

СВЯЗЬ СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ МАНТИИ ПОД ТАИЛАНДОМ И ЕГО ОКРУЖЕНИЕМ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ РЕГИОНА

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

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32, Киев, 03680, Украина,
e-mail: larysa_zaiets@ukr.net, igor_bugaenko@ukr.net, tsvet@igph.kiev.ua*

В результате применения метода тейлорового приближения решения задачи сейсмической томографии времен прихода P -волн, предложенного В.С. Гейко, построена трехмерная P -скоростная модель мантии Юго-Восточной Азии. Рассмотрено скоростное строение мантии под Таиландом и его окружением с целью выявления возможных предпосылок в ее глубинном строении проявления в данном регионе землетрясений. Для областей, которые характеризуются повышенной сейсмичностью, выявлены общие черты скоростного строения мантии – мантийные скоростные колонки отвечают восходящим потокам сверхглубинных флюидов, распространение низкоскоростных слоев из нижней мантии (2600 км) и наклонных высокоскоростных слоев в верхней и нижней мантии. Кроме традиционного представления градиентной среды в долготных и широтных сечениях изучено поведение градиентов скоростей по глубине. По введенным градиентам скорости получены сейсмические границы второго рода, что позволило уточнить характеристику среды, представляемую в виде изолиний невязок скорости относительно референтной модели.

Ключевые слова: мантия, скоростное строение, землетрясение, Таиланд.

Юго-Восточная Азия является территорией с высокой сейсмической активностью, что обусловлено коллизийными процессами между Индо-Австралийской и Евразийской плитами вдоль Суматра-Андаманской зоны субдукции, а также внутриплитной деятельностью [9]. Рассматриваемый регион представляет собой коллаж из континентальных блоков, вулканических дуг и сутур. Континентальные блоки – это обломки восточной окраины Гондваны, которые соединились в течение позднего палеозоя–кайнозоя, а на протяжении фанерозойской эволюции отделялись от восточной Гондваны в результате последовательного открытия и закрытия бассейнов трех океанов: палео-Тетиса, мезо-Тетиса и нео-Тетиса [11]. Новейшая тектоника Таиланда связана с взаимодействием Индо-Австралийской, Евразийской, Филиппинской и Тихоокеанской плит в сочетании с открытием Андаманского моря [7, 10]. В регионе выделено 15 активных разломных зон, по данным GPS отмечено дифференцированное движение территории Таиланда на восток со скоростью 3–4 см/год [5, 6, 8]. Интерес к региону вызван мощным землетрясением с магнитудой 6,1 произошедшим в мае 2012 г. на севере Таиланда (19,703° с. ш. × 99,683° в. д.). Эпицентры подземных толчков зарегистрированы на глубине 2 (магнитуда 6,0) и 172 км (магнитуда 6,1).

Цель статьи – анализ скоростного строения мантии под областью 95–110° в. д. × 15–25° с. ш., которая включает Таиланд и его окружение – территории Лаоса, Мьянмы и Южного Китая (в работе использована тектоническая блоковая схема

Юго-Восточной Азии, предоставленная профессором Cao Dinh Trieu [4] (рис.1).

Рассмотрено распределение очагов землетрясений в пределах указанной территории с использованием данных, полученных из бюллетеней ISC за 1973–2014 гг. По этим данным в регионе в изобилии зарегистрированы слабые сейсмические толчки с магнитудой от 3 до 5 (до 2982 землетрясений). В пространственном распределении выделяются области скопления эпицентров слабых землетрясений вдоль границ блоков Синобирмания, Индо-Бирмания, Шан Тхай. Анализ эпицентров сильных землетрясений с магнитудой более 6,0 показывает, что одна часть землетрясений сосредоточена вдоль восточной границы блока Шан Тхай и образует линейно вытянутую зону, другая часть – в районе плато Шан и в северном районе Таиланда.

Большинство глубокофокусных землетрясений наблюдается в районе блока Корат и по границам блока Синобирмания. В разных частях исследуемого региона имеются различные источники современной активности – процессы субдукции и коллизии, вызывающие раздробление и смещение блоков, и внутренняя тектоническая нестабильность. К настоящему времени полученные данные свидетельствуют о наличии связи между сейсмичностью региона и особенностью его глубинного скоростного строения.

Сейсмические волны, возбуждаемые землетрясениями, до сих пор являются главным средством получения информации о строении земных недр, недоступном для прямого изучения, от коры до внутреннего ядра Земли. Общая тенденция

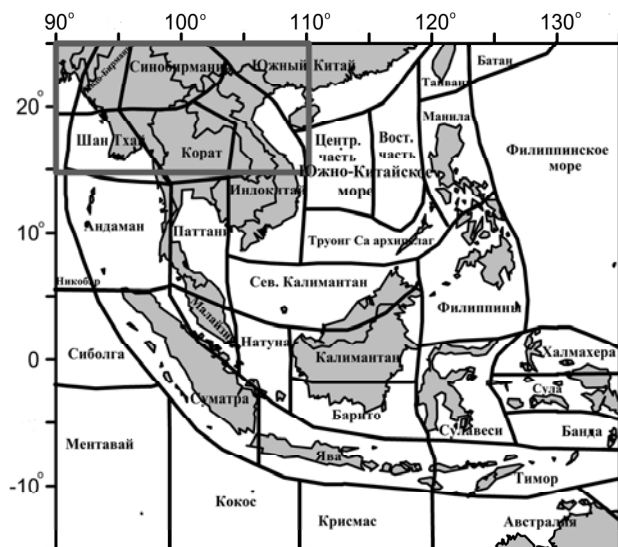


Рис. 1. Тектоническая блоковая схема Юго-Восточной Азии (по Cao Dinh Trieu, 2010). Серым тоном выделена изучаемая область

Fig. 1. Tectonic bloc scheme of Southeast Asia (by Cao Dinh Trieu, 2010). Grey highlighted study area

дальнейшего развития сейсмических методов связывается в первую очередь с возрастающими требованиями все большей достоверности и детальности получаемой информации.

