

УДК 550.834

## Первые результаты оценки глубины поверхности Мохо методом обменных $P_s$ -волн для Азербайджанской части Большого Кавказа

© 2020 г. Г.Д. Етирмишли, С.Э. Казымова

РЦСС при НАНА, г. Баку, Азербайджан

**Аннотация.** Впервые на основе анализа волновых характеристик удалённых землетрясений, зарегистрированных на сейсмотелеметрических станциях РЦСС при НАНА, в рамках Международного проекта «Разрез Кавказа» были получены глубины залегания границы Мохоровичича для Азербайджанской части Большого Кавказа методом обменных  $P_s$ -волн (“Receiver function”). Обработка сейсмограмм отобранных землетрясений проводилась с помощью пакета программ (разработан в Университете Миссури, США) под операционной системой MacOS. В ходе исследования рассматривались сейсмологические данные, зарегистрированные сетью ( $N=20$ ) телеметрических станций, оснащённых трёхкомпонентным широкополосным сейсмометром STS-2.5, за 2009–2019 гг. Всего было проанализировано 2428 землетрясений, зафиксированных на эпицентральных расстояниях от 35 до 90°. На первом этапе осуществлялась частотная фильтрация с целью устранения колебаний как слишком высоких частот, содержащих в себе эффекты случайного рассеяния на неоднородностях, так и слишком низких частот, снижающих разрешающую способность. Рабочий диапазон периодов составлял от 2 до 10 с. Далее осуществлялась двумерная и трёхмерная ротация осей. На основе полученных результатов была построена карта изолиний глубин залегания границы Мохоровичича и установлены глубины: для территории Губа-Гусарского региона – 48–50 км, Закатала-Балаканского региона – 46–47 км, Шамахи-Исмаиллинского региона – 48–52 км.

**Ключевые слова:** поверхность Мохоровичича, обменные  $P_s$ -волны, метод “Receiver function”.

**Для цитирования:** Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э. Первые результаты оценки глубины поверхности Мохо методом обменных  $P_s$ -волн для Азербайджанской части Большого Кавказа // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 78–87. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.07>

### Введение

Первые определения глубины залегания поверхности Мохоровичича в Азербайджане были сделаны на основании сейсмологических данных [Гаджиев, 1965]. С использованием данных ГСЗ (глубинного сейсмического зондирования) при составлении гравитационной модели земной коры резко повысились глубинность и точность исследований [Шихалибейли, 1996]. Данные ГСЗ обеспечили единственность решения обратной задачи гравиметрии – расчёта глубинного распределения плотности. Большинство известных методов автоматизированного подхода предполагает получение плотностного разреза, эффект от которого совпал бы с наблюдаемым гравитационным полем.

Неоднозначная, но существующая связь поверхностных процессов с глубинными

заставляет учёных более внимательно изучать и использовать результаты региональных глубинных исследований. Именно поэтому коровые и мантийные процессы так пристально изучаются в геофизике. При этом аномалии времени пробега продольных и поперечных волн, зарегистрированных от источников, удалённых на телесеismicкие расстояния, восполняют недостаточную чувствительность приёмных функций к абсолютным значениям скорости волн. Другая возможность привлечения абсолютных значений скоростей связана с использованием дисперсионных кривых поверхностных волн. Актуальность работы обусловлена необходимостью получения надёжных и детальных данных о глубине расположения границы Мохо одной из наиболее сейсмоактивных зон Азербайджана и имеет как фундаментальное значение, так как расширяет знания о глубинном строении Земли,

так и прикладное, так как уточнённая скоростная модель отражается на точности определения параметров гипоцентров землетрясений.

Методология обменных волн или, как её принято называть, метод “Receiver function”, хорошо известна и широко используется во всём мире для исследования глубинной структуры Земли вплоть до 800 км. Первый значительный результат, показавший потенциал этого метода, был получен при исследовании тонкой структуры переходной зоны мантии с помощью записей сейсмической группы НОРСАР [Langston, 1977; Vinnik, 1977]. Начиная с этой работы, приёмные функции и сходные методы играют всё большую роль в глобальных и региональных исследованиях строения Земли [Винник и др., 1984; Винник, 2019]. В основе метода лежат регистрация, выделение и интерпретация обменных Ps-волн. Данные исследования были проведены в рамках Международной сейсмографической лаборатории с помощью пакета программ, разработанных в Университете Миссури (США). Исследования во многих странах мира показали эффективность метода обменных волн в изучении структуры литосферы в пределах одной и более сейсмических станций. На сегодняшний день в РЦСС при НАНА накоплен большой банк цифровых трёхкомпонентных записей далёких землетрясений мира, позволяющий определить возможности изучения структуры коры и верхней мантии.

Существуют две модификации метода “Receiver function” по типам используемых обменных фаз:  $P$  – функция приёмника (или PRF), использующая обменные и кратные волны  $P$ - $S$  ( $Ps$ ) и, соответственно,  $S$  – функция приёмника (или SRF), использующая обменные и кратные волны  $S$ - $P$  ( $Sp$ ). Эффективно дополняя друг друга, вместе они позволяют получить устойчивый скоростной разрез земной коры и верхней мантии. В данной работе рассмотрена только PRF-модификация.

Обменные волны распространяются от источника как продольные, а на границах в области сейсмической станции они преобразуются в поперечные (рис. 1). Для выделения фаз обменных волн на фоне случайных помех необходимо знать свойства обменных волн и использовать их в алгоритме обработки исходных сейсмограмм [Французова и др., 2011].

