



СТРУКТУРА ЛИТОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ В РАЙОНЕ ИНДО-ЕВРАЗИЙСКОЙ КОЛЛИЗИИ ПО ДАННЫМ ПАССИВНОЙ СЕЙСМИКИ

Елена Александровна Мельник^{1,✉}, Марсель Алмазович Шайгарданов², Андрей Владимирович
Беляшов³

^{1,2,3}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

²ShaiygardanovMA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1617-8696>

³BelyashovAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8772-3863>

Аннотация. Представлена скоростная модель литосферы Центральной Азии в пределах Индо-Евразийской коллизионной структуры до глубины 410 км, полученная методом лучевого трассирования по данным Международного сейсмологического центра. Метод впервые применен для изучения складчатых областей Тянь-Шаня, Памира и Гималаев и позволяет выявлять аномалии среды по изменениям времен пробега сейсмических волн. Оптимизация модели методом направленного подбора обеспечила невязку времен пробега *P*-волн до 1 с.

Ключевые слова: Индо-Евразийская коллизия, сейсмический метод лучевого трассирования, скоростная модель, литосфера, мантия

Финансирование: работа была выполнена в рамках проекта Фонда научных исследований Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН FWZZ-2026-0050.

Для цитирования: Мельник Е.А., Шайгарданов М.А., Беляшов А.В. Структура литосферы Центральной Азии в районе Индо-Евразийской коллизии по данным пассивной сейсмики // Геофизические технологии. 2026. № 2. С. 12–24. doi:10.18303/2619-1563-2026-2-12.

LITHOSPHERIC STRUCTURE OF CENTRAL ASIA IN THE INDO-EURASIAN COLLISION ZONE INFERRED FROM PASSIVE SEISMIC DATA

Elena A. Melnik^{1,✉}, Marsel A. Shaiygardanov², Andrey V. Belyashov³

^{1,2,3}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

²ShaiygardanovMA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1617-8696>

³BelyashovAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8772-3863>

Abstract. A velocity model of the lithosphere of Central Asia within the Indo-Eurasian collision zone down to a depth of 410 km is presented. The model was obtained by radial ray tracing using data from the International Seismological Centre. This method was applied for the first time to study the folded regions of the Tien Shan, Pamir, and Himalayas and makes it possible to identify medium anomalies from variations in seismic-wave travel times. Optimization of the model using the directional matching method ensured *P*-wave travel-time residuals of less than 1 second.

Keywords: Indo-Eurasian collisions, seismic ray tracing method, velocity model, lithosphere, mantle

Funding: the study was carried out within the framework of the project No. FWZZ-2026-0050.

For citation: Melnik E.A., Shaiygardanov M.A., Belyashov A.V. Lithospheric structure of Central Asia in the Indo-Eurasian collision zone inferred from passive seismic data // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2026. No. 2. P. 12–24. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2026-2-12.

ВВЕДЕНИЕ

Индо-Евразийская коллизийная структура входит в состав Гималайско-Альпийской горной системы, протягивающейся от Средиземного моря на западе до Суматрской дуги на востоке на расстояние от 7000 км [Yin, Harrison, 2000] до 10 000 км [Khain, 1996] и включающей порядка 20-ти отдельных горных сооружений, имеющих форму складок. Схематическое положение основных орогенов в пределах Индо-Евразийской коллизии и профиля показано на рис. 1.

Геодинамические процессы в ее пределах повлияли на формирование горных систем Центральной Азии вплоть до Сибирской платформы [Dobretsov et al., 1996; Буслов, 2012]. Современные тектонические процессы в этой области воздействуют на напряженно-деформированное состояние даже таких удаленных систем, как Байкальская рифтовая зона [Ружич и др., 2016]. В связи с этим изучение строения этого геологического объекта важно для более глубокого понимания и оценки сейсмического режима обширной территории.

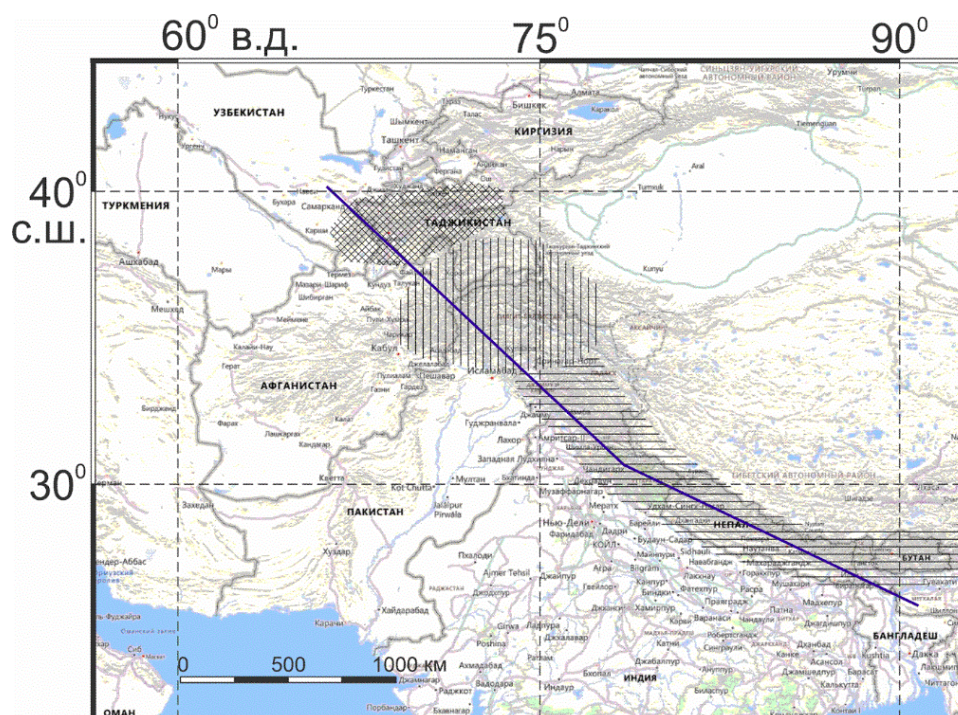


Рис. 1. Положение Южно-Тянь-Шанского (перекрестная штриховка), Памирского (вертикальная штриховка) и Гималайского (горизонтальная штриховка) орогенов в пределах Индо-Евразийской коллизийной структуры. Синей линией показано условное положение профиля.

