — высокоскоростной слой переходной зоны, погруженный в среднюю мантию и проходящий под зону раздела 1; 4 — погружение со стороны блоков Крисмас и Ява; 5 — внедрение в зону раздела 1 со стороны блока Индокитай высокоскоростного слоя переходной зоны верхней мантии; 6 — слэб, оторвавшийся от погружающегося под блок Андаман высокоскоростного слоя переходной зоны верхней мантии; 7 — высокоскоростные аномалии.

чередующихся высоко- и низкоскоростных аномалий, представляющих мантийные субвертикальные скоростные колонки. Из всех выделенных инверсных друг относительно друга аномалий наиболее яркими являются аномалии, соотносящиеся с подошвой переходной зоны, определяющей кровлю зоны раздела 1 (граница раздела между средней и нижней мантией). Особенность верхней мантии — ее общая низкоскоростная характеристика. В пределах нее отмечается расслоенность по скоростям (с более высокими и более низкими невязками). После границы между верхней и средней мантией картина скоростного строения меняется, сохраняя при этом общую расслоенность.

Мантийные скоростные колонки второго типа соответствуют мантии под склонами Южно-Китайской и Австралийской платформ. Нижняя мантия характеризуется присутствием инверсных скоростных аномалий,

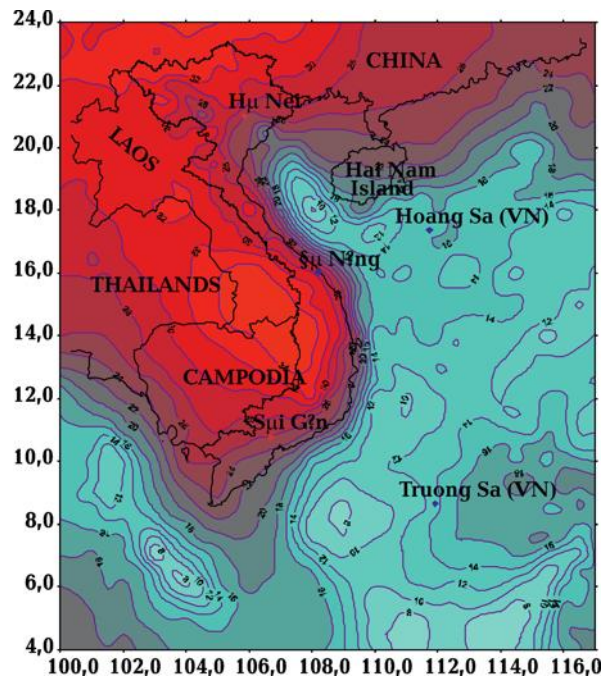


Рис. 13. Мощность кристаллической коры, по [Cao Dinh Trieu, 2010].

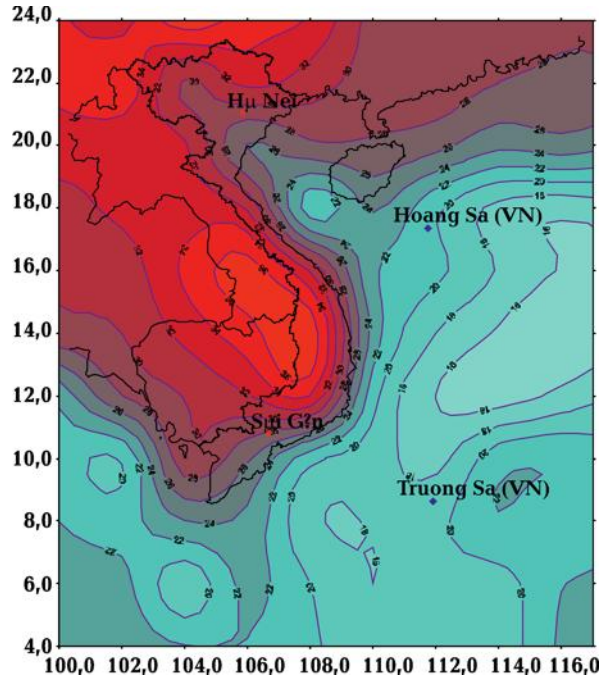


Рис. 14. Глубина залегания границы Мохо, по [Cao Dinh Trieu, 2010].