Для выделения глубинных обменных волн необходимо знание их временных и амплитудных характеристик. Каждая обменная волна от поверхностного источника пересекает сферический слой в недрах Земли дважды: в области источника и в области приёмника. Проходя путь от границы обмена к поверхности с меньшей

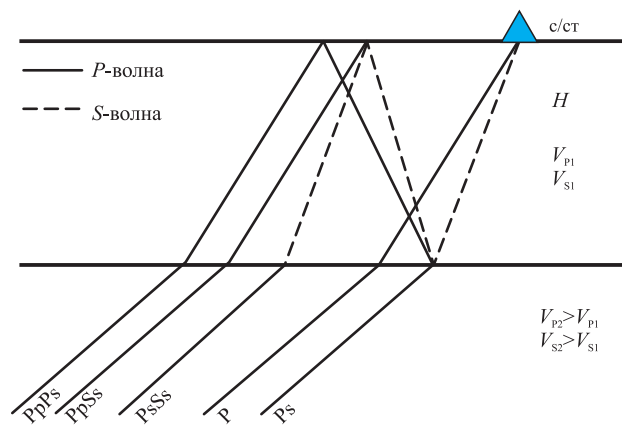


Рис. 1. Лучевая диаграмма фаз, используемая для анализа метода обменных волн в двухслойной среде [Ammon, 1991]

скоростью по сравнению с рефрагированной продольной волной  $P$ , обменные волны  $Ps$  вступают на записи с некоторым запаздыванием по отношению к волне  $P$ , их порождающей. Время запаздывания зависит от расстояния между источником и станцией и от глубины границы, на которой произошёл обмен. При фиксированной глубине обмена время запаздывания обменной волны  $Ps$  уменьшается с увеличением эпицентрального расстояния и возрастает с его уменьшением [Французова и др., 2011].

Время запаздывания обменной волны по отношению к продольной можно представить в виде выражения:

$$t_{PS} = \int_{r_c}^{r_0} \sqrt{V_S^{-2} - p^2 r^{-2}} dr - \int_{r_c}^{r_0} \sqrt{V_P^{-2} - p^2 r^{-2}} dr, \quad (1)$$

здесь  $r$  – текущий радиус,  $r_0$  – радиус поверхности наблюдений,  $r_c$  – границы обмена,  $p$  – лучевой параметр,  $V_P$  и  $V_S$  – скорость волн  $P$  и  $S$ .

Для распознавания на сейсмограммах обменных волн существует ряд критериев. Однако на практике не все они выдерживаются. В частности, довольно часто не соблюдается признак поляризации поперечных волн, т.е. регистрируются интенсивные  $SH$ -волны (где смещение поперечной волны перпендикулярно плоскости падения), часто сдвинутые по фазе относительно  $SV$ -волн, где смещение находится в плоскости падения-отражения [Булин и др., 1960; Егоркина, 1986; Егоркина и др., 1986; 1987].

Поскольку поперечная волна  $Ps$  в изотропной среде поляризована как  $SV$ , искомая волна выделяется в плоскости источник-приёмник в направлении, перпендикулярном направлению поляризации в  $P$ -волне (рис. 2). Поскольку амплитуда обменной волны  $Ps$  намного меньше

амплитуды  $P$ -волны, то наиболее ответственным моментом обработки является выделение сигнала обменной волны на фоне различных волн и помех [Французова и др., 2011].

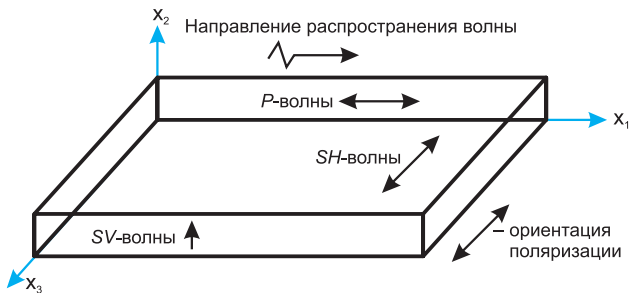


Рис. 2. Трёхмерная система координат и направления поляризации волн  $P$ ,  $SV$  и  $SH$

### Методика обработки данных

Обработка данных состоит из пяти основных задач: частотная фильтрация вводных сейсмических записей в формате SAC (Seismic Analysis Code); ротация (поворот) осей  $Z$ ,  $N$ ,  $E$  на источник; стандартизация компонент  $L$ ,  $Q$ ,  $T$ ; получение индивидуальных приёмных функций для каждого землетрясения; суммирование трасс от всех землетрясений. Обработка сейсмограмм отобранных землетрясений проводится с помощью пакета программ, разработанных в Университете Миссури (США), под операционной системой MacOs.

На первом этапе осуществляется частотная фильтрация с целью устранения колебаний как слишком высоких, содержащих в себе эффекты случайного рассеяния на неоднородностях, так и слишком низких частот, снижающих разрешающую способность [Французова и др., 2011]. Рабочий диапазон периодов составляет от 2 до 10 с.

Далее осуществляется двумерная и трёхмерная ротация осей. Математически это преобразование состоит в нахождении собственных векторов ковариационной матрицы, полученной при вычислении ковариаций вертикальной и радиальной компонент. Двумерную ротацию осей можно представить в виде матрицы [Bormann et al., 2014]:

$$M_{2D} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ T \end{bmatrix} = M_{2D} \begin{bmatrix} N \\ E \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $N$  и  $E$  представляют исходные (горизонтальные) оси;  $R$  и  $T$  представляют радиальную и тангенциальную составляющие;  $\alpha$  – азимут, измеренный по часовой стрелке от севера.

Трёхмерная ротация осей выражается в виде следующей матрицы [Bormann et al., 2014]:

$$M_{2D} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ T \end{bmatrix} = M_{2D} \begin{bmatrix} N \\ E \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ Q \\ T \end{bmatrix} = M_{3D} \begin{bmatrix} Z \\ E \\ N \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $i$  – угол падения, измеренный по вертикали;  $Z$ ,  $E$  и  $N$  – исходные (горизонтальные и вертикальная) оси;  $L$ ,  $Q$  и  $T$  – преобразованные оси:  $L$  соответствует направлению поляризации  $P$ -волны,  $Q$  перпендикулярна оси  $L$  и соответствует направлению поляризации  $SV$ -волны,  $T$  соответствует направлению поляризации  $SH$ -волны (рис. 3).