Указанная коллизийная структура представляет давний интерес для исследователей всего мира и широко изучена с использованием различных методов, включая сейсмические. К настоящему времени основные данные о строении земной коры и верхов мантии Индо-Евразийской коллизийной структуры получены методами глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ), методом обменных волн

землетрясений (МОВЗ) [Priestley et al., 2008; Oreshin et al., 2008; Kumar et al., 2013; Gilligan et al., 2015], сейсмотомографией [Zhou, Murphy, 2005; Koulakov, Sobolev, 2006; Zhang et al., 2012; Sippl et al., 2013] и магнитотеллурического зондирования (МТЗ) [Беляевский и др., 1982; Земная кора..., 1984; Miglani et al., 2014; Rawat et al., 2014; Jain et al., 2016; Aminov et al., 2020; Medved et al., 2022].

По данным ГСЗ [Беляевский и др., 1982; Земная кора..., 1984] было установлено, что важной особенностью глубинного строения Памиро-Гималайского региона является мощность земной коры, почти в два раза большая, чем на платформах (65–75 и 35–37 км соответственно). Перепад скоростей между земной корой и верхней мантией составляет 0.7–1.0 км/с, что позволяет достаточно уверенно ее выделять.

По данным МОВЗ фиксируются меньшие глубины залегания границы Мохо (38–52 км) и акцентируется расслоенность верхней коры, при этом глубокие границы выявляются хуже.

Важную роль в современных исследованиях играет сейсмическая томография [Кулаков и др., 2003; Aminov et al., 2020; Medved et al., 2022]. Полученные скоростные аномалии демонстрируют сложную вертикальную стратификацию. В пределах первых километров глубины выделяются высокоскоростные аномалии, охватывающие весь Памир и Южный Тянь-Шань. На 20-километровом уровне наблюдается чередование линейных высокоскоростных и низкоскоростных аномалий, пространственно совпадающих с расположением известных гнейсовых куполов. В интервале 60–120 км прослеживается вытянутая низкоскоростная аномалия северо-запад–юго-восточного простирания, имеющая тесную связь с Памирской сейсмической зоной. Низкоскоростные мантийные аномалии могут свидетельствовать о наличии флюидных фаз или участков частичного плавления, что имеет важное значение для понимания геодинамических процессов в этом коллизионном регионе.

Сейсмотомографические исследования [Medved et al., 2022] на северо-западе Гималаев выявили, что Гималайский орогенный пояс проявляется как низкоскоростная аномалия, соответствующая коре мощностью около 40 км, с погружением Индийской плиты на глубину свыше 60 км под Гималаями. Анализ структуры Индийской плиты установил ее погружение на север под Гималаями в зоне континентальной субдукции [Molnar, Tappinier, 1975; Буслов, 2012; Добрецов и др., 2013; Medved et al., 2022; Абрамова, Абрамова, 2023] и впервые выявил западный наклон при приближении к Гиндукушу.

Среди исследований МТЗ особый интерес представляют работы, выполненные в северо-западных Гималаях [Miglani et al., 2014; Jain et al., 2016]. Полученные данные свидетельствуют о сложной слоистой структуре коры с чередованием проводящих/резистивных зон, ключевой роли флюидонасыщенных зон в сейсмичности и геодинамике, а также региональные различия в геометрии субдукции.

Сравнительная характеристика методов исследования показывает, что ГСЗ позволяет изучать структуру литосферы до глубин около 80 км, однако характеризуется низкой детализацией верхней коры. МОВЗ позволяет исследовать разрез до глубин около 70 км и лучше отражает расслоенность верхней коры, но слабо выявляет глубокие границы. Сейсмотомография, обеспечивающая изучение структуры до глубин около 120 км, выявляет анизотропию и скоростные аномалии, однако требует плотной сети станций. МТЗ эффективен для изучения флюидонасыщенных зон до глубин более 60 км, но чувствителен к помехам.

В настоящей статье рассматривается построение единой структурно-скоростной модели Индо-Евразийской коллизионной структуры на основе применения метода лучевого трассирования [Zelt, Smith, 1992] для изучения скоростных характеристик литосферы вдоль условного сейсмического профиля протяженностью около 3000 км по данным о временах пробега продольных волн (см. рис. 1). В качестве

источников сейсмических колебаний использовались региональные землетрясения, параметры которых представлены в базе данных Международного сейсмологического центра (ISC; <http://www.isc.ac.uk>).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным критерием при определении положения условного регионального профиля являлся уровень его обеспеченности наблюдаемыми данными. С помощью функции интерактивного поиска сейсмических станций на веб-странице МСЦ (<http://www.isc.ac.uk/registries/search/interactive/>) проведена оценка плотности их размещения на изучаемой территории – в створе предполагаемого залегания профиля задавалась полоса шириной 300 км и подгружался список станций, расположенных в ее границах. Профиль проложен через участки их максимального сосредоточения. Таким образом, позиционно профиль начинается в южно-центральной части Республики Узбекистан и, имея юго-восточное направление, проходит через Южный Тянь-Шань, Памир и по южному предгорью Гималаев (см. рис. 1). Общая длина профиля 3000 км.