без субгоризонтальной слоистости. Верхняя мантия, наоборот, представлена четким выделением инверсных скоростных аномалий, присутствием наклонного высокоскоростного слоя, соответствующего склону платформы и наклонно распространяющегося в среднюю

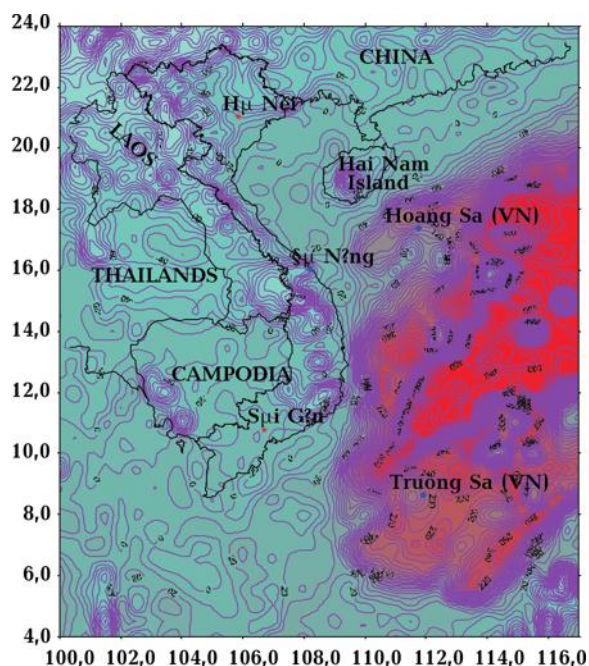


Рис. 15. Аномалии Буге (Вьетнам и его окружение), по [Cao Dinh Trieu, 2010].

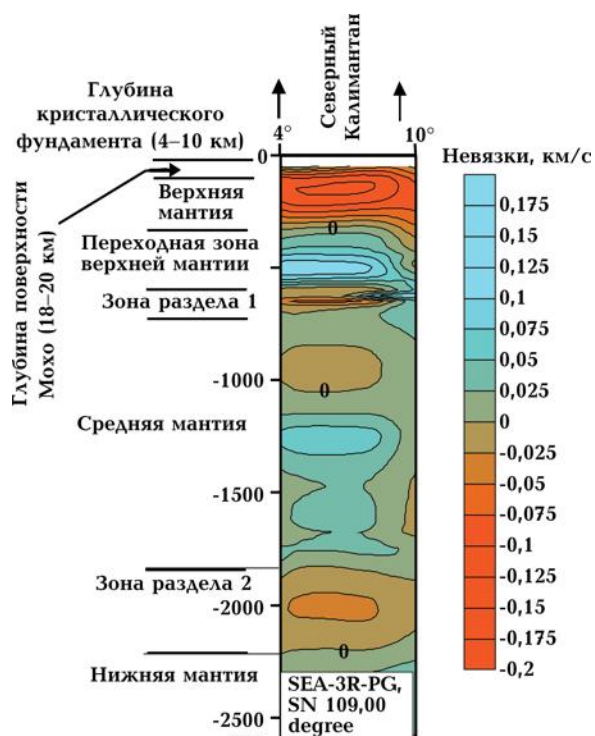


Рис. 16. Мантийный столб под Меконгским НГБ.