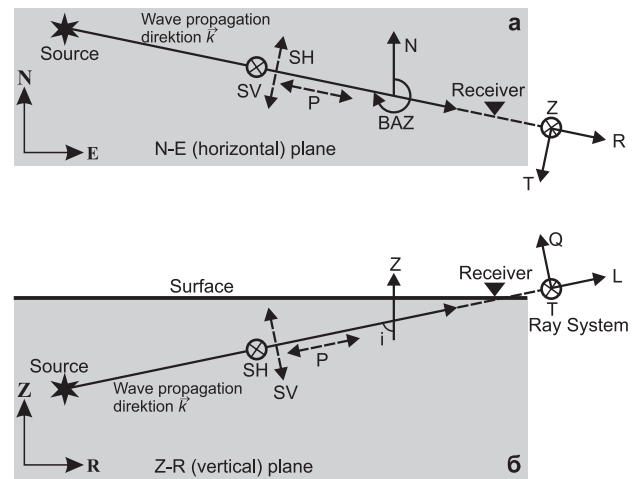


Рис. 3. Движение частиц для волн  $P$  и  $S$  вдоль направления распространения волн: а – в горизонтальной плоскости; б – в вертикальной плоскости

Полученные функции приёмника затем инвертировались в скоростной разрез земной коры. Обратная задача решалась методом регуляризации [Ryberg et al., 2000], при котором задача сводится к решению системы линейных уравнений, содержащих в качестве параметров скорости продольных и поперечных волн ( $V_P$ ,  $V_S$ ), плотности ( $\rho$ ) и мощности слоёв.

### Применение метода обменных волн для территории Большого Кавказа

Одним из лучших регионов для изучения ранних стадий горообразования является Большой Кавказ, где большая часть вулканизма и горообразования соответствует возрасту 5 млн. лет. Особый интерес представляет зона погружения Куринской впадины под Большой Кавказ, так называемая зона субдукции, недостаточно

изученная на сегодняшний день [Kangarli et al., 2018; Yetirmishli et al., 2019]. Учитывая тот факт, что территория Большого Кавказа характеризуется максимальной сейсмической активностью, и исследования глубинного строения данной территории наиболее актуальны для республики, наши исследования глубины залегания границы Мохо мы начали с данного региона. На современном этапе плотная сеть высокочувствительных цифровых сейсмических станций позволяет регистрировать все сейсмические события с магнитудой  $ML > 0.1$  в пределах Азербайджана, а также удалённые телесеизмические события по всему миру с  $ML > 5.0$ . Каждая сейсмическая станция на территории Азербайджана оснащена трёхкомпонентным широкополосным сейсмометром STS-2.5 (рис. 4). В ходе исследования рассматривался каталог удалённых землетрясений, зарегистрированных сетью телеметрических станций ( $N=20$ ) за 2009–2019 гг., полученный в «Бюро исследований землетрясений» РЦСС при НАНА. Всего было проанализировано 2428 землетрясений, зафиксированных на эпицентральных расстояниях от 35 до 90°.

В соответствии с описанной ранее методикой, после фильтрации и ротации сейсмических волн итоговые компоненты  $L$ ,  $Q$  и  $T$  были стандартизованы с применением деконволюционного фильтра, сформированного на участке итоговой сейсмограммы, содержащей падающую  $P$ -волну и часть её коды (рис. 5).

Далее в процессе обработки с целью подавления шума и выделения обменных волн, связанных с различными границами в земной коре и верхней мантии, проводилось суммирование стандартизованных компонент различных землетрясений с разными временными сдвигами и в общем случае весовыми коэффициентами:

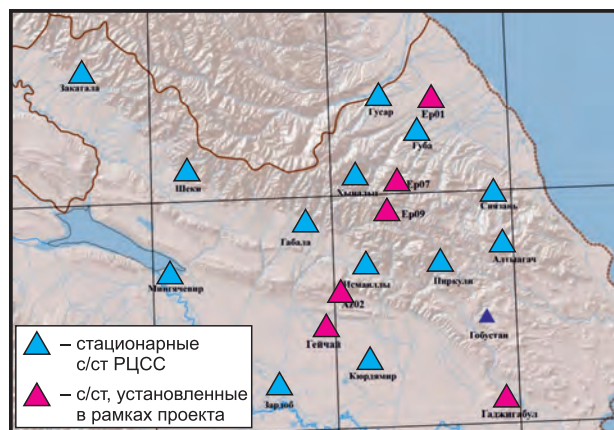


Рис. 4. Сеть сейсмических станций, используемых в обработке

$$F(t, h) = \sum_{i=1}^N m_i \hat{H}_i(t + \delta t_i(h) - \delta t_0(h)), \quad (5)$$

где  $N$  – число суммированных записей;  $m_i$  – весовой коэффициент для  $i$ -й записи;  $\sum m_i = 1$ ;  $\delta t_i(h)$  – величина  $t_{PS}$ , вычисляемая по формуле (1) для глубины  $h$  при значении лучевого параметра, соответствующем продольной волне  $i$ -го землетрясения;  $\delta t_0$  – величина  $t_{PS}$  для той же глубины при значении лучевого параметра  $6.4 \text{ с/град}$ , принятом в качестве опорного. Если глубина обмена выделяемой волны равна  $h_1$ , то при изменении глубины перехода фаз  $h$  амплитуда выделяемой волны достигает максимума при  $h \approx h_1$  и убывает с увеличением величины  $|h - h_1|$  [Бурмаков и др., 1988]. Таким образом, близость значения глубины обмена, определяемой по максимуму амплитуды сигнала и по времени запаздывания сигнала по отношению к волне  $P$ , может служить критерием идентификации обменной волны.