В качестве источников сейсмических волн использованы землетрясения из бюллетеней МСЦ, укладываемые в створ выбранного профиля (± 50 км), равномерно распределенные вдоль него и зарегистрированные как можно большим числом стационарных сейсмических станций. Подбор событий осуществлялся интерактивным способом на сайте МСЦ (<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>). Начиная с северо-западного конца профиля задавалось непрерывно скользящее окно размером $0.5 \times 0.5^\circ$, в пределах которого в базе данных МСЦ производился поиск событий во временном интервале от 1970 по 2018 гг. После отбраковки непредставительных землетрясений и объединения близко расположенных источников в дальнейшую обработку поступило 21 событие (с шагом 50–250 км вдоль профиля).

Для увязки наблюдаемых годографов по взаимным временам все источники сейсмических событий, расположенные на различных глубинах, были приведены к дневной поверхности, то есть к «нулевой» глубине. Поскольку локализация использованных сейсмических событий в решении МСЦ основывалась на модели ak135 [Kennett et al., 1995; Bondár, Storchak, 2011], поправки за глубину источника рассчитывались по таблицам времен пробега сейсмических волн для данной модели [Kennett, 2005]. Увязка наблюдаемых годографов по взаимным временам выполнялась последовательно для всех годографов от начала к концу профиля в соответствии с принципом взаимности, а корректировка невзаимных времен проводилась на основе принципа подобия нагоняющих годографов.

На рисунке 2 представлена увязанная система годографов продольных волн (P) в первых вступлениях в редуцированном масштабе времен (скорость редукции – 8.7 км/с). Для расчета с непосредственным учетом сферичности расстояния по профилю L пересчитывались в расстояния X , где X – длина хорды большого круга Земли с длиной дуги, соответствующей длине профиля, в данном случае 3000 км.

В первых вступлениях в зависимости от расстояния источник–приемник выделяются фазы волны P_g , распространяющейся в земной коре с кажущейся скоростью до 6.5 км/с, преломленной на поверхности Мохо, и проникающей в верхи мантии волны P_n с кажущейся скоростью 8.0–8.3 км/с, которую на удалениях свыше 1500 км сменяет волна P_{n1} с кажущейся скоростью 8.6–8.7 км/с. В первых вступлениях на расстояниях от источника свыше 2200 км регистрируются колебания со скачком увеличивающейся скорости почти до 9.5 км/с, что соответствует волне P_{410} , проникающей в переходный слой.

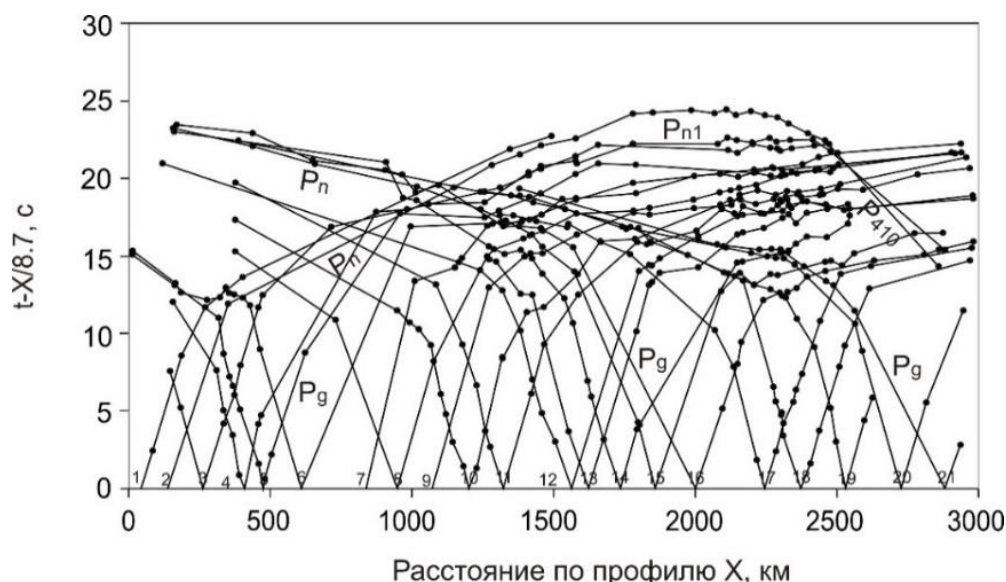


Рис. 2. Годографы P -волн в первых вступлениях в редуцированном масштабе времен. 1–21 – номера событий.

Сложная форма годографов при общей непараллельности связана с изменениями скорости по глубине и латерали. В региональном плане особенно отчетливо это показано для волны P_n , где кажущаяся скорость увеличивается от 8.0 (в районе Южного Тянь-Шаня и Памира) до 8.2 км/с в районе Гималаев и до 8.3 км/с при выходе на Индийскую платформу. При этом повышенные значения кажущейся скорости до 8.5–8.6 км/с наблюдаются только на одном участке профиля 1700–2200 км. На аналогичных удалениях от источников, около 1500 км, в начальной части профиля участок повышенной скорости не отмечается, что может свидетельствовать об увеличении глубины залегания высокоскоростного слоя под Южным Тянь-Шанем и Памиром либо о его отсутствии. Интенсивная волна с кажущейся скоростью около 9.4 км/с регистрируется на расстоянии источник–приемник более 2000 км и интерпретируется как преломленно-рефрагированная на кровле переходной зоны при глубине около 410 км.

Эти характеристики учитываются при моделировании параметров верхней мантии методом лучевого трассирования с использованием программы SeisWide, адаптированной для среды Windows (Dr. Deping Chian). В программе применяется алгоритм лучевого трассирования [Zelt, Smith, 1992].

Исходными параметрами модели являются конфигурация слоев и скорость, задаваемая на кровле и подошве каждого слоя. Итерационный процесс моделирования заключается в последовательном решении прямой и обратной задачи с целью минимизации временных невязок между наблюдаемыми и рассчитанными годографами. Подбор модели производится сверху вниз отдельно для каждого годографа. Подобранной считается модель, обеспечивающая минимальные временные невязки для всех годографов на профиле.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПО ДАННЫМ ПАССИВНОЙ СЕЙСМИКИ

Моделирование свойств волнового поля проиллюстрировано на некоторых примерах, имеющих принципиальное значение для выделяемых особенностей сейсмического разреза. На рисунке 3 показан район сочленения Индо-Евразийской коллизии и Индийской платформы.