Метод тейлорового приближения, разработанный В.С. Гейко для построения P -скоростной модели мантии, позволил получить модель, не зависящую от референтной модели, и дает решение в скоростях. В качестве исходных данных принимались времена прихода первых вступлений P -волн на станции, представленные в бюллетенях ISC начиная с 1964 г. Для построения модели использовались события с такими характеристиками: количество станций, их зарегистрировавших, 300; глубина гипоцентра ≤ 50 км; магнитуда события $M \geq 4,0$. Общее число станций, использованных в работе, превышает 2000. Мантия освещается в диапазоне эпицентральных расстояний $0-104^\circ$. В результате построено обобщенное поле времен прихода P -волн в формате средней точки, получены 110 годографов – сечений преломленных волн. Максимальное число сейсмических лучей составляет 64 797, минимальное – 2830. В статье [1] для анализа точности полученного методом тейлорового приближения обращения приведен тестовый пример. Решение представлено в виде горизонтальных и вертикальных сечений, шаг по изолиниям скорости выбран, исходя из точности обращения сечений ($0,015$ км/с), $-0,025$ км/с. Разрешающая способность метода $0,5^\circ \times 0,5^\circ \times h$ (h – до 1000 км) и $1^\circ \times 1^\circ \times h$ (h – от 1000 до 2900 км). С целью визуализации результатов использовалась обобщенная средняя скорость для мантии под территорией Евразии и ее окружением. Вертикальные сечения представлены в невяз-

ках скорости относительно полученной для мантии под территорией Евразии обобщенной модели скорость–глубина. Относительно этой же модели скорости на вертикальных сечениях выделены области повышенных и пониженных скоростей. Как базовая модель в работе использована модель Пушаровских.

Построенная модель была сопоставлена с распределением сильных землетрясений. Глубокофокусные землетрясения (от 300 до 600 км) с магнитудой более 4 сосредоточены в пределах блока Корот, северной части блока Индокитай, блоков Синобирмания, Индо-Бирмания и Шан Тхай, потому при анализе скоростного строения мантии основное внимание уделено им (рис. 1).

Особенности скоростного строения мантии под блоком Шан Тхай связаны с распространением из нижней мантии слоя пониженных скоростей от глубины 2600 до 1500 км и дальнейшим его растеканием к северу и югу от блока (рис. 2, 94° , 96° в. д.). Области растекания, начиная с 96° в. д., в восточном направлении дробятся на части и локализируются в низкоскоростные аномалии на общем высокоскоростном фоне. Восходящие низкоскоростные потоки оказывают влияние на все скоростное строение мантии как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Непосредственно над низкоскоростным выходом выделяются аномально мощная низкоскоростная зона раздела-1 (мощность до 600 км), погруженная в среднюю мантию, и высокоскоростная переходная зона верхней мантии (мощностью до 400 км под блоком Шан Тхай) с выпуклыми вверх изолиниями невязок непосредственно под блоками Андаман и Шан Тхай. Верхняя мантия под этими блоками низкоскоростная с минимальной мощностью под блоком Шан Тхай (до 125 км) и выпуклыми изолиниями невязок. Под смежными блоками мощность верхней мантии увеличивается – под блоком Андаман до 400 км, под Индо-Бирманией – до 300 км. По обе стороны от максимальной выпуклости изолиний невязок (блок Шанхай) выделяются низкоскоростные аномалии с невязками $-0,125$ км/с под блоком Андаман и $-0,1$ км/с возле границы с блоком Индо-Бирмания.

В то же время начиная с 94° в. д. на нижних уровнях нижней мантии (2250–2600 км), блок Ментавай, формируется низкоскоростной слой, который от 100° в. д. распространяется в субвертикальном направлении с юга на север. Часть этого слоя доходит до блоков Корот, Синобирмания (рис. 2, 100° , 101° в. д.) и Индокитай (рис. 2, 104° в. д.), где достигает глубины 850 км. С противоположной стороны (блоки Шан Тхай, Синобирмания и Корот) на глубинах 2100–2500 км формируется низкоскоростной слой, он поднимается в южном направлении, где соединяется со