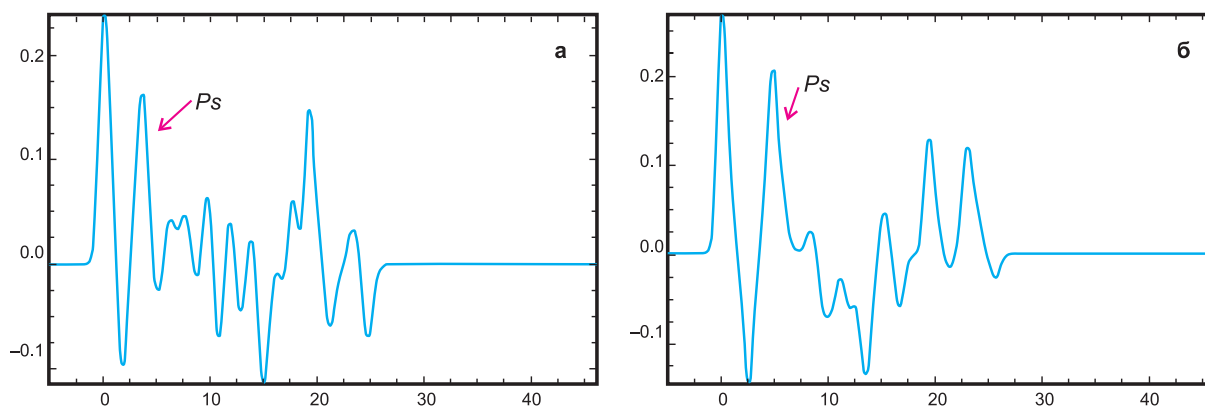


Рис. 5. Стандартизованные сейсмограммы для сейсмических станций «Исмаиллы» (IML) (а) и «Шеки» (SEK) (б)

На рис. 6–8 показаны индивидуальные  $Q$ -трассы приёмных функций, на которых хоро-

шо выделяется граница Мохо со временем задержки в среднем 4.7 с.

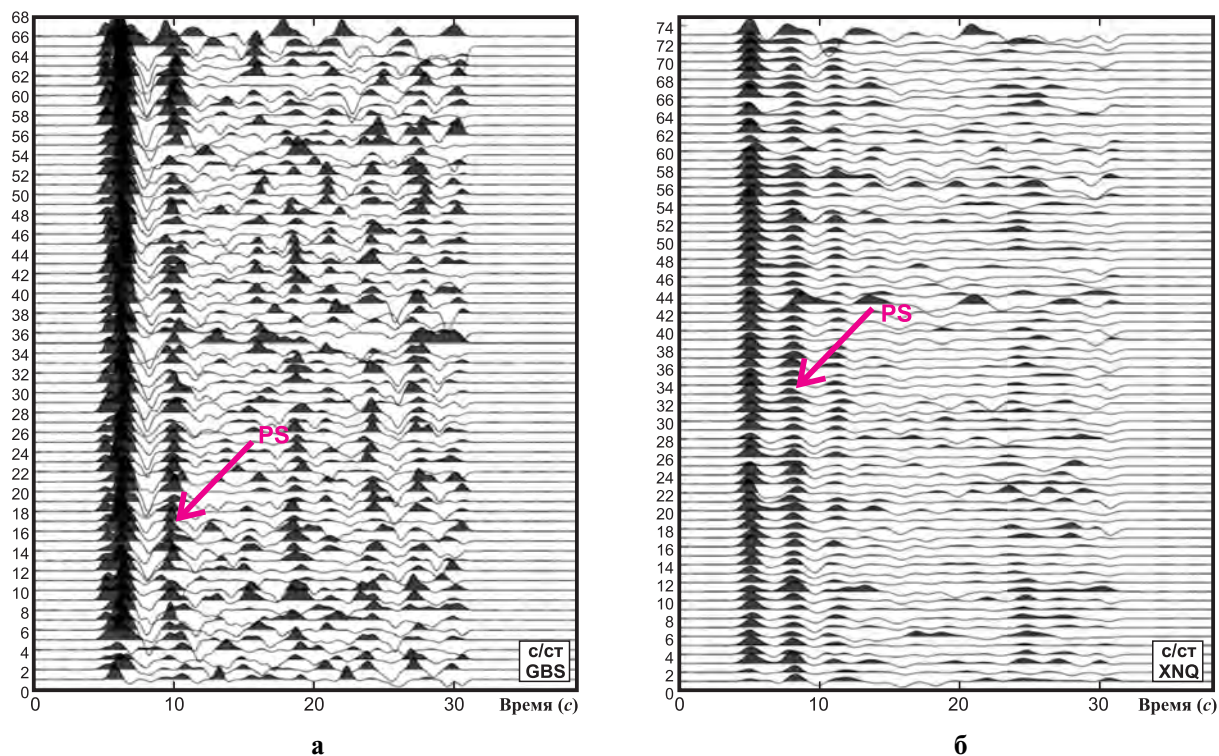


Рис. 6. Индивидуальные стандартизованные компоненты для всех землетрясений, полученные на сейсмических станциях «Гобустан» (GBS) (а) и «Хыналыг» (XNQ) (б)