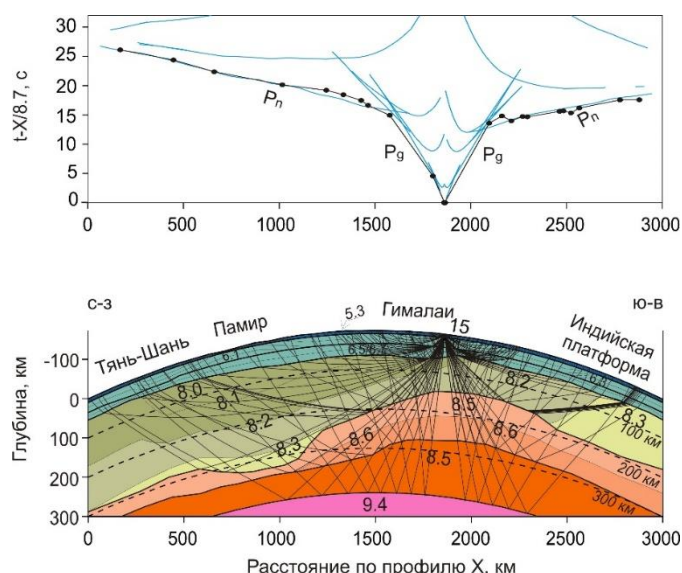


Рис. 3. Соотношение наблюдаемых (черные линии с точками) и рассчитанных (синие линии) годографов для события 15 и лучевые схемы в зоне сочленения Индо-Евразийской коллизии и Индийской платформой. Границы со скачками скорости показаны толстыми линиями, тонкие соответствуют значениям скорости в км/с.

В выбранном редуцированном масштабе времен видно хорошее соответствие наблюдаемых и рассчитанных времен пробега для волн P_g , P_n на всех интервалах их прослеживания с достаточно малыми невязками в среднем до 0.6 с, что соотносится с видимым периодом колебаний. Лучевая схема иллюстрирует соотношение между годографами и областями распространения волн в разрезе при равномерной плотности лучей в верхнем слое мантии, соответствующей непрерывности наблюдаемых годографов. Достаточно уверенно по пониженным значениям кажущейся скорости 6.3–6.5 км/с выделяются времена вступлений волн, распространяющихся в земной коре (P_g). Скачкообразное увеличение кажущейся скорости до 8.0–8.1 км/с определяет выход в первые вступления волны, преломленной на Мохо (P_n). Для этого участка характерна несимметричность ветвей годографов прямого и обратного направления и увеличение времен пробега волн в первых вступлениях в западной части профиля. Видно, что вблизи источника для обеих ветвей годографов кажущаяся скорость равна 5.0–6.3 км/с. На удалениях от источника свыше 200 км для волн, распространяющихся в пределах Гималаев, можно видеть значительно более поздний выход в первые вступления волны от Мохо с кажущейся скоростью 8.1 км/с, в отличие от волн, распространяющихся в пределах Индийской платформы, где скорость в верхах мантии увеличена до 8.3 км/с. По результатам моделирования в сейсмическом разрезе это проявляется в виде постепенного нарастания скорости с северо-запада на юго-восток от 8.0–8.1 км/с под Южным Тянь-Шанем и Памиром до 8.3 км/с под Индийской платформой. Кроме того, поздний выход волны P_n в первые вступления в районе Гималаев связан со значительным увеличением мощности земной коры до 75 км.

Наиболее полно изменение времен пробега волн представлены для события 3, расположенного в районе Южного Тянь-Шаня (рис. 4). На годографе хорошо видна смена сейсмических волн на различных глубинах верхней мантии. Область распространения волн, приходящих из земной коры (P_g), на удалении порядка 200–225 км сменяется волной, распространяющейся в верхах мантии (P_n). На удалениях порядка 1500 км ее сменяет волна с повышенной кажущейся скоростью 8.6–8.7 км/с (P_{n1}), а уже на удалениях свыше 2200 км в первые вступления выходит волна с кажущейся скоростью 9.4–9.5 км/с от границы «410 км» (P_{410}).

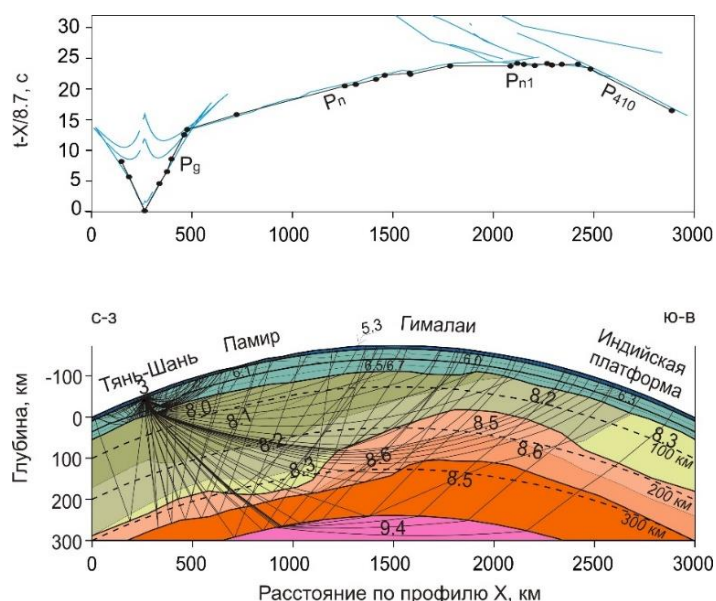


Рис. 4. Соотношение наблюдаемых (черные линии с точками) и рассчитанных (синие линии) годографов для события 3 и лучевые схемы в Тянь-Шанском, Памирском и Гималайском районах Индо-Евразийской коллизии.