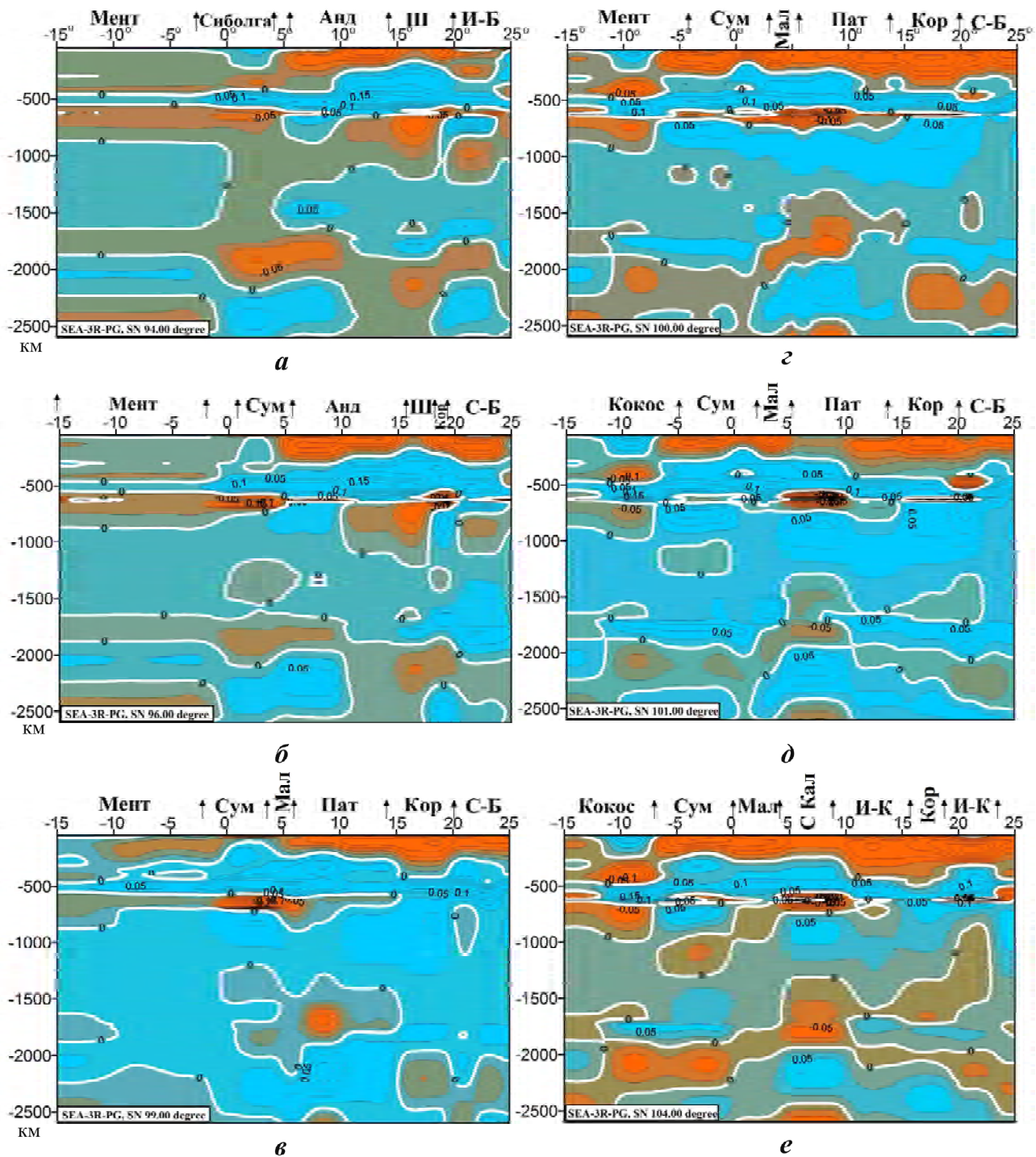


Рис. 2. Долготные сечения 94° (а), 96° (б), 99° (в), 100° (г), 101° (д), 104° (е) трехмерной модели мантии Юго-Восточной Азии. Блоки: Анд – Андаман, И-Б – Индо-Бирмания; И-К – Индокитай, Кор – Корат, Мал – Малайзия, Мент – Ментавай, Пат – Паттани, С-Б – Синобирмания, С Кал – Северный Калимантан, Сум – Суматра, Ш – Шан Тхай
 Fig. 2. Longitudinal cross section 94° (a), 96° (b), 99° (c), 100° (d), 101° (e), 104° (f) three-dimensional model of the mantle Southeast Asia. Blocks: And – Andaman, I-B – Indobirmaniya, I-C – Indochina, Kor – Korat, Mal – Malaysia, Ment – Mentawai, Pat – Pattani, S-B – Sinobirmaniya, N Kal – North Kalimantan, Sum – Sumatra, Sh – Shan Thai

встречным слоем под блоком Паттани, образуя утолщенный низкоскоростной слой мощностью до 650 км. Наклонный низкоскоростной слой, поднимающийся с глубины 2600 км от блока Кокос, на глубине 600 км достигает границы между блоками Индокитай и Южный Китай. Восходящие низкоскоростные слои с севера и юга формируют под блоком Паттани скоростную мантийную ко-

лонку, которая соответствует сверхглубинному флюидному процессу и характеризуется чередованием высоко- и низкоскоростных аномалий. Восходящему низкоскоростному потоку сопутствует высокоскоростной погружающийся наклонный слой со стороны блоков Индокитай и Синобирманья, его окончание формирует высокоскоростную аномалию в мантийной колонке под блоком Пат-

тани. Наклонный высокоскоростной слой берет начало под блоком Синобирмания, где его кровля выделяется на глубине 300 км, подошва – 750 км. Окончание слоя – под блоками Паттани и Сев. Калимантан на глубинах 750–1150 км. С севера (блоки Синобирмания, Индокитай, Южный Китай) в высокоскоростной слой на глубине 650 км внедряется низкоскоростной слой.

Таким образом, в нижней мантии два встречных низкоскоростных потока пронизывают западную часть Юго-Восточной Азии. Первый поток наблюдается со стороны блока Синобирмания, он поднимается с глубины 2500–2600 км до 1300 км под блоком Паттани, где участвует в формировании скоростной мантийной колонки. Второй поток, распространяется в северном направлении от блоков Ментавай и Кокос и принимает участие в формировании мантийной колонки под блоком Паттани. Вся рассмотренная область находится под влиянием восходящих низкоскоростных потоков, распространяющихся навстречу друг к другу. Они сопровождаются высокоскоростными наклонными слоями, погружающимися от верхней мантии до переходной зоны верхней мантии и от переходной зоны в среднюю мантию.

Представляет интерес скоростное строение мантии под блоком Индо-Бирмания (рис. 3, 21°, 22° с. ш.), поскольку область характеризуется по-

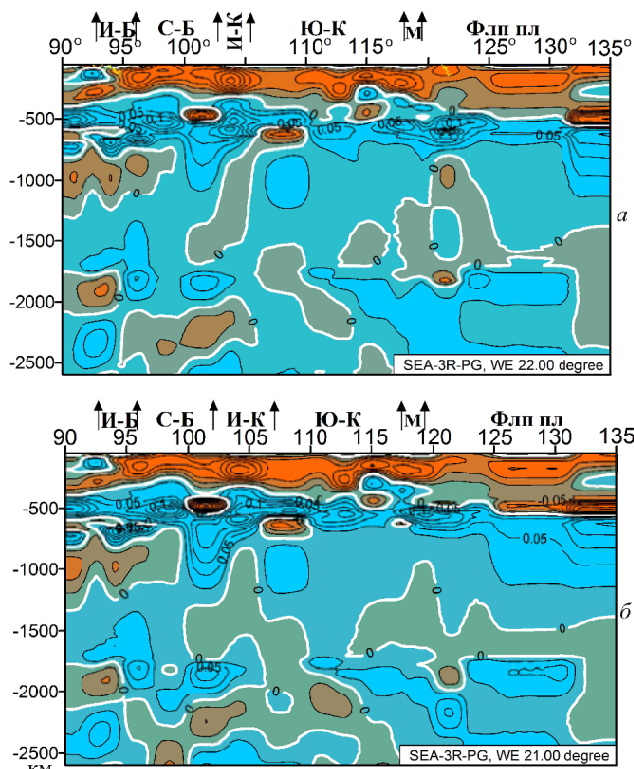


Рис. 3. Широтные сечения 21° (а), 22° (б). Структуры: И-Б – Индо-Бирмания, И-К – Индокитай, М – Манила, С-Б – Синобирмания, Ю-К – Южный Китай, Флп пл – Филиппинская плита