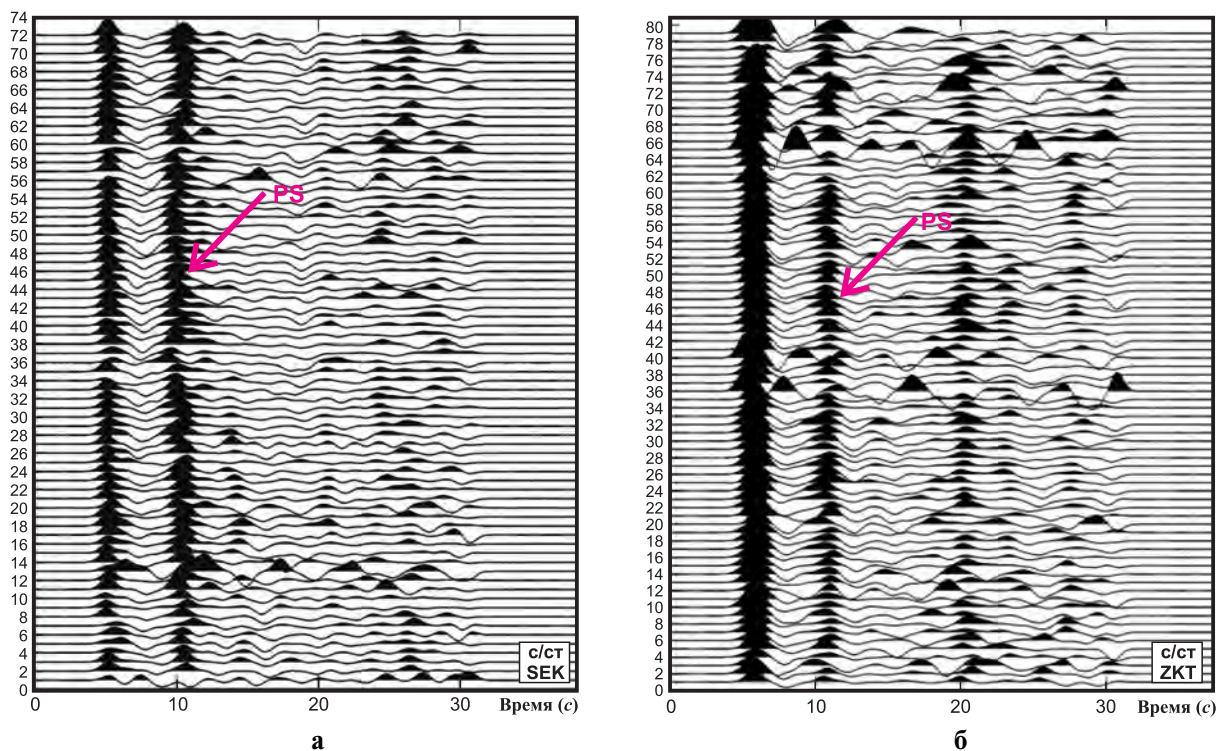


Рис. 7. Индивидуальные стандартизованные компоненты для всех землетрясений, полученные на сейсмических станциях «Шеки» (SEK) (а) и «Закатала» (ZKT) (б)

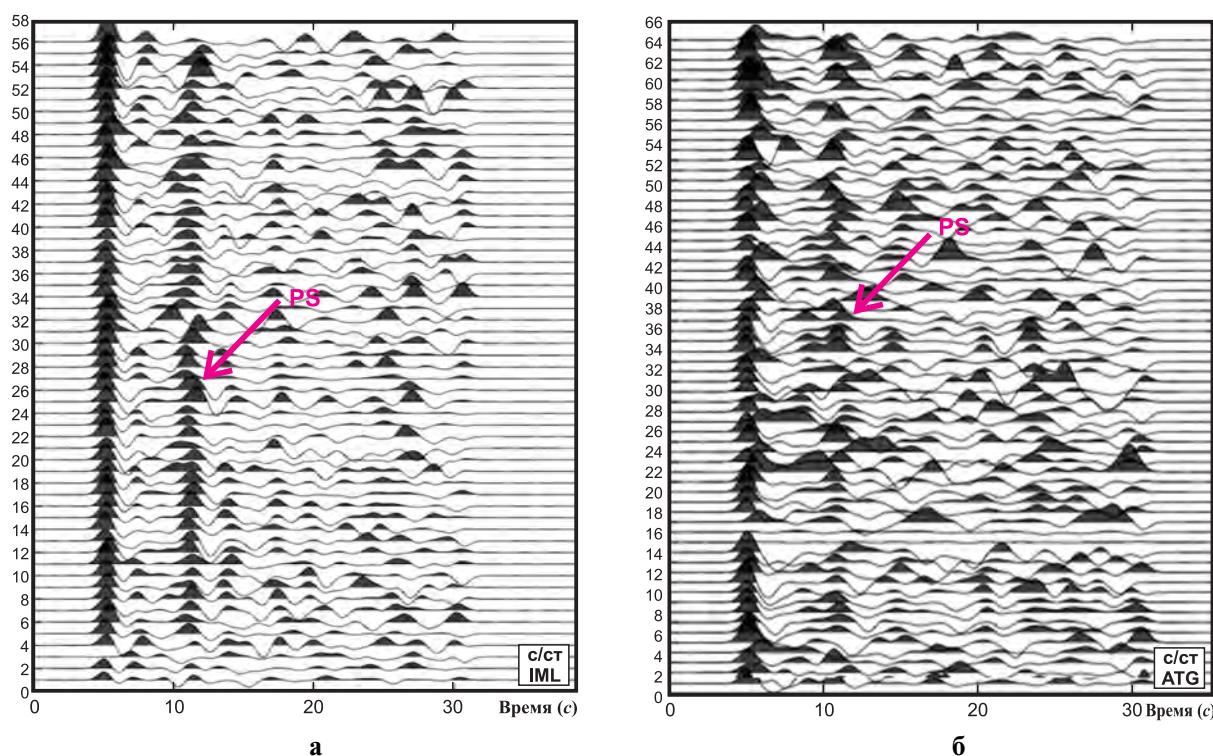


Рис. 8. Индивидуальные стандартизованные компоненты для всех землетрясений, полученные на сейсмических станциях «Исмаиллы» (IML) (а) и «Алтыгач» (ATG) (б)

На следующем этапе работ выполнялась инверсия полученных функций приёмника для получения скоростного разреза  $V_s$ . Глубину обмена для обменной волны  $Ps$  можно найти, оценивая время запаздывания обменной волны  $t_{ps}$  по отношению к продольной по формуле (1). Оценка глубины границы обмена зависит главным образом от средних скоростей и в вышележащем слое. Для обращения использовалась одномерная скоростная модель, состоящая из 13 слоёв в пределах глубин 0–60 км [Казымова и др., 2017]. Вариации скоростей поперечных волн выполнялись с фиксированными отношениями скоростей  $V_p/V_s=1.75$  и  $1.80$  соответственно в коре и мантии. Далее по исходной модели рассчитывалась синтетическая  $Q$ -компонента (приёмная функция), которая сопоставлялась с аналогичной, полученной по экспериментальным данным. Затем исходная модель варьировалась вышеуказанным способом и уже по варьированной модели проводился расчёт синтетической  $Q$ -компоненты с последующим сопоставлением её с экспериментальной. Итерационный процесс продолжался до сходимости с заданной точностью синтетической и экспериментальной  $Q$ -компонент, по завершению которого последняя варьированная модель принималась за близкую к реальной.

Таким образом, после обработки данных по всем станциям была вычислена глубина залегания границы Мохо для территории Большого Кавказа и построена схематическая карта изолиний (рис. 9). Карта изолиний была построена в программе Surfer 9. Как видно на рисунке, мощность в целом меняется в пределах от 40 км в Закатала-Балаканском районе до 52 км в зоне Шамахи-Исмаиллинского района.