Особенность годографов от событий 1–6 (см. рис. 2) заключается в том, что на них наиболее ярко выделяется волна с кажущейся скоростью 8.5–8.6 км/с, которая по результатам лучевого моделирования при учете сферичности Земли относится к высокоскоростному слою в основании литосферы, подстилаемому слоем со средней скоростью около 8.5 км/с и подошвой на глубине 410 км. Сведения о глубине границы «410 км» и скорости в покрывающей толще получены по короткому отрезку годографов преломленной волны P_{410} .

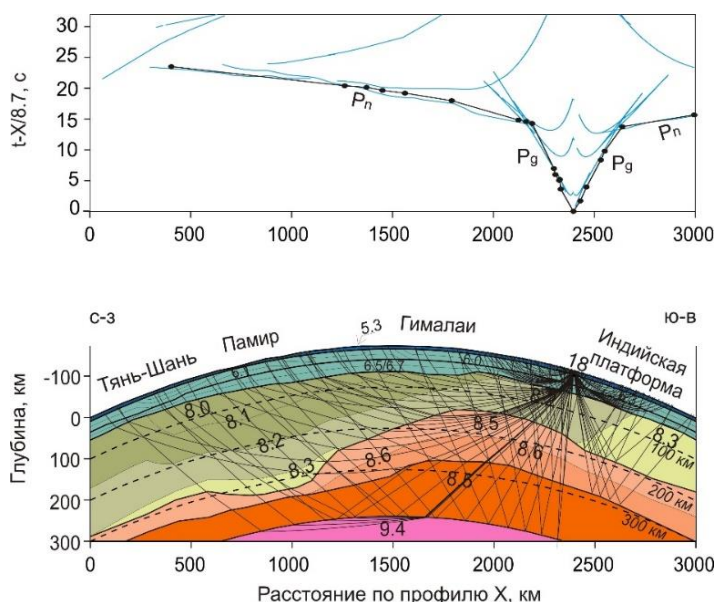


Рис. 5. Соотношение наблюдаемых (черные линии с точками) и рассчитанных (синие линии) годографов для события 18 и лучевые схемы в Тянь-Шанском, Памирском и Гималайском районах Индо-Евразийской коллизии.

На рисунке 5 показаны годографы и лучевая схема для события 18, произошедшем в зоне перехода к Индийской платформе. В отличие от годографа для события 3 видно, что на удалениях свыше 1500 км от источника кажущаяся скорость не превышает 8.3 км/с. Результаты лучевого моделирования

указывают на то, что, по всей видимости, глубина залегания кровли высокоскоростного слоя и его мощность непостоянны, и в районе Памира он отсутствует или значительно утоняется.

Рисунок 6 иллюстрирует соответствие наблюдаемых и рассчитанных времен пробега с лучевыми траекториями на схематически представленном скоростном разрезе. Отмечается практически равномерное покрытие лучами изучаемой среды. Абсолютные невязки между наблюдаемыми и теоретическими временами пробега не превышают в отдельных случаях 1 с при среднеквадратическом значении 0.6–0.8 с, соответствующем видимому периоду колебаний.

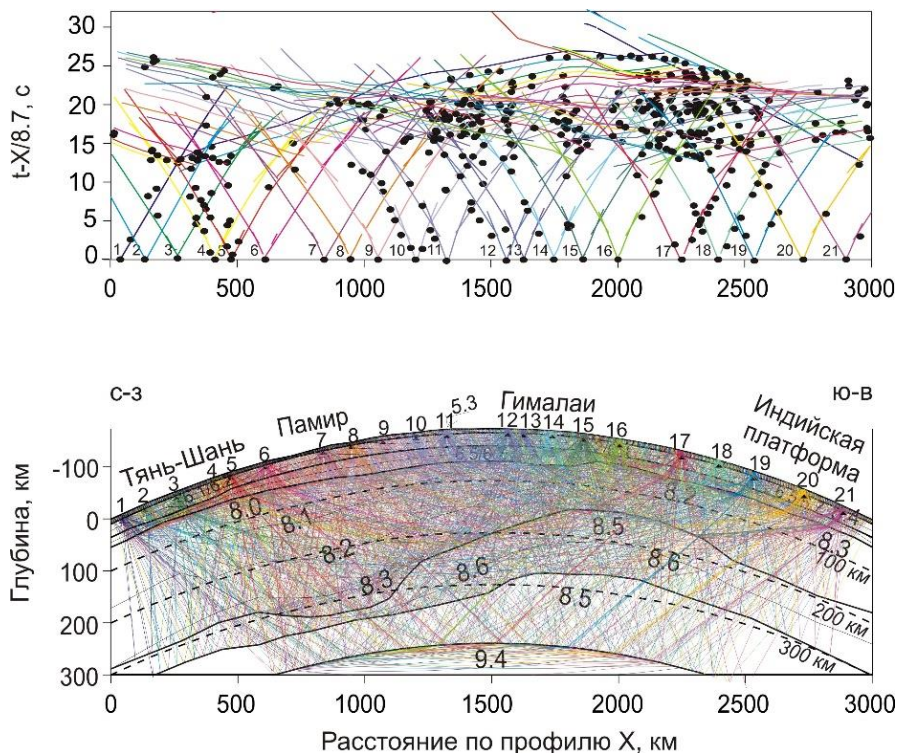


Рис. 6. Годографы наблюдаемых (черные точки) и рассчитанных (цветные линии) времен пробега продольных волн (вверху) и траектории рассчитанных лучей (внизу) для скоростной модели по профилю в Тянь-Шанском, Памирском и Гималайском районах Индо-Евразийской коллизии.

Модель земной коры и верхней мантии (до глубины 410 км) Индо-Евразийской коллизии, полученная методом лучевого трассирования преломленно-рефрагированных продольных волн, показана на рис. 7.