Fig. 3. Latitudinal cross section 21° (a), 22° (b). Structure: I-B – Indobirmaniya, I-C – Indochina, M – Manila, S-B – Sinobirmaniya, S-C – Southern China, Phil – Philippine Plate

вышенной сейсмичностью, приуроченной к границам блока, к контактам высоко- и низкоскоростных областей. Так, в верхней мантии под Индо-Бирманией с севера, согласно модели, наклонный высокоскоростной слой погружается в переходную зону верхней мантии, разрывает зону раздела-1 и погружается в среднюю мантию. Вся область мантии под Индо-Бирманией характеризуется повышенной расслоенностью – скоростная мантийная колонка выделяется в виде чередования высоко- и низкоскоростных аномалий.

В пределах блока Корат (см. рис. 2, 99°, 100° в. д.) выделяется наибольшее количество глубокофокусных землетрясений. По всей глубине верхней мантии под блоком мантийная колонка характеризуется максимальными низкоскоростными аномалиями на глубинах 525–600 км и 600–700 км (невязка – 0,175 км/с). Начиная с 98° в. д. в восточном направлении мощность низкоскоростной мантии постепенно увеличивается до 350–400 км (в районе 96–97° в. д. – 200–225 км), на глубине 600 км наблюдается низкоскоростная аномалия –0,15 км/с. Под блоком Корат проходит погружающийся высокоскоростной слой, берущий начало под блоками Синобирмания и Индокитай (глубина 300 км), он имеет мощность до 600 км (глубины 500–1100 км). Часть слоя погружается в среднюю мантию под границей между блоками Корат и Синобирмания. Над выходом пониженных скоростей отмечается аномально повышенная мощность высокоскоростной переходной зоны верхней мантии, под блоком Синобирмания – выпуклость изолиний невязок скорости, а также подошвы верхней мантии. Начиная с 101° в. д. плюмовый ствол (выход пониженных скоростей) локализуется в отдельную аномалию, входящую в мантийную колонку и выделенную на границе между блоками Корат и Синобирмания, Индокитай и Синобирмания (см. рис. 2, 101° в. д.).

Таким образом, отметим общие черты скоростного строения под рассмотренными блоками:

- наблюдаются выходы пониженных скоростей из нижней мантии (2600 км) – блоки Корат, Синобирмания (99° в. д.), Шан Тхай, Индо-Бирмания (94–95° в. д.);
- выделяются мантийные скоростные колонки – проявление сверхглубинных флюидных процессов. Эти зоны маркируются как субвертикальные области последовательностей высоко- и низкоскоростных аномалий – результат флюидного процесса в неоднородной скоростной среде (блоки Шан Тхай, Индо-Бирмания (92° в. д.), Синобирмания (96° в. д.), Корат (98° в. д.));
- характерно распространение наклонных высокоскоростных слоев в верхней мантии, со стороны блока Индо-Бирмания под блоком Шан Тхай наклонный слой погружается в переход-