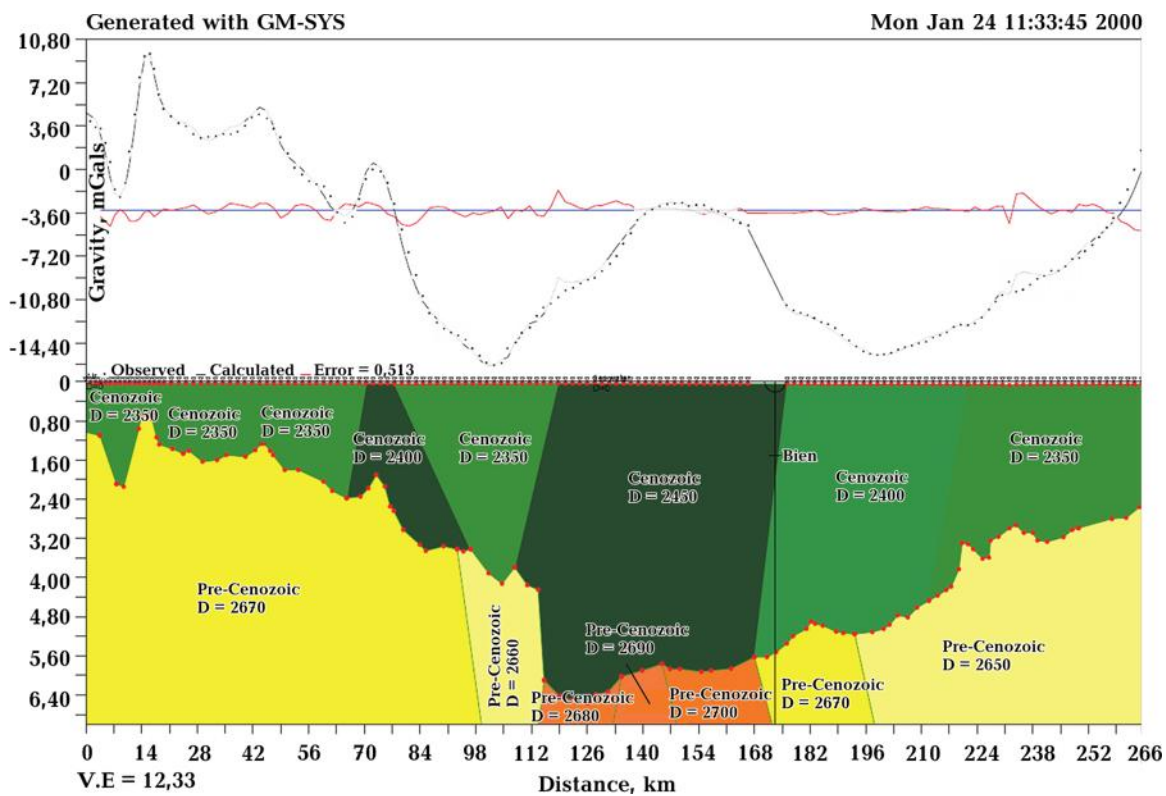


Рис. 18. Плотностная модель, по [Cao Din Trieu, 2010].

мантию в случае Южно-Китайской платформы и в нижнюю мантию в случае Австралийской платформы. Следует отметить, что к этому типу относятся скоростные колонки, соответствующие блоками Восточной и Центральных частей Южно-Китайского моря, блоку Тимор.

Мантийные колонки третьего типа приурочены к островодужным областям. К ним относятся блоки, связанные с Индо-Бирманской и Зондско-Бандской островодужными системами, такие как Суматра, Ява, Кокос, Сулавеси, Банда, Сула, Халмагера, Филиппины, Манила. Их особенностью является присутствие наклонных высокоскоростных слоев в верхней мантии, резко выраженная низкоскоростная аномалия невязок по подошве переходного слоя (граница раздела верхней и нижней мантии) до $-0,25$ км/с, приуроченных к мантийным скоростным колонкам (см. рис. 10, 11).

Большая часть мантийных скоростных колонок приурочена к области распространения слэбов либо к областям, для которых не выделяется зона раздела 1, согласно химико-минералогической модели Ю. Пушаровского. Такие свойства указывают на неустановившуюся активизированную мантию [Старостенко и др., 2011].