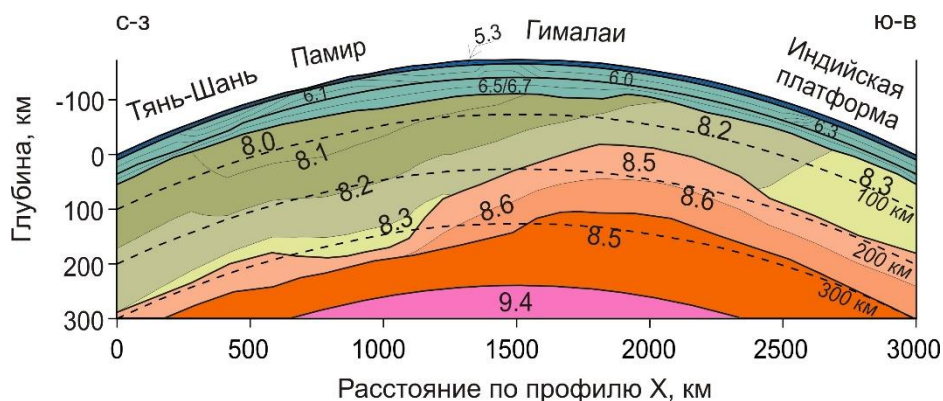


Рис. 7. Структура верхней мантии по профилю в районе Индо-Евразийской коллизии. Тонкими линиями показаны изолинии скорости в км/с, толстыми – сейсмические границы.

Главной особенностью данной модели является представление верхней мантии в виде двух структурных этажей: наиболее неоднородного по латерали, двухслойного верхнего с подошвой на глубине более 300 км и подстилающего, практически однородного (астеносферного) нижнего до границы «410 км».

Латерально блоковая неоднородность первого структурного этажа мантии характеризуется скоростью на Мохо, изменяющейся в интервале 8.0–8.4 км/с, при различных ее увеличениях с глубиной. Так, повышенная скорость до 8.3 км/с характерна для верхов мантии Индийской платформы, тогда как под горными структурами Памира и Южного Тянь-Шаня она составляет 8.0–8.1 км/с, повышаясь до 8.2 км/с в районе Гималаев. В основании литосферы выделен слой с повышенной до 8.6 км/с скоростью, мощность которого изменяется от 30–50 км под Памиром до 150 км под Гималаями. Второй структурный этаж, в интервале между подошвой литосферы и границей «410 км» с относительно пониженной до 8.5 км/с скоростью, характеризует астеносферу, подстилаемую кровлей переходного слоя «410 км», где скорость скачком увеличивается до 9.4 км/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на данных о временах пробега региональных землетрясений, полученных из бюллетеней Международного сейсмологического центра (<http://www.isc.ac.uk>), с использованием метода прямого лучевого трассирования времен пробега волн в первых вступлениях построена латерально-неоднородная структурно-скоростная модель земной коры и верхней мантии в районе Индо-Евразийской коллизионной структуры вдоль условного профиля длиной 3000 км.

В сравнении с Индийской платформой верхи мантии коллизионной структуры характеризуются пониженной до 8.0–8.1 км/с скоростью. Отличительной особенностью верхней мантии является контрастное изменение мощности слоя с повышенной скоростью в низах литосферы от значительного утонения в районе Памира до 100 км в районе Гималаев.

Под слоем повышенной скорости до границы «410 км» данные о свойствах мантии немногочисленны и можно предполагать, что в этом интервале, содержащем в себе астеносферный слой, латеральные неоднородности могут быть незначительными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М.** Литосферные магнитные аномалии по данным спутниковой миссии CHAMP над западным гималайским синтаксисом и окружающими территориями // Исследование Земли из космоса. 2023. № 5. С. 45–57. doi:10.31857/S0205961423050020. EDN:XGGMCMN.
- Беляевский Н.А., Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С., Кайла К.Л., Марусси А., Таль-Вирский Б.Б., Хамрабаев И.Х.** Памир–Гималаи. Глубинное строение земной коры. М.: Наука, 1982. 176 с.
- Буслов М.М.** Геодинамическая природа Байкальской рифтовой зоны и ее осадочного выполнения в мелкайнозойское время: эффект дальнего воздействия Монголо-Охотской и Индо-Евразийской коллизий // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 9. С. 1245–1255. EDN:NPMGNH.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П.** Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 4. С. 469–499. EDN:PZLRDD.
- Земная кора и верхняя мантия Памира, Гималаев и южного Тянь-Шаня** / Под ред. И.Х. Хемраева, Ф.Х. Зуннунова. М.: Наука, 1984. 160 с.