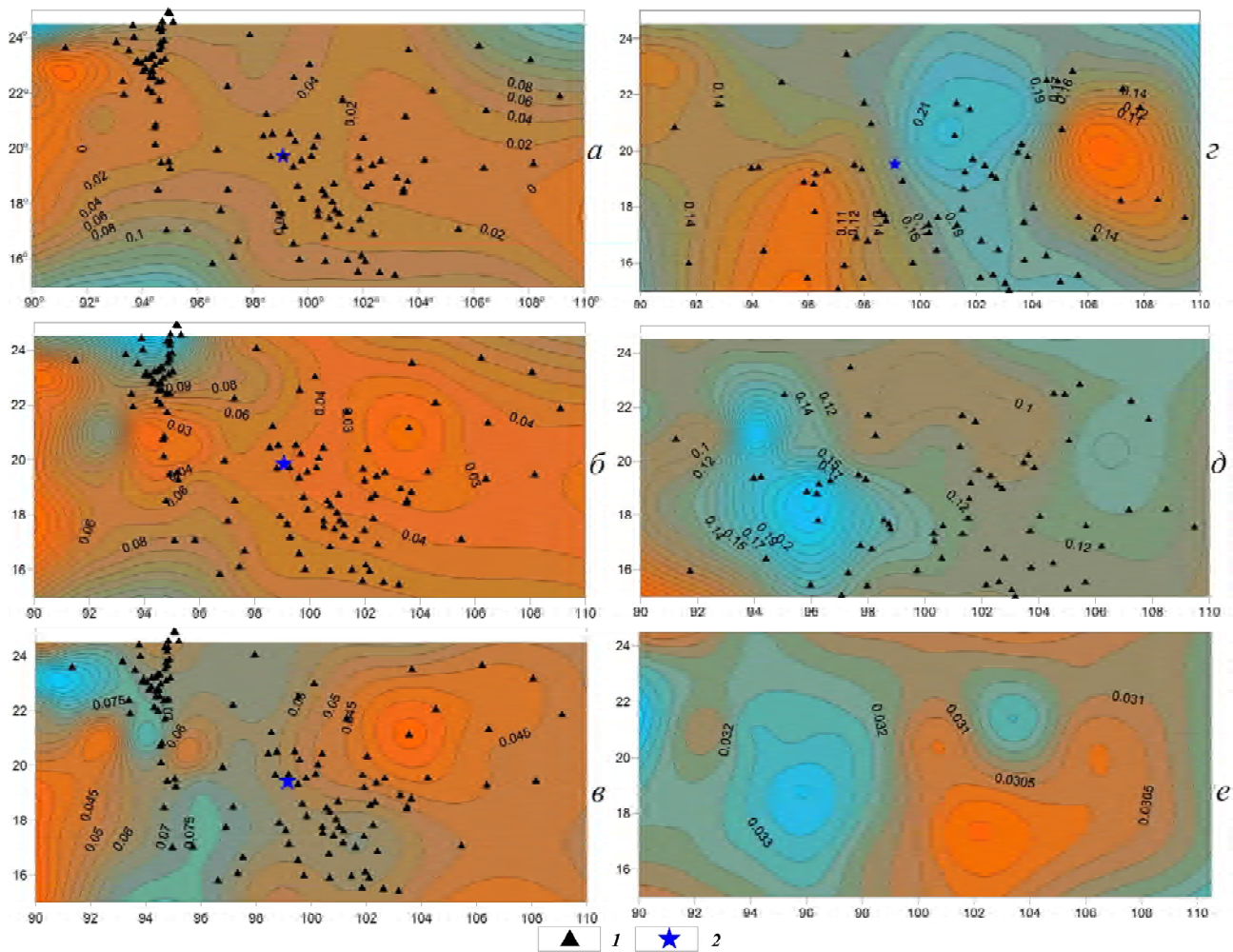


Рис. 4. Градиенты скоростей на глубинах 50 (а), 75 (б), 150 (в), 550 (г), 650 (д) и 1400 км (е): 1 – гипоцентры землетрясений на соответствующих глубинах; 2 – землетрясение, произошедшее в мае 2014 г. в Таиланде

Fig. 4. Velocity gradient at depths of 50 (a), 75 (б) 150 (в), 550 (г), 650 (д) and 1400 (e) km: 1 – earthquake hypocenters at the corresponding depths; 2 – earthquake, which occurred in May 2014 in Thailand

ную зону верхней мантии, со стороны Синобирмании под блоком Корат – с переходной зоны верхней мантии в среднюю;

- наблюдаются выпуклая поверхность кровли переходной зоны верхней мантии – Синобирмания (99° в. д.), Шан Тхай, Корат (97° в. д.).

Традиционно представление градиентной среды предполагается в долготных и широтных сечениях, рассмотренных выше. Поскольку решение получено как трехмерная функция скорости, было изучено поведение градиентов скоростей по глубине. Как следует из рис. 4, землетрясения привязаны к областям сгущения градиента скорости, а также к стыкам этих областей. На глубине 75 км градиент изменяется в пределах от $-0,1$ до $0,29 \text{ с}^{-1}$, в средней мантии (1400 км) вариации более слабые – от $0,0285$ до $0,0345 \text{ с}^{-1}$, на глубине 2400 км – $0,026$ до $0,039 \text{ с}^{-1}$. Максимальное изменение градиента скоростей приходится на переходную зону верхней мантии. По градиентам скоростей и распределению землетрясений можно выделить основные процессы, влияющие на сейс-

мическую активность. На глубинах 75–150 км одна часть землетрясений сконцентрирована в области сгущения градиентов и соответствует на поверхности границе между блоками Индо-Бирмания и Синобирмания. Здесь мантия испытывает влияние индентора (Индийской плиты). Другая часть землетрясений сконцентрирована в районе блока Корат (Таиланд) между зонами сгущения градиентов скоростей, и, вероятно, на сейсмическую активность влияют процессы дегазации, на что указывает скоростное строение мантии по данным сейсмической томографии (мантийные колонки).

При введении градиентов скорости появляется возможность получить сейсмические границы второго рода, что позволяет уточнить характеристику среды, представляемую в виде изолиний невязок скорости относительно референтной модели. В пределах верхней мантии выделены сейсмические границы, они четко проявляются под отдельными структурами и характеризуются высокими градиентами скорости на глубинах 100–125, 520–550, 650–660, 1700 км. Максимальные

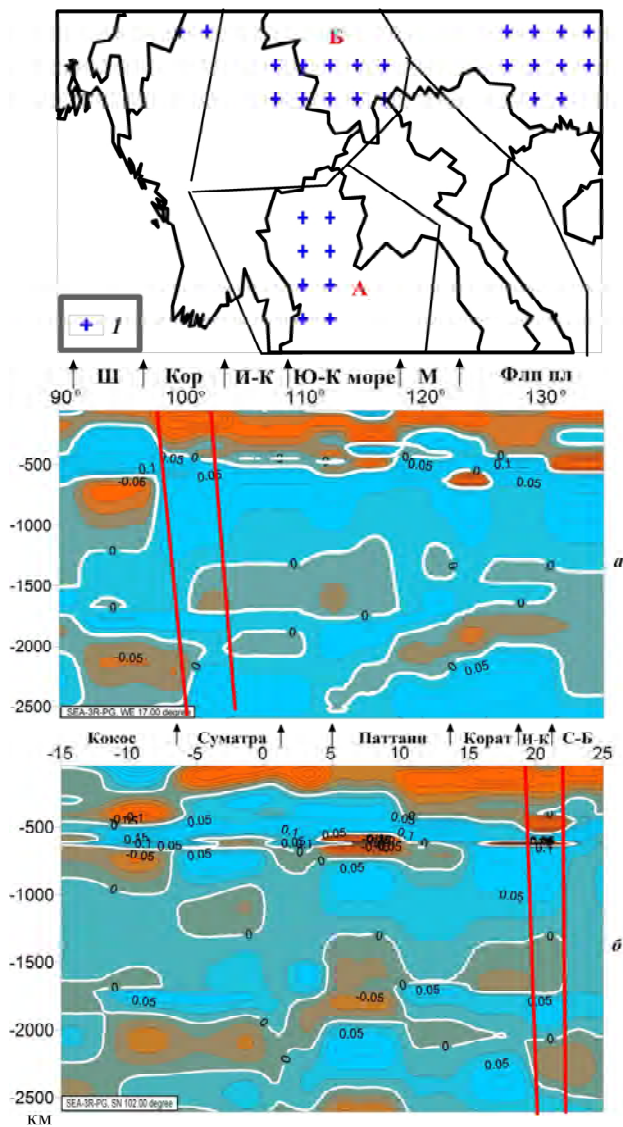


Рис. 5. Скоростные границы на глубине 75 км: 1 – сейсмические скоростные границы второго рода, выделенные на глубине 75 км и соответствующие флюидной колонке: а – под блоком Корат (широтное сечение 17° с. ш.); б – на границе между блоками Индокитай и Синобирмания (долготное сечение 102° в. д.). Структуры: И-К – Индокитай, С-Б – Синобирмания, Флп пл – Филиппинская плита, Ш – Шан Тхай

Fig. 5. Velocity border at the depth of 75 km: 1 – seismic velocity boundary of the second kind, selected at the depth of 75 km and the corresponding fluid column: a – under the block of Korat (latitudinal cross section 17° N); b – on the border between the blocks Indochina and Sinobirmaniya (longitudinal cross section 102° E). Structures: I-C – Indochina, S-B – Sinobirmaniya, Phil – Philippine plate, Sh – Shan Thai

градиенты скорости наблюдаются в переходной зоне верхней мантии между блоками Шан Тхай и Корат с максимальным значением $0,229 \text{ с}^{-1}$ на глубине 675 км. Для этой области отмечаются расслоенность переходной зоны верхней мантии (три границы) и отсутствие границ в интервале глубин 50–375 км.