Нефтегазовое месторождение «Белый тигр». На рис. 4 (WE 07°), рис. 8 (SN 111°, SN 107°) представлены широтные и долготные сечения мантии под месторождением Белый Тигр. По данным сейсмической томографии мощность верхней мантии под территорией, охватывающей область $8-10^\circ$ с.ш. \times $106-110^\circ$ в.д., в среднем достигает 250—275 км, немного увеличиваясь к северу до 350 км. Здесь же наблюдается небольшое погружение низкоскоростного слоя с невязкой $-0,075$ км/с под более высокоскоростной слой. Подошва верхней мантии приподнята относительно переходной зоны верхней мантии. Максимальное погружение наблюдается под Индокитаем до глубины 375—450 км. Между 9 и 10° с.ш. в верхней мантии наблюдается четко выраженная скоростная граница — подошва низкоскоростного слоя верхней мантии. Здесь глубина ее залегания изменяется от 300 до 475 км. Область $105-106^\circ$ в.д. определяется как граничная для низкоскоростной аномалии с невязкой $-0,075$ км/с, которая объединяет блоки Труонг Са, Филиппины с востока и блоки Андаман и Паттани с запада.

Высокоскоростная переходная зона имеет под этой территорией мощность до 300 км, уменьшаясь к северу до 275—250 км. По от-

ношению к окружающим скоростным структурам данный участок по кровле переходной зоны немного приподнят. Изолиния с невязкой $0,025$ км/с объединяет блоки Северный Калимантан, Труонг Са.

Зона раздела 1 характеризуется под данным участком низкими скоростями. Кровля зоны-1 выделяется на глубине 600 км. Мощность всего слоя достигает 100 км. Характерной особенностью для данного участка является то, что здесь от 106° до 110° в.д. со стороны Индокитая (в южном направлении) внедряется высокоскоростной слой переходной зоны верхней мантии в низкоскоростную зону раздела 1. Максимальное внедрение наблюдается в южном направлении от 9° до 5° с.ш. по 106° в.д.; минимальное — до 7° с.ш. по $108-109^\circ$ в.д.

Зона раздела 1 служит границей, после которой кардинально изменяется характер поведения скоростных слоев. Для средней мантии, зоны раздела 2 и нижней мантии, согласно широтным сечениям, характерна тенденция общего наклона слоев в сторону Филиппин. Так, если максимальная глубина расположения кровли слоя зоны раздела 2 — 1300 км под блоком Паттани, то под блоком Филиппины низкоскоростной слой зоны раздела 2 уходит в нижнюю мантию.

В средней мантии на глубине 1150—1450 км, а местами до 1800 км, под изучаемым участком (WE 8°) наблюдается высокоскоростной слэб. Он образован в результате отрыва от нижней части погружающегося в восточном направлении под блок Андаман высокоскоростного слоя. В данном случае слэб берет начало под блоком Паттани (700—1200 км) и под углом 45° проходит до глубины 1900 км. К области мантии, расположенной под месторождением Белый тигр, приурочены слэбы (рис. 12).

В средней мантии прослеживается реперная граница $109-110^\circ$ в.д. На ней заканчивается внедрение в зону раздела 1 высокоскоростного слоя со стороны Индокитая. От границы 110° в.д. в восточном направлении выделяется оторвавшийся от погружающегося со стороны блока Крисмас высокоскоростного слоя слэб, ограниченный 9° с.ш.

Таким образом, в верхней мантии прослеживаются реперные границы $9-10^\circ$ с.ш. для аномалии, распространяющейся от мантии под блоком Ява, и $105-106^\circ$ для аномалии, объединяющей блоки Труонг Са, Филиппины. Именно между этими реперными границами и расположено интересующее нас месторождение.