- Кулаков И.Ю., Тычков С.А., Бушенкова Н.А., Василевский А.Н.** Структура и динамика верхней мантии Альпийско-Гималайского складчатого пояса по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 6. С. 566–586. EDN:MJCYBM.
- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Левина Е.А.** Оценка геодинамического влияния зон коллизии и субдукции на сейсмотектонический режим Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 3. С. 383–406. doi:10.5800/GT-2016-7-3-0214. EDN:UJVNCC.
- Aminov J., Koulakov I., Jakovlev A.V., Zhao J., El-Khery S., Aminov J., Al Arifi N., Aminov J., Mamadjanov Y.** Directions of lithosphere interactions in the Pamir–Hindu Kush junction inferred from anisotropic tomography // Canadian Journal of Earth Sciences. 2020. Vol. 57 (5). P. 601–616. doi:10.1139/cjes-2019-0081.
- Bondár I., Storchak D.** Improved location procedures at the International Seismological Centre // Geophysical Journal International. 2011. Vol. 186 (3). P. 1220–1244. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D.** Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plume // International Geology Review. 1996. Vol. 38 (5). P. 430–466. doi:10.1080/00206819709465345. EDN:LDSWEB.
- Gilligan A., Priestley K., Roecker S., Levin V., Rai S.** The crustal structure of the western Himalayas and Tibet // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. Vol. 120 (5). P. 3946–3964. doi:10.1002/2015JB011891.
- Jain A.K., Dasgupta S., Bhargava O.N., Israil Md., Jayangonda Perumal R., Patel R.C., Mukul M., Parcha S.K., Adlakha V., Agarwal K.K., Singh P., Bhattacharyya K., Pant N.C., Banerjee D.M.** Tectonics and evolution of the Himalaya // Proceedings of the Indian National Science Academy. 2016. Vol. 82 (3). P. 581–604. doi:10.16943/ptinsa/2016/48469.
- Kennett B.** Seismological tables: ak135. Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra, 2005. P. 81.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R.** Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophysical Journal International. 1995. Vol. 122 (1). P. 108–124. doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x.
- Khain V.E.** Structure and evolution of nappe-fold edifices of the Alpine-Himalayan Belt: A comparison // International Geology Review. 1996. Vol. 38 (4). P. 374–387. doi:10.1080/00206819709465341. EDN:LDPNYD.
- Koulakov I., Sobolev S.V.** A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir–Hindukush region // Geophysical Journal International. 2006. Vol. 164 (2). P. 425–440. doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02841.x.
- Kumar P., Ravi Kumar M., Srijayanthi G., Arora K., Srinagesh D., Chadha R.K., Sen M.K.** Imaging the lithosphere-asthenosphere boundary of the Indian plate using converted wave techniques // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. Vol. 118 (10). P. 5307–5319. doi:10.1002/jgrb.50366.
- Medved I., Koulakov I., Mukhopadhyay S., Jakovlev A.** Lithosphere structure in the collision zone of the NW Himalayas revealed by alocal earthquake tomography // Journal of Geodynamics. 2022. Vol. 152. P. 101922. doi:10.1016/j.jog.2022.101922.
- Miglani R., Shahrukh M., Israil M., Gupta P.K., Varshney S.K., Sokolova E.** Geoelectric structure estimated from magnetotelluric data from Uttarakhand Himalaya, India // Journal of Earth System Science. 2014. Vol. 123 (8). P. 1907–1918. doi:10.1007/s12040-014-0504-2.
- Molnar P., Tapponnier P.** Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // Science. 1975. Vol. 189. P. 419–426. doi:10.1126/science.189.4201.419.

- Oreshin S., Kiselev S., Vinnik L., Prakasam K., Rai S., Makeyeva L., Savvin Ye.** Crust and mantle beneath western Himalaya, Ladakh and western Tibet from integrated seismic data // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. Vol. 271. P. 75–87. doi:10.1016/j.epsl.2008.03.048.
- Priestley K., Jackson J., McKenzie D.** Lithospheric structure and deep earthquakes beneath India, the Himalaya and southern Tibet // *Geophysical Journal International*. 2008. Vol. 172 (1). P. 345–362. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03636.x.
- Rawat G., Arora B.R., Gupta P.K.** Electrical resistivity cross-section across the Garhwal Himalaya: Proxy to fluid-seismicity linkage // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 637. P. 68–79. doi:10.1016/j.tecto.2014.09.015.
- Sippl C., Schurr B., Tympel J., Angiboust S., Mechie J., Yuan X., Schneider F.M., Sobolev S.V., Ratschbacher L., Haberland C., TIPAGE-Team.** Deep burial of Asian continental crust beneath the Pamir imaged with local earthquake tomography // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 384. P. 165–177. doi:10.1016/j.epsl.2013.10.013.
- Yin A., Harrison T.** Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2000. Vol. 28. P. 211–280. doi:10.1146/annurev.earth.28.1.211.
- Zelt C.A., Smith R.B.** Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure // *Geophysical Journal International*. 1992. Vol. 108 (1). P. 16–34. doi:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00836.x.
- Zhang H., Zhao J., Xu Q.** Crustal and upper mantle velocity structure beneath central Tibet by *P*-wave teleseismic tomography // *Geophysical Journal International*. 2012. Vol. 190 (3). P. 1325–1334. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05582.x.
- Zhou H., Murphy M.** Tomographic evidence for wholesale underthrusting of India beneath the entire Tibetan plateau // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2005. Vol. 25 (3). P. 445–457. doi:10.1016/j.jseas.2004.04.007.

REFERENCES

- Abramova D.Yu., Abramova L.M.** Lithospheric magnetic anomalies according to the CHAMP satellite data over the Western Himalayan Syntaxis and surrounding areas // *Earth Research from Space*. 2023. No. 5. P. 45–57. (In Russ.). doi:10.31857/S0205961423050020.
- Aminov J., Koulakov I., Jakovlev A.V., Zhao J., El-Khery S., Aminov J., Al Arifi N., Aminov J., Mamadjanov Y.** Directions of lithosphere interactions in the Pamir–Hindu Kush junction inferred from anisotropic tomography // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2020. Vol. 57 (5). P. 601–616. doi:10.1139/cjes-2019-0081.
- Belyaevsky N.A., Volvovsky B.S., Volvovsky I.S., Kayla K.L., Marussi A., Tal-Virsky B.B., Khamrabaev I.Kh.** The Pamirs–Himalayas. Deep structure of the Earth's crust (In Russ.). Nauka, Moscow, 1982. 160 p.
- Bondár I., Storchak D.** Improved location procedures at the International Seismological Centre // *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 186 (3). P. 1220–1244. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x.
- Buslov M.M.** Geodynamic nature of the Baikal Rift Zone and its sedimentary fill in the Cretaceous–Cenozoic: the effect of the far-field impact of the Mongol–Okhotsk and Indo–Eurasian collisions // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. Vol. 53 (9). P. 955–962. doi:10.1016/j.rgg.2012.07.010.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D.** Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plume // *International Geology Review*. 1996. Vol. 38 (5). P. 430–466. doi:10.1080/00206819709465345. EDN:LDSWEB.
- Dobretsov N.L., Koulakov I.Yu., Polyansky O.P.** Geodynamics and stress-strain patterns in different tectonic settings // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. Vol. 54 (4). P. 357–380. doi:10.1016/j.rgg.2013.03.001.