Под блоком Корат, в районе $16\text{--}19^\circ \text{ с. ш} \times 99\text{--}100^\circ \text{ в. д.}$, наблюдается расслоенность как в верхней мантии (границы на глубине 75 и 125 км),

так и в переходной зоне верхней мантии (450, 550 и 600 км). Сейсмические границы второго рода подчеркивают мантийную колонку, выделенную по вертикальным сечениям (рис. 5, 6). Такая же картина просматривается под блоками Синобирмания и Южный Китай: Синобирмания – две сейсмические границы в расслоенной верхней мантии (75, 125 км) и три – в ее переходной зоне (400, 450, 550 км); Южный Китай – три границы (75, 150, 375 км) в верхней мантии, четыре – в ее переходной зоне (400, 450, 500, 600 км); в южной и северной частях блока – одна граница в переходной зоне верхней мантии.

Границы, соответствующие скоростным мантийным колонкам под блоками Корат, Синобирмания, выделяются и в нижней мантии. На поверхности они соответствуют разломным зонам. Для западной части блоков Шан Тхай и Индокитай (за исключением его северо-западной части) характерны одна сейсмическая граница второго рода в переходной зоне верхней мантии на глубине 550–572 км и максимальное значение градиента $-0,078 \text{ с}^{-1}$ для глубин 1725–1750 км, под границей между блоками Корат и Синобирмания – одна граница в переходной зоне верхней мантии на глубине 475–500 км.

По градиентам скоростей в мантии выделена (рис. 7) так называемая область прозрачности. В ней градиенты скоростей монотонно возрастают на глубинах 50–350 км и монотонно уменьшаются на глубинах 675–1125 км. Область прозрачности совпадает с кольцевой структурой сейсмичности (Таиланд). Согласно данным сейсмической томографии, в этой структуре по всей глубине мантии наблюдается чередование высоко- и низкоскоростных аномалий, что свидетельствует о наличии в ней флюидов. Согласно [3], внутри кольцевой структуры может происходить процесс миграции флюидов, создающий концентрацию напряжений.

Выводы. Под блоками, характеризующимися повышенной сейсмичностью, выделяются общие черты скоростного строения: выходы пониженных скоростей из нижней мантии (2600 км); проявление сверхглубинных флюидных процессов в виде субвертикальных областей последовательностей высоко- и низкоскоростных аномалий, они подчеркиваются сейсмическими границами второго рода по всей глубине мантии; распространение наклонных высокоскоростных слоев в верхней мантии; выпуклость поверхности кровли переходной зоны верхней мантии.

Как показывают данные, мантийные скоростные колонки присущи мантии рассматриваемых районов, характеризующихся повышенной сейсмичностью. В их пределах наблюдается повышенная расслоенность мантии, что подтверждается сейсмическими границами второго рода.