Геофизические характеристики коровых

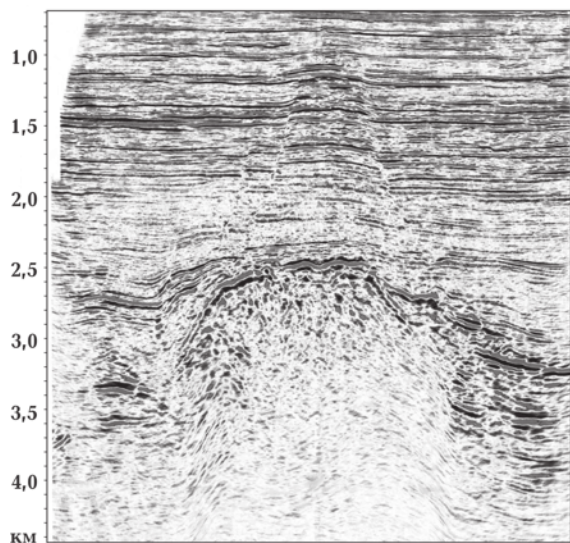


Рис. 17. Сейсмогеологический разрез.

структур подчеркивают особенности тектонического строения области Меконгского НГБ, где находится месторождение Белый Тигр. Область в пределах $8-10^{\circ}$ с.ш. \times $106-110^{\circ}$ в.д. относится к контактной зоне упомянутой выше зоны распространения палеоспрединга (ЗПСпр) и кайнозойского бассейна (ЗМек) (см. рис. 2). Область характеризуется как переходная по коровому слою. Мощность кристаллической коры увеличивается от 12 до 16 км для ЗПСпр до 18—25 км для ЗМек, при этом выделяется аномалия мощности кристаллической коры, соответствующая 8—10 км, к которой относится месторождение Белый Тигр. При общем увеличении глубины залегания границы Мохо с востока на запад глубина границы М для зоны ЗПСпр 16—18 км увеличивается до глубины 20—26 км для зоны ЗМек (см. рис. 13, 14). При этом так же выделяется область, соответствующая месторождению Белый Тигр, характеризующаяся поднятием глубины залегания границы М до 18 км на фоне 20 км. Аномалии Буге для территории Юго-Восточной Азии (рис. 15) позволяют считать рассматриваемую область как пограничную с перепадом силы тяжести для исследуемой области от 300—80 мГал

для ЗПСпр до 40—20 мГал для ЗМек.

Проведенные исследования, связанные с месторождением Белый Тигр Меконгского НГБ, показывают существование субвертикальной структуры, отслеживающейся по сейсмическим данным от ядра до коры (рис. 16).

Сейсмическое и плотностное строение осадочного чехла и фундамента района месторождения Белый Тигр предоставлены Институтом геофизики ВАНТ, Ханой. Скоростное строение коры показывает аномалии глубины залегания границы М, аномалию мощности кристаллической коры в области месторождения. По результатам проведенных разведочных работ по профилям в районе Меконгского НГБ сейсмогеологический разрез представляет собой шток (рис. 17), что подтверждается высокоскоростной плотностной аномалией (рис. 18) в районе месторождения. Особенности скоростной характеристики мантии выделенной субвертикальной области являются: субвертикальное чередование аномалий высоких и низких скоростей, резкая скоростная аномалия, присущая подошве переходной зоны (границе между верхней и нижней мантией), изменение характера распределения скоростей в верхней мантии с сохранением чередования повышенных и пониженных скоростей на общем низкоскоростном фоне, выделение субвертикальной структуры (штока) в осадочном чехле и кровле кристаллического фундамента. Характерны также подъем границы Мохо, подошвы верхней мантии, кровли зоны раздела 1, приуроченность мантийной области под месторождением Белый Тигр к области распространения высокоскоростных слабых в средней мантии.

Одной из особенностей проявления мантийных скоростных колонок является приуроченность к ним повышенной сейсмичности (таблица). Такие явления широко известны по отношению к островодужным областям Бирмано-Зондской и Зондско-Бангской систем.

В то же время обращает внимание приуроченность областей повышенной сейсмичности к областям определений мантийных скоростных колонок.