Как было сказано ранее, первые определения глубины залегания поверхности Мохоревича в Азербайджане были сделаны на основании данных ГСЗ. В дальнейшем, принимая их за исходные, по материалам гравиметрии была вычислена мощность земной коры в различных пунктах Азербайджана и Каспийского моря. Аналогичные вычисления также производились на основании интерпретации исходных данных, полученных по Мингечевирскому взрыву. Наиболее достоверными оказались оценки мощности земной коры, сделанные на основе данных Карадагских взрывов в четырёх пунктах Апшеронской области [Шихалибейли, 1996]. Позже единичные определения по данным ГСЗ были экстраполированы по всему Азербайджану на основании гравитационной карты, в первом приближении была построена схема поверхности Мохоревича [Шихалибейли, 1996]. Анализ

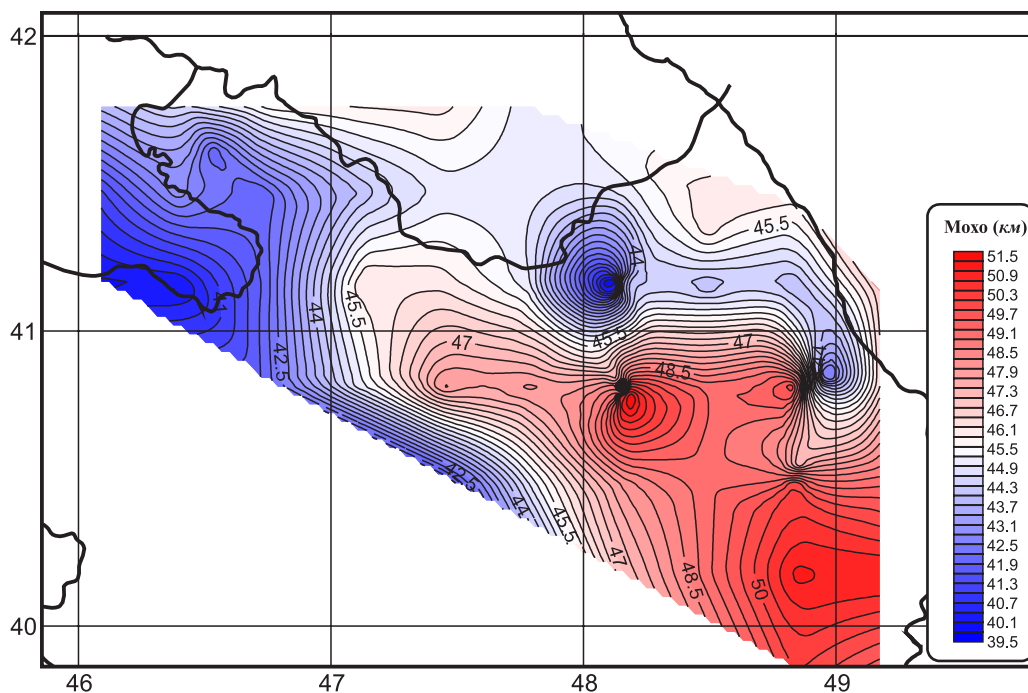


Рис. 9. Карта изолиний глубины поверхности Мохо на территории Большого Кавказа

этой схемы позволяет выделить структуры Большого Кавказа, Малого Кавказа, Предмалокавказский (Шамкир-Талышский) выступ. На рис. 10 показан план расположения профилей ГСЗ на территории Азербайджана, составленный Р.М. Гаджиевым в 1965 году. По результатам геологической интерпретации гравитационных аномалий, кривых магнитного поля, а также данных ГСЗ была построена карта изоглубин поверхности Мохо [Шихалибейли, 1996]. Далее в 1996 г. Э.Ш. Шихалибейли [Шихалибейли, 1996] была составлена схема изоглубин поверхности Мохо, за основу которой была принята схема Р.М. Гаджиева. При составлении сводной схемы поверхности Мохо для западной части республики схема достроена с учётом данных по Восточной Грузии. Учитывая горную местность территории Большого Кавказа, проведение здесь каких-либо геофизических исследований не представлялось возможным. Для определения мощности земной коры на участках отсутствия данных ГСЗ, с целью более обоснованной оценки значений, были использованы корреляционные зависимости между значениями мощности земной коры и наблюдаемым полем силы тяжести в редукции Буге.

Сравнительный анализ данных, полученных методом обменных  $P_s$ -волн, по сравнению с данными ГСЗ показал разницу до 15 км в основном в Губа-Гусарском и Габалинском районах.

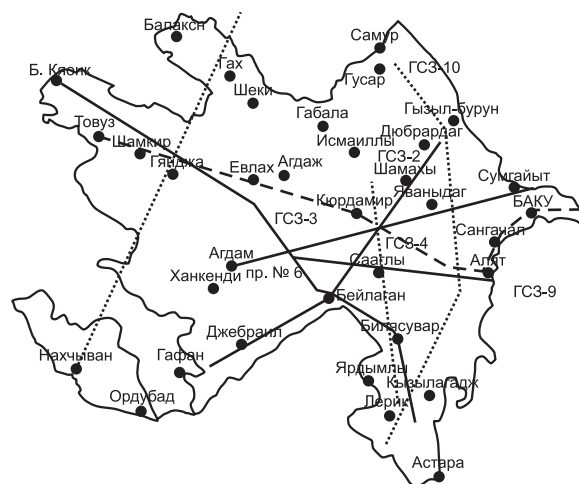


Рис. 10. План расположения профилей ГСЗ на территории Азербайджана

### Выводы

Впервые на основе анализа волновых характеристик удалённых землетрясений, зарегистрированных на сейсмолетметрических станциях РЦСС, получены глубины залегания границы Мохо для Азербайджанской части Большого Кавказа методом обменных  $P_s$ -волн (“Receiver function”).