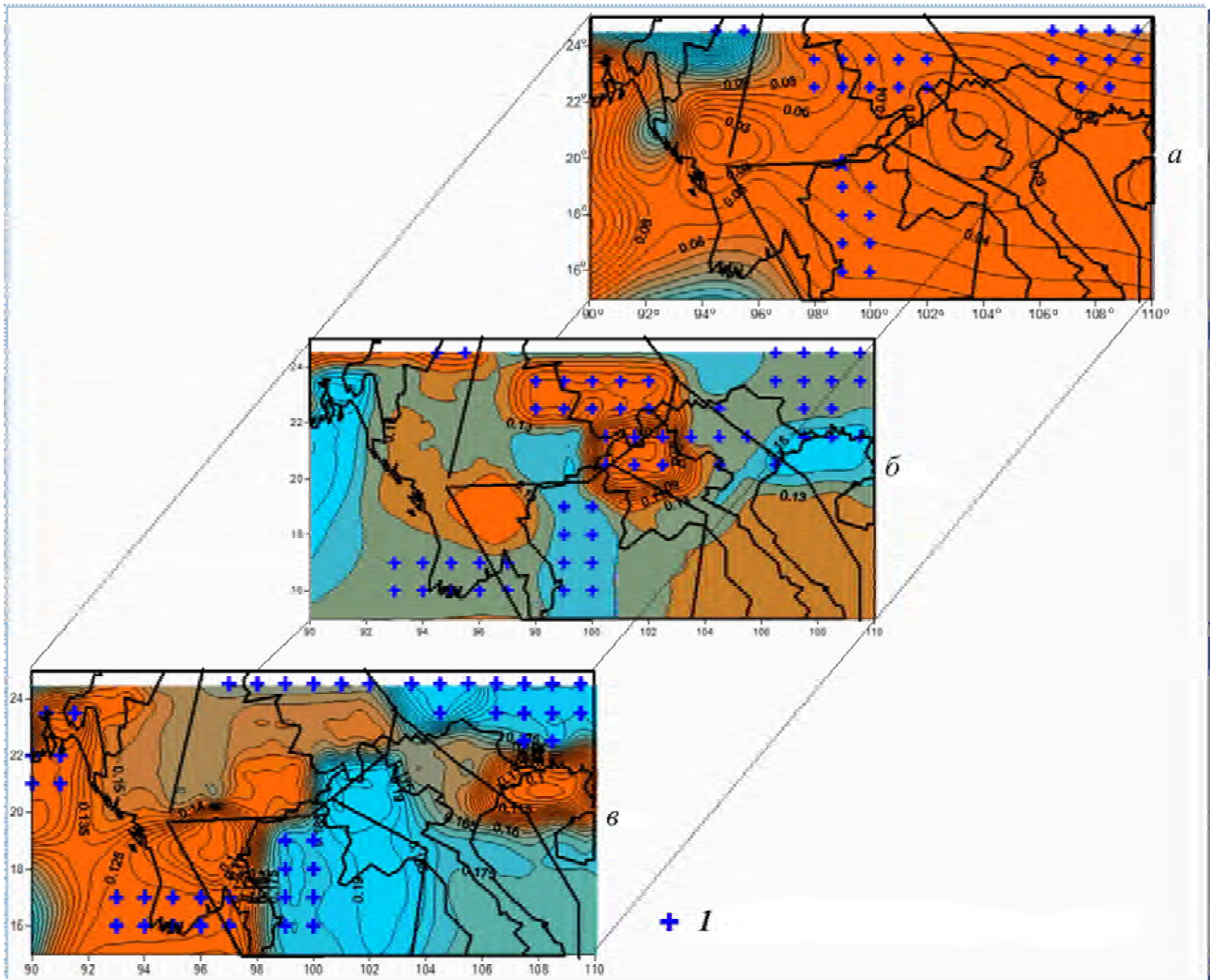


Рис. 6. Градиенты сейсмических скоростей и сейсмические границы на глубинах 75 (а), 450 (б) и 600 км (в): I – сейсмические границы второго рода

Fig. 6. Gradients seismic velocities and seismic boundaries at depths of 75 (a) and 450 (б) and 600 km (в): I – seismic boundaries second kind

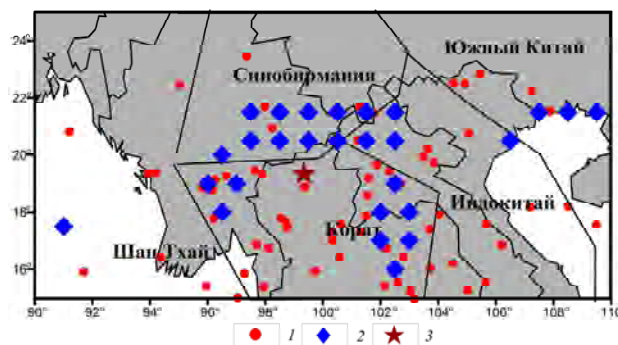


Рис. 7. Область прозрачности в мантии, выделенная по градиентам скоростей: 1 – землетрясения с магнитудой ≥ 4 на глубинах 300–600 км; 2 – область, в пределах которой на глубинах 75–375 км градиенты монотонно возрастают, а на глубинах 700–1500 км – уменьшаются; 3 – очаг землетрясения магнитудой 6,0, произошедшего 5 мая 2014 г. в Таиланде

Fig. 7. Area of transparency in the mantle, allocated by the velocity gradient: 1 – the earthquake with a magnitude of ≥ 4 at depths of 300–600 km; 2 – area within which at depths of 75–375 km gradients increase monotonically, and at depths of 700–1500 km – reduced; 3 – the earthquake of magnitude 6,0 that occurred on May 5, 2014 in Thailand city

Появление сейсмических границ, чередование зон с повышенными и пониженными значениями скоростей распространения продольных волн объясняются процессами дегазации, которые, в свою очередь, существенно влияют на формирование мегаструктур, контролирующих сейсмичность [2]. В сейсмичность региона свой вклад могут вносить напряжения в зоне встречных тепломассопотоков в мантии – погружающихся высокоскоростных и восходящих низкоскоростных слоев в западной части Юго-Восточной Азии. Процесс миграции флюидов имеет место и внутри выделенной по градиентам скоростей кольцевой структуры, что создает концентрацию напряжений и может быть одной из причин землетрясения, произошедшего весной 2014 г. в Таиланде.

1. Гейко В.С. Тейлорово приближение волнового уравнения и уравнения эйконала в обратных сейсмических задачах // Геофиз. журн. – 1997. – Т. 19, № 3. – С. 48–68.
2. Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. – М.: ЦНИИМаш, 2007. – 160 с.
3. Копничев Ю.Ф. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 6. – С. 34–51.
4. Cao Dinh Trieu. Seismic hazards in Vietnam / Science and technics. – Hanoi: Publ. House, 2010. – 182 p.
5. Fenton C.H., Charusiri P., Wood S.H. Recent paleoseismic investigations in Northern and Western Thailand // Annals of Geophysics. – 2003. – V. 46, № 5. – P. 957–981.
6. Hitong C. The study of active faults in Thailand // Report of EANHMP, an Approach to Natural Hazards in Eastern Asia / Ed. by Y. Shimazaki (Eastern Asia Natural Hazards Mapping Project (EANHMP) and Geological Survey of Japan). – 1997. – P. 17–22.
7. Packham G.H. Plate tectonics and the development of sedimentary basins of the dextral regime in Western Southeast Asia // J. Southeast Asian Earth Sci. – 1993. – V. 8. – P. 497–511.
8. Pailoplee S., Sugiyama Y., Charusiri P. Deterministic and probabilistic seismic hazard analyses in Thailand and adjacent areas using active fault data // Earth Planets Space. – 2009. – V. 61. – P. 1313–1325.
9. Pailoplee S., Channarong P., Chutakositkanon V. Earthquake activities in the Thailand-Laos-Myanmar border region: a statistical approach // Terr Atmos Ocean Sci. – 2013. – V. 24, № 4. – P. 721–730.
10. Metcalfe I. Comment on “An alternative plate tectonic model for the Palaeozoic-Early Mesozoic Palaeotethyan evolution of Southeast Asia (Northern Thailand – Burma)” by O.M. Ferrari, C. Hochard & G.M. Stampfli // Tectonophysics. – 2009. – V. 451. – P. 346–365.
11. Metcalfe I. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland // Gondwana Research. – 2011. – V. 19. – P. 3–21.

Поступила в редакцию 04.08.2015 г.