Каталог землетрясений, приуроченных к области месторождения Белый Тигр (Институт геофизики ВАНТ, Ханой)

Дата			Время			Координаты		H, м	M _B
			ч	мин	с	φ	λ		
1923	2	15	0	0	0	10,1	109	10	5,1
1923	5	2	0	0	0	10,1	109	17	6,1
1948	1	14	2	25	0	8,9	108,7	60	5

1955	1	1	0	0	0	11,25	108,73	5	3
1955	1	1	0	0	0	11,1	108,4	15	3,4
1960	2	28	20	13	0	11,1	109,1	15	4,1
1960	7	3	1	17	0	9,1	108,3	10	5,1
1963	10	29	2	49	0	11,2	109,2	6	3
1964	8	7	6	9	0	9,1	106,1	0	3
1964	8	8	22	16	0	10,3	106,8	0	3
1964	8	9	0	29	0	9,8	106,6	0	3
1964	9	21	8	16	0	9,5	106,5	0	3
1964	10	5	9	59	0	9,6	108,9	0	3
1965	1	23	22	22	0	9,9	108,9	15	4,8
1965	1	24	5	22	0	9,9	108,9	0	3
1967	3	12	23	16	0	12	108,7	15	4
1967	4	21	0	27	0	8,9	105,9	15	3,1
1967	4	21	7	27	0	12	108	10	3,1
1970	4	18	16	8	0	8,9	108	15	4,9
1990	10	15	7	51	0	10,4	107,48	0	3,7
1991	6	1	0	0	0	10,6	107,9	5	4
2005	8	5	13	35	0	9,92	109,19	1	4,3
2005	8	5	14	9	0	9,88	109,13	12	4,3
2005	8	5	18	7	0	9,85	109,22	0	5,1
2005	9	7	6	7	0	10,18	109,04	0	3,1
2005	9	19	19	29	0	10,13	108,18	5	4,4
2005	9	28	20	46	0	10,23	107,89	0	3,2
2005	10	16	23	26	0	10,33	109,19	0	3,0
2005	10	17	0	59	0	10,34	109,19	0	3
2005	10	17	1	28	0	10,37	108,58	0	4,3
2005	11	8	7	54	0	9,88	108,76	0	5,4
2005	11	11	1	28	0	9,91	108,75	0	3,8
2005	11	11	14	57	0	10,03	108,89	20	3,6
2005	11	11	16	36	0	9,8	109,19	0	3,4
2005	11	15	19	20	0	9,81	109,19	0	3,7
2005	11	17	21	32	0	10,26	108,27	0	3,8
2005	11	19	14	11	0	8,55	107,95	10	4
2005	12	16	9	47	0	9,92	109,24	9	3,5
2005	12	18	13	20	0	10,49	107,9	0	3,1
2005	12	26	22	41	0	10,59	108,07	0	3,1
2005	12	27	14	18	0	10,91	107,17	10	3,2
2006	1	7	18	59	0	10,13	107,92	7	3,1
2006	2	2	20	33	0	11,94	106,48	4	3,1
2006	3	1	6	17	0	10,05	108,72	0	3,3
2006	3	8	7	25	0	11,66	106,76	4	3,3
2006	3	1	6	17	0	9,86	109,01	0	3,3
2006	4	2	15	50	0	10,48	108,82	20	3,9
2006	4	2	16	48	0	10,39	108,75	10	3,9
2006	4	3	15	58	0	10,38	108,68	8	4,1
2006	5	5	16	35	0	10,3	108,55	6	3,5
2006	6	12	14	9	0	9,92	109,37	0	3,3
2006	7	2	23	55	0	10,21	107,53	5	3,5
2006	7	2	23	59	0	10,13	109,26	0	3,0
2006	7	3	0	33	0	10	108,47	0	3,4
2006	7	4	0	34	0	10,52	108,58	17	3,5
2006	7	4	21	0	0	9,91	108,89	0	3,3
2007	11	28	15	16	8	9,99	108,32	10	4,5