Таким образом, была построена карта изолиний глубин залегания границы Мохо и установлены глубины для территории Губа-Гусарского региона (48–50 км), Закатала-Балаканского региона

(46–47 км) и Шамахи-Исмаиллинского региона (48–52 км). Полученные данные согласуются с имеющимися данными, однако были получены и расхождения. По сравнению с картой, построенной по данным ГСЗ-КМПВ и гравиметрии [Гаджиев, 1965], разница в мощности земной коры составила от 1 до 15 км. По сравнению с картой, построенной по данным ГСВ и гравиметрии, представленной в [Шихалибейли, 1996], разница в мощности земной коры менялась от 1 до 10 км.

### Литература

- Булин Н.К., Трюфилюкина Е.И. Использование обменных волн SP, регистрируемых при близких землетрясениях, для изучения глубинного строения земной коры // Известия АН СССР. Серия геофизическая. – 1960. – № 11. – С. 1570–1579.
- Бурмаков Ю.А., Винник Л.П., Косарев Г.Л. и др. Структура и динамика литосферы по сейсмическим данным. – М.: Наука, 1988. – 221 с.
- Винник Л.П. Сейсмология приёмных функций // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 16–27.
- Винник Л.П., Косарев Г.Л., Макеева Л.И. Анизотропия литосферы по наблюдениям волн SKS и SKKS // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 278, № 6. – С. 1335–1339.
- Гаджиев Р.М. Глубинное геологическое строение Азербайджана. – Баку: Азернешр, 1965. – 200 с.
- Егоркина Г.В. Азимутальные изменения скоростей сейсмических волн и трещиноватость горных пород Джавахетского нагорья // Известия АН Арм. ССР. Науки о Земле. – 1986. – Т. 39. – № 7. – С. 3141.
- Егоркина Г.В., Безгодков В.А. Изучение сейсмической анизотропии верхней части земной коры // Физика Земли. – 1987. – № 4. – С. 28–39.
- Егоркина Г.В., Безгодков В.А., Егоркин А.А. Экспериментальное изучение анизотропии скоростей сейсмических волн в кристаллическом фундаменте // Вулканология и сейсмология. – 1986. – № 4. – С. 49–58.
- Казымова С.Э., Казымов И.Э. Влияние одномерных скоростных моделей на определение основных параметров очагов землетрясений Азербайджана // Физика Земли. – 2017. – № 1. – С. 72–86.
- Французова В.И., Ваганова Н.В., Юдахин Ф.Н., Винник Л.П., Косарев Г.Л., Орешин С.И. Строение литосферы по данным обменных волн под сейсмостанцией «Климовская» // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2011. – № 1. – С. 176–183.
- Шихалибейли Э.Ш. Некоторые проблемные вопросы геологического строения и тектоники Азербайджана. – Баку: Элм, 1996. – 215 с.
- Ammon C.J. The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1991. – V. 81 (6). – P. 2504–2510.
- Bormann P., Klinge K., Wendt S. Data analysis and seismogram interpretation // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2) / Bormann P., ed. – Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2014. – P. 1–126.
- Kangarli T.N., Kadirov F.A., Etirmishli G.J., Aliyev F.A., Kazimova S.E. et al. Recent geodynamics, active faults and earthquake focal mechanisms of the zone of pseudo subduction interaction between the Northern and Southern Caucasus microplates in the Southern slope of the Greater Caucasus (Azerbaijan) // Geodynamics and Tectonophysics. – 2018. – V. 9, Is. 4. – P. 1099–1126.
- Langston C.A. Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1977. – V. 67. – P. 713–724.
- Ryberg T., Weber M. Receiver function array: a reflection seismic approach // Geophysical Journal International. – 2000. – V. 141 (1). – P. 1–11.
- Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to SV in the mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1977. – V. 15 (1). – P. 39–45.
- Yetirmishli G.J., Kazimova S.E. Modeling of the Earth's crust of the Greater Caucasus by seismic tomography. Innovations in minimization of natural and technological risks // Книга тезисов и Программа Первой Евразийской конференции «Инновации в минимизации природных и технологических рисков», 22–24 мая 2019, Баку, Азербайджан. – Баку, 2019. – P. 117.

### Сведения об авторах

**Етирмишли Гурбан Джалалович**, член-корреспондент НАНА, д-р геол.-мин. наук, профессор, директор Республиканского центра сейсмологической службы при Национальной академии наук Азербайджана (РЦСС при НАНА), г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: gyetirmishli@gmail.com

**Казымова Сабина Эльдар**, д-р филос. геол.-мин. наук, доцент, нач. отдела РЦСС при НАНА, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: sabina.k@mail.ru



## The first results of estimating the depth of the Moho surface by the method of converted Ps-waves for the Azerbaijan part of the Greater Caucasus

© 2020 G.J. Yetirmishli, S.E. Kazimova

RSSC of ANAS, Baku, Azerbaijan

**Abstract** The methodology of the converted waves, or as it is commonly called, the “Receiver function” method, is well known and is widely used throughout the world to study the deep structure of the Earth up to 800 km. The method is based on the registration and interpretation of converted Ps waves. These studies were carried out as part of the International Seismotomographic Laboratory using a software package developed at the University of Missouri (USA). One of the best regions for studying the early stages of mountain building is the Greater Caucasus, where most of the volcanism and mountain building appears to be 5 million years. Of particular interest is the immersion zone of the Kura Basin beneath the Greater Caucasus, the so-called subduction zone, which has not been sufficiently studied to date. To this end, we began our studies of the depth of the Moho border with this region. Thus, for the first time on the basis of the analysis of the wave characteristics of distant earthquakes recorded at seismic and telemetric stations of the RSSC, within the framework of the international project “Transect”, the depths of the Moho border for the Azerbaijan part of the Greater Caucasus were refined by the method of exchange reflected Ps waves (“Receiver function”). Seismograms of the selected earthquakes were processed using the Seismic Analysis Code (SAC) software package under the MacOs operating system. The study examined seismological data recorded by a network of telemetry stations (N=20) for 2009-2019. In total, 2428 earthquakes recorded at an epicenter distance of 35 to 90 degrees were analyzed. At the first stage, frequency filtering was carried out in order to eliminate oscillations that were too high, containing the effects of random scattering on inhomogeneities, and too low frequencies that reduce the resolution. The working range of the periods ranged from two to 10 seconds. Next, two-dimensional and three-dimensional rotation of the axes was carried out. The summation of all traces was carried out with time shifts relative to some reference epicentral distance, which is assumed to be 60 degrees. On the summarized Q-tracks of the receiving functions, the Moho boundary with a delay time of 4.0 sec is clearly distinguished. Thus, a map of isolines of the depths of the Moho surface was constructed and depths were determined for the territory of the Guba-Gusar region 48-50 km, the Zagatala-Balakan region 46-47 km, the Shamakhi-Ismayilli region 48-52 km. As it was said earlier, the first definitions of the depth of the surface of Moho in Azerbaijan were made based on the data from the state earthquake and the gravitational model of the Earth’s crust. R.M. Gadzhiev in 1965 and E.Sh. Shikhalibeyli in 1996 built such models. The data obtained are consistent with the available data, but discrepancies have been received. Compared with the map constructed according to the GSZ-KMPV and gravimetric data by R.M. Gadzhiev (1965), the difference in the thickness of the earth’s crust was from one to 15 km. Compared with the map constructed according to the FGP and gravimetric data by E.Sh. Shikhalibeyli (1996), the difference in the thickness of the earth’s crust varied from one to 10 km.