- Gilligan A., Priestley K., Roecker S., Levin V., Rai S.** The crustal structure of the western Himalayas and Tibet // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2015. Vol. 120 (5). P. 3946–3964. doi:10.1002/2015JB011891.
- Jain A.K., Dasgupta S., Bhargava O.N., Israil Md., Jayangonda Perumal R., Patel R.C., Mukul M., Parcha S.K., Adlakha V., Agarwal K.K., Singh P., Bhattacharyya K., Pant N.C., Banerjee D.M.** Tectonics and evolution of the Himalaya // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2016. Vol. 82 (3). P. 581–604. doi:10.16943/ptinsa/2016/48469.
- Kennett B.** Seismological tables: ak135. Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra, 2005. P. 81.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R.** Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // *Geophysical Journal International*. 1995. Vol. 122 (1). P. 108–124. doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x.
- Khain V.E.** Structure and evolution of nappe-fold edifices of the Alpine-Himalayan Belt: A comparison // *International Geology Review*. 1996. Vol. 38 (4). P. 374–387. doi:10.1080/00206819709465341. EDN:LDPNYD.
- Khamrabaev I.Kh., Zunnunov F.Kh.** (Eds.). The Earth's crust and upper mantle of the Pamirs, the Himalayas, and the Southern Tien Shan (In Russ.). Nauka, Moscow, 1984. 160 p.
- Koulakov I., Sobolev S.V.** A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir–Hindukush region // *Geophysical Journal International*. 2006. Vol. 164 (2). P. 425–440. doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02841.x.
- Kulakov I.Yu., Tychkov S.A., Bushenkova N.A., Vasilevsky A.N.** Three-dimensional velocity structure of upper mantle beneath the Alpine-Himalayan orogen // *Russian Geology and Geophysics*. 2003. Vol. 44 (6). P. 542–560.
- Kumar P., Ravi Kumar M., Srijayanthi G., Arora K., Srinagesh D., Chadha R.K., Sen M.K.** Imaging the lithosphere-asthenosphere boundary of the Indian plate using converted wave techniques // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. Vol. 118 (10). P. 5307–5319. doi:10.1002/jgrb.50366.
- Medved I., Koulakov I., Mukhopadhyay S., Jakovlev A.** Lithosphere structure in the collision zone of the NW Himalayas revealed by alocal earthquake tomography // *Journal of Geodynamics*. 2022. Vol. 152. P. 101922. doi: 10.1016/j.jog.2022.101922.
- Miglani R., Shahrukh M., Israil M., Gupta P.K., Varshney S.K., Sokolova E.** Geoelectric structure estimated from magnetotelluric data from Uttarakhand Himalaya, India // *Journal of Earth System Science*. 2014. Vol. 123 (8). P. 1907–1918. doi:10.1007/s12040-014-0504-2.
- Molnar P., Tapponnier P.** Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // *Science*. 1975. Vol. 189. P. 419–426. doi:10.1126/science.189.4201.419.
- Oreshin S., Kiselev S., Vinnik L., Prakasam K., Rai S., Makeyeva L., Savvin Ye.** Crust and mantle beneath western Himalaya, Ladakh and western Tibet from integrated seismic data // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. Vol. 271. P. 75–87. doi:10.1016/j.epsl.2008.03.048.
- Priestley K., Jackson J., McKenzie D.** Lithospheric structure and deep earthquakes beneath India, the Himalaya and southern Tibet // *Geophysical Journal International*. 2008. Vol. 172 (1). P. 345–362. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03636.x.
- Rawat G., Arora B.R., Gupta P.K.** Electrical resistivity cross-section across the Garhwal Himalaya: Proxy to fluid-seismicity linkage // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 637. P. 68–79. doi:10.1016/j.tecto.2014.09.015.
- Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Levina E.A.** Estimated geodynamic impact from zones of collision and subduction on the seismotectonic regime in the Baikal rift // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016. Vol. 7 (3). P. 383–406. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2016-7-3-0214.

Sippl C., Schurr B., Tynpel J., Angiboust S., Mechie J., Yuan X., Schneider F.M., Sobolev S.V., Ratschbacher L., Haberland C., TIPAGE-Team. Deep burial of Asian continental crust beneath the Pamir imaged with local earthquake tomography // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 384. P. 165–177. doi:10.1016/j.epsl.2013.10.013.

Yin A., Harrison T. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2000. Vol. 28. P. 211–280. doi:10.1146/annurev.earth.28.1.211.

Zelt C.A., Smith R.B. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure // *Geophysical Journal International*. 1992. Vol. 108 (1). P. 16–34. doi:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00836.x.

Zhang H., Zhao J., Xu Q. Crustal and upper mantle velocity structure beneath central Tibet by *P*-wave teleseismic tomography // *Geophysical Journal International*. 2012. Vol. 190 (3). P. 1325–1334. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05582.x.

Zhou H., Murphy M. Tomographic evidence for wholesale underthrusting of India beneath the entire Tibetan plateau // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2005. Vol. 25 (3). P. 445–457. doi:10.1016/j.jseaes.2004.04.007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МЕЛЬНИК Елена Александровна – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: региональное изучение земной коры и верхней мантии платформенных и складчатых областей Сибири методами активной сейсмики.

ШАЙГАРДАНОВ Марсель Алмазович – лаборант лаборатории глубинных исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическое моделирование структурно-скоростного строения земной коры и верхней мантии в пределах коллизионных структур Евразии.

БЕЛЯШОВ Андрей Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории глубинных исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическое изучение структуры земной коры, решение прямых и обратных задач в сейсморазведке, гипоцентрия сейсмических событий.

*Статья поступила в редакцию 22 июня 2026 г.,
одобрена после рецензирования 14 августа 2026 г.,
принята к публикации 14 августа 2026 г.*