ЗВ'ЯЗОК ШВИДКІСНОЇ БУДОВИ МАНТІЇ ПІД ТАЇЛАНДОМ ТА ЙОГО ОТОЧЕННЯМ ІЗ СЕЙСМІЧНІСТЮ РЕГІОНУ

Л.М. Заець, І.В. Бугаєнко, Т.О. Цветкова

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32, Київ, 03680, Україна,
e-mail: larysa_zaiets@ukr.net, igor_bugaenko@ukr.net, tsvet@igph.kiev.ua

У результаті використання методу тейлорового наближення розв'язку задачі сейсмічної томографії часів приходу Р-хвиль, запропонованого В.С. Гейком, побудовано тривимірну Р-швидкісну модель мантиї Південно-Східної Азії. Розглянуто швидкісну будову мантиї під Таїландом та його оточенням з метою виявлення можливих передумов у її глибинній будові для прояву в регіоні землетрусів. Для зон, що характеризуються підвищеною сейсмічністю, виявлено загальні риси швидкісної будови мантиї: мантийні швидкісні колонки, що відповідають висхідним надглибинним флюїдним потокам; поширення низьких швидкостей з нижньої мантиї (2600 км), похилих високошвидкісних шарів у верхній та нижній мантиї. Крім традиційного зображення градієнтного середовища у довготних і широтних перетинах, вивчено поведінку градієнтів швидкостей за глибиною. За введеними градієнтами швидкостей отримано сейсмічні межі другого роду, що дало змогу уточнити характеристику середовища, яке має вигляд ізолій нев'язок швидкості відносно референтної моделі.

Ключові слова: мантия, швидкісна будова, землетруси, Таїланд.

INTERRELATION BETWEEN THE VELOCITY STRUCTURE OF THE MANTLE BENEATH THAILAND AND ITS SURROUNDINGS AND SEISMICITY OF THE REGION

L.N. Zaets, I.V. Bugaenko, T.A. Tsvetkova

Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, 32 Palladin Ave., Kyiv 03680, Ukraine,

e-mail: larysa_zaiets@ukr.net, igor_bugaenko@ukr.net, tsvet@igph.kiev.ua

Purpose. As part of the constructed three-dimensional P -velocity model of the mantle of Southeast Asia, we considered velocity structure of the mantle beneath Thailand and its environment in order to identify possible prerequisites in the deep structure of the mantle for the manifestation of earthquakes in the region.

Design/methodology/approach. 3-D P -velocity model of the mantle of Southeast Asia was obtained with the method of Taylor's approximation of solving the problem of seismic tomography of P -waves arrival time introduced by V.S. Geyko.

Findings. For areas beneath Thailand and its environment that are characterized by high seismicity, we identified commonalities of velocity structure of the mantle, such as:

- allocation of mantle-velocity columns. In velocity characteristics of the mantle, these zones appear as subvertical region sequences of high and low-velocity anomalies, which are the consequences of the fluid process in an inhomogeneous velocity environment (blocks Indobirmaniya, Shan Thai, Sinobirmaniya block, Kho Rat);
- propagation of low velocity of the lower mantle (2600 km);
- propagation of high-velocity inclined layers. From the Indobirmaniya block under the Shan Thai block the inclined layer is immersed in the transition zone of the upper mantle; from the Sinobirmaniya, under the Kho Rat block, the transition zone of the upper mantle is immersed in the middle mantle;
- bulge up of top of the upper mantle transition zone – Sinobirmaniya, Shan Thai, Kho Rat.

In addition to the traditional view of the gradient environment latitude and longitude sections, we considered the behavior of velocity gradients in depth.

Practical value/implications. The introduced velocity gradients permitted to receive seismic boundaries of the second kind, which allowed us to clarify characteristics of the environment represented as a contour residual velocity relative to the reference model. It was shown that the seismic boundary of the second kind stressed mantle column highlighted on the vertical cross sections. On the surface, the mantle-velocity column corresponds to fault zones (block Kho Rat (Thailand)).

Keywords: mantle, velocity structure, earthquake, Thailand.

References:

1. Geyko V.S. Teylorovo priblizhenie volnovogo uravneniya i uravneniya eykonala v obratnykh seysmicheskikh zadachakh. *Geophysical Journal*, 1997, vol. 19, no. 3, pp. 48-68 (in Russian).
2. Gufel'd I.L. Seysmicheskii protsess. Fiziko-khimicheskie aspekty. Moscow, TsNIIMash, 2007, 160 p. (in Russian).
3. Kopnichev Y.F., Sokolova I.N. On the correlation between seismicity characteristics and S-wave attenuation in the ring structures that appear before large earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2010, no. 16, pp. 1-18 (in Russian).
4. Cao Dinh Trieu. Seismic hazards in Vietnam. Science and technics, Hanoi, *Publishing House*, 2010, 182 p.
5. Fenton C.H., Charusiri P., Wood S.H. Recent paleoseismic investigations in Northern and Western Thailand. *Annals of Geophysics*, 2003, vol. 46, no. 5, pp. 957-981.
6. Hitong C. The study of active faults in Thailand. Report of EANHMP, an Approach to Natural Hazards in Eastern Asia, ed. by Y. Shimazaki (Eastern Asia Natural Hazards Mapping Project (EANHMP) and Geological Survey of Japan), 1997, pp. 17-22.
7. Packham G.H. Plate tectonics and the development of sedimentary basins of the dextral regime in Western Southeast Asia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1993, vol. 8, pp. 497-511.
8. Pailoplee S., Sugiyama Y., Charusiri P. Deterministic and probabilistic seismic hazard analyses in Thailand and adjacent areas using active fault data. *Earth Planets Space*, 2009, vol. 61, pp. 1313-1325.
9. Pailoplee S., Channarong P., Chutakositkanon V. Earthquake activities in the Thailand-Laos-Myanmar border region: a statistical approach. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2013, vol. 24, no. 4, pp. 721-730.
10. Metcalfe I. Comment on "An alternative plate tectonic model for the Palaeozoic-Early Mesozoic Palaeotethyan evolution of Southeast Asia (Northern Thailand-Burma)" by O.M. Ferrari, C. Hochard & G.M. Stampfli. *Tectonophysics*, 2009, vol. 451, pp. 346-365.
11. Metcalfe I. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland. *Gondwana Research*, 2011, vol. 19, pp. 3-21.

Received 04/08/2015