Приведенный каталог показывает сейсмическую активность области месторождения Белый Тигр. Приуроченность землетрясений к НГБ известна и находит различные объяснения, связанные с процессом флюидизации. Исходя из того, что землетрясения соответствуют рассматриваемому месторождению Белый Тигр и глубина очагов землетрясений изменяется от 0 до 59 км, можно ожидать, согласно работе [Вол, Гилат, 2006], что их причина определяется моделью взрывного механизма, основанной на реальном взрывном распаде гелия и водорода при мгновенном сбросе давления в зоне разлома. Сравнение представленных в бюллетенях ISC магнитуд M_b (шкалы Рихтера) и M_w (шкалы Канамори) землетрясений, относящиеся к месторождению Белый Тигр, показывает, что для землетрясений этого региона характерна величина $\max(M_w - M_b)$, изменяющаяся в пределах 0,8—0,9 (на фоне 0,3—0,4 его окружения). Согласно М. В. Родкину [Родкин и др., 2009], можно ожидать преобладающее распространение глубинных процессов вверх, в механизмах очагов таких землетрясений существенная роль отводится флюидным процессам. Более детально особенности сейсмической активности НГБ будет рассмотрена дальше.

Заключение. 1. Представленная характеристика скоростного строения мантии под Юго-Восточной Азией соответствует основным общим положениям плюм-тектоники. Выделена четкая граница раздела между верхней мантией (верхняя мантия, переходная зона верхней мантии) и нижней мантией (зона раздела 1, средняя мантия, зона раздела 2, нижняя мантия), согласно химико-минералогической модели Ю. Г. Пуцаровского. Определены высокоскоростные наклонные слои в верхней мантии, соответствующие зонам субдукции Бирмано-Зондской и Зондско-Бандской островодужных систем. Высокоскоростные наклонные слои (слабы) средней мантии в той либо иной степе-

ни связаны с высокоскоростными наклонными слоями верхней мантии. В пределах мантии выделены субвертикальные скоростные мантийные колонки, которые определяются чередованием высокоскоростных и низкоскоростных аномалий, начиная от границы ядро—мантия до коры. Они могут отражать прохождение сверхглубинного флюида (плюма).

2. По скоростным характеристикам мантии определена неустановившаяся активизированная мантия, которой присущи перечисленные выше особенности: скоростная слоистость верхней мантии, возможное отсутствие зоны раздела 1 и зоны раздела 2, присутствие слабых как высокоскоростных наклонных слоев, распространяющихся в средней, возможно и в нижней, мантии [Старостенко и др., 2011].

3. Отмечается привязка известных на территории Юго-Восточной Азии НГБ к выделенным мантийным колонкам, в совокупности образующих две кольцевые структуры с общей центральной частью, к которой относится Меконгский НГБ и соответственно месторождение Белый Тигр.

4. Месторождению Белый Тигр соответствует мантийная скоростная колонка, которая наблюдается в скоростных структурах от нижней мантии до коры включительно. Особенности мантийной скоростной колонки:

- 1) подъем границы Мохо, подошвы верхней мантии, кровли зоны раздела 1;
- 2) резкая аномалия кровли зоны раздела 1;
- 3) присутствие в высокоскоростных слабых, распространяющихся в средней мантии под месторождением Белый Тигр, высокоскоростной аномалии мантийной колонки;
- 4) повышенная сейсмичность области месторождения Белый Тигр;

В совокупности с результатами геологического анализа месторождения Белый Тигр [Старостенко и др., 2011] можно предполагать его сверхглубинное, флюидное происхождение.