**Keywords** Moho surface, methodology of reflected waves, exchange Ps-waves.

**For citation** Yetirmishli, G.J., & Kazimova, S.E. (2020). [The first results of estimating the depth of the Moho surface by the method of converted Ps-waves for the Azerbaijan part of the Greater Caucasus]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(3), 78-87. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.07>

### References

Ammon, C.J. (1991). The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(6), 2504-2510.

Bormann, P., Klinge, K., & Wendt, S. (2014). Data analysis and seismogram interpretation. In *New manual*

*of seismological observatory practice (NMSOP)* (pp. 1-126). Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

Bulin, N.K., & Tryfilkina, E.I. (1960). [Using of SP exchange waves recorded during close earthquakes to study the deep structure of the Earth’s crust]. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Seriya geofizika* [Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geophysics Series], 11, 1570-1579. (In Russ.).

- Burmakov, Yu.A., Vinnik, L.P., Kosarev, G.L. et al. (1988). *Struktura i dinamika litosfery po seismicheskim dannym* [The structure and dynamics of the lithosphere from seismic data]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 221 p.
- Frantsuzova, V.I., Vaganova, N.V., Yudakhin, F.N., Vinnik, L.P., Kosarev, G.L., & Oreshin, S.I. (2011). [The structure of the lithosphere according to the data of the exchange waves under the Klimovskaya seismic station]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geologiya* [Voronezh State University Bulletin. Geology series], 1, 176–183. (In Russ.).
- Gadzhiev, R.M. (1965). *Glubinnoe geologicheskoe stroenie Azerbaidzhana* [The deep geological structure of Azerbaijan]. Baku, Azerbaijan: Azerneshr Publ., 200 p. (In Russ.).
- Kangarli, T.N., Kadirov, F.A., Yetirmishli, G.J., Aliyev, F.A., Kazimova, S.E. et al. (2018). Recent geodynamics, active faults and earthquake focal mechanisms of the zone of pseudosubduction interaction between the Northern and Southern Caucasus microplates in the southern slope of the Greater Caucasus (Azerbaijan). *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(4), 1099–1126.
- Kazimova, S.E., & Kazimov, I.E. (2017). The influence of one-dimensional velocity sections on determining the key parameters of the earthquake sources in Azerbaijan. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(1), 69–82.
- Langston, C.A. (1977). Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(3), 713–724.
- Ryberg, T., & Weber, M. (2000). Receiver function arrays: a reflection seismic approach. *Geophysical Journal International*, 141(1), 1–11.
- Shikhalibeyli, E.Sh. (1996). *Nekotorye problemnye voprosy geologicheskogo stroeniia i tektoniki Azerbaidzhana* [Some problematic issues of the geological structure and tectonics of Azerbaijan]. Baku, Azerbaijan: Elm Publ., 215 p. (In Russ.).
- Vinnik, L.P. (1977). Detection of waves converted from P to SV in the mantle. *Physics of the Earth and planetary interiors*, 15(1), 39–45.
- Vinnik, L.P. (2019). Receiver function seismology. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 55(1), 16–27. (In Russ.).
- Vinnik, L.P., Kosarev, G.L., & Makeeva, L.I. (1984). [Anisotropy of the lithosphere from observations of SKS and SKKS waves]. *Doklady akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 278(6), 1335–1339. (In Russ.).
- Yegorkina, G.V. (1986). [Azimuthal changes in seismic wave velocities and fracturing of rocks in the Javakheti Highlands]. *Izvestiia Akademii nauk Azerbaidzhanskoi SSR. Nauki o Zemle* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Earth sciences], 39(G), 3141. (In Russ.).
- Yegorkina, G.V., & Bezgodkov, V.A. (1987). [The study of seismic anisotropy of the upper part of the earth's crust]. *Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 4, 28–39. (In Russ.).
- Yegorkina, G.V., Bezgodkov, V.A., & Yegorkin, A.A. (1986). [An experimental study of the anisotropy of the velocities of seismic waves in a crystalline basement]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 4, 49–58. (In Russ.).
- Yetirmishli, G.J., & Kazimova, S.E. (2019). Modeling of the Earth's crust of the Greater Caucasus by seismic tomography. In *Book of abstracts and Program of the First Eurasian Conference "Innovations in minimization of natural and technological risks", May 22–24, 2019, Baku, Azerbaijan* (p. 117). Baku, Azerbaijan.

### Information about authors

**Yetirmishli Gurban Jalalovich**, Corresponding Member of ANAS, Dr., Professor, Director of the Republican Seismic Survey Center of Azerbaijan National Academy of Sciences (RSSC of ANAS), Baku, Azerbaijan. E-mail: gyetirmishli@gmail.com

**Kazimova Sabina Eldar**, PhD, Associate Professor, Head of Department of the RSSC of ANAS, Baku, Azerbaijan. E-mail: sabina.k@mail.ru