Список литературы

- Баев А. В., Солодовников В. Н. Решение задачи о гравитационном сжатии слоистого шара (на примере Земли) // Прикладная механика и техническая физика. — 2004. 45, № 6. — С. 103—115.
- Вол А., Гилат А. Первичный водород и гелий как источники землетрясений // Генезис углеводородных флюидов и месторождений / Отв. ред. А. Н. Дмитриевский, Б. М. Валяев. — Москва: ГЕОС, 2006. — С. 160—166.
- Гейко В. С., Цветкова Т. А., Санникова Н. П., Ливанова Л. П., Гейко К. В. Региональная 3D P-скоростная структура мантии северо-западной Евразии — I. Европа. 1 // Геофиз. журн. — 1998. — 20, № 3. — С. 67—91.
- Добрецов Н. Л., Киргяшкин А. Г., Киргяшкин А. А. Геодинамическая и тепловая модели зоны субдукции // Физ. мезомеханика. — 2009. — 12 (1). — С. 5—16.

- Заец Л. Н., Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Шумлянская Л. А. 3D P -скоростное строение верхней мантии Индокитая и его окружения // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 2. — С. 47—60.
- Зоненшайн Л. П., Савостин Л. Л. Введение в геодинамику. — Москва: Недра, 1979. — 311 с.
- Летников Ф. А. К вопросу о природе изменения скоростей продольных волн (V_p) в мантии, соотносимых с воздействием плюмов // Докл. РАН. — 2003. — **390**, № 5. — С. 673—675.
- Пущаровский Ю. М. Сейсмотомография, тектоника и глубинная геодинамика // Докл. РАН. — 1998. — **360**, № 4. — С. 518—522.
- Родкин М. В., Никитин А. Н., Васин Р. Н. Сейсмотектонические эффекты твердофазных превращений в геоматериалах. — Москва: ГЕОС, 2009. — 198 с.
- Руженцев С. В., Моссаковский А. А., Меланхолина Е. Н. Геодинамика Тихоокеанского и Индо-Атлантического сегментов Земли: сейсмотомографический аспект (постановка проблемы) // Геотектоника. — 1999. — № 3. — С. 5—20.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Заец Л. Н., Донцов В. В., Савиных Ю. В. Об участии суперглубинных флюидов в нефтидогенезе (по данным изучения уникального нефтяного месторождения Белый Тигр) // Геофиз. журн. — 2011. — **33**, № 4. — С. 3—32.
- Трубицын В. П. Природа границы между верхней и нижней мантией и ее влияние на конвекцию // Физика Земли. — 2010. — № 6. — С. 3—18.
- Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. — Москва: Научный мир, 2001. — 586 с.
- Шерман С. И., Лукина О. В. напряженное состояние литосферы Азии // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Институт земной коры. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН. — 2003. — С. 271—275.
- Cao Dinh Trieu. Seismic Hazards in Vietnam — Hanoi: Sci. Technics Publ. House, 2010. — 180 p.
- Geyko V. S. A general theory of the seismic travel-time tomography // Геофиз. журн. — 2004. — **26**, № 1. — С. 3—32.
- Inoue H., Fukao Y., Tanabe K., Ogata Y. Whole mantle P-wave travel-time tomography // Phys. Earth Planet. Int. — 1990. — **59**. — P. 294—328.
- Martinez Z., Pec K. The influence of the core-mantle boundary irregularities on the mass density distribution inside the Earth // Geophysical data inversion methods and applications. Proceedings of VII Int. Mathem., Geophys. Seminar. Free University of Berlin, Feb. 8—11, 1989. — P. 233—256.
- Maruyama Sh. Plume tectonics // J. Geol. Soc. Japan. — 1994. — **100**, № 1. — P. 24—49.
- Morgan W. J. Convective plumes in the lower mantle // Nature. — 1971. — **230**. — P. 42—43.
- Nataf H.-C. Seismic imaging of mantle plumes // Annual Rev. Earth Planet. Sci. — 2000. — **28**. — P. 391—417.
- Semenov V. Yu. Regional conductivity structures of the Earths mantle. — Warszawa: Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences, 1998. — 122 p.
- Wilson J. T. Evidence from islands on the spreading of ocean floor // Nature. — 1963. — **197**. — P. 536—538.