

УДК 550.344

DOI: 10.24411/2226-7271-2018-11082



Аптикаева О.И.

Затухание в литосфере Западного Тянь-Шаня

Аптикаева Ольга Ивановна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук», Москва

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-6613-4405>

E-mail: olga-i-aptikaeva@j-spacetime.com; stakhov@ifz.ru; aptikaevaoi@mail.ru

В статье представлены результаты характеристики затухания короткопериодной сейсмической коды землетрясений Западного Тянь-Шаня. Детальные распределения эффективной добротности по огибающим коды землетрясений на расстояниях до 50 км и до 450 км дополняют друг друга. По характеристикам поглощения выделены изометричные в плане высокодобротные зоны (блоки) и близкие к линейным, тяготеющие к разломам зоны сильного поглощения (ослабленные зоны). Наиболее ярко выраженные проводники, выявленные в результате исследований магнитотеллурическим методом, совпадают с низкодобротными зонами, что свидетельствует о существенном их флюидонасыщении. Низкоскоростные аномалии Р-волн соответствуют зонам низкой добротности. Сильнейшие землетрясения района приурочены к зонам максимального контраста поглощения, к границам блоков и ослабленных зон, где подвижность блоков определяется пониженной вязкостью низкодобротных и незначительной мощностью высокодобротных слоев.

Ключевые слова: землетрясения; кода-волны; добротность; пространственные и временные вариации; поле поглощения.

Введение

В нашей работе, опубликованной уже более 20 лет назад, в далеком теперь 1996 г., были представлены результаты анализа пространственных вариаций поля поглощения в районе Западного Тянь-Шаня (восточного обрамления Ферганской впадины)¹. В ней этой статье приведена карта эффективной добротности, полученная с использованием метода короткопериодной коды по данным стационарной станции Суфи-Курган и передвижной частотно-избирательной станции (ЧИСС) в 1960–1984 гг.². К вопросу оценки добротности среды в этом районе по характеристикам коды обращались и ранее³. По записям землетрясений, произошедших на территории Тянь-Шаня, были получены сводные огибающие коды и частотные зависимости добротности, определенной по коде для региона в целом.

В последние годы чрезвычайно интересные задачи решаются на базе данных, полученных на Бишкекском геодинамическом полигоне. Среди них – оценка с помощью программного комплекса CodaQ добротности среды полигона по огибающим коды, которая стала возможной благодаря большому массиву цифровых записей сейсмических событий, зарегистрированных станциями сети KNET⁴. Получены частотные зависимости добротности среды в радиусе 50 км вокруг каждой из станций сети.

¹ Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф., Копничев Ю.Ф., Рогожин Е.А. Неоднородности литосферы и астеносферы Туранской плиты и южного Тянь-Шаня, их связь с тектоникой и сейсмичностью // Физика Земли. 1996. № 2. С. 3–15.

² Запольский К.К. Частотно-избирательные станции ЧИСС // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука. 1971. С. 20–26.

³ Земцова А.Г. Сейсмическая кода и динамические особенности землетрясений Киргизии: Дис. ... к. ф.-м. н. Фрунзе, 1985; Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С., Земцова А.Г., Проскурин А.П., Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.Н., Синельникова Л.Г., Филина А.Г., Шенгелия И.С. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981.

⁴ Сычева Н.А., Сычев В.Н., Сычев И.В., Ильичев П.В. Расчет добротности коры и верхней мантии Северного Тянь-Шаня на основе разработанного программного комплекса CodaQ // Геоинформатика. 2015. № 2. С. 12–23.

В последние годы строение района активно изучалось методами приемной функции¹, сейсмической томографии², магнитотеллурическим³ и другими методами⁴. Представленные в упомянутой выше работе⁵ карты неоднородностей поля поглощения района получены по относительно небольшому числу событий с привлечением метода детального картирования литосферы и астеносферы по характеристикам коды местных землетрясений. В настоящем исследовании к анализу привлечены записи землетрясений станцией Ала-Арча (ААК) за период 2005–2017 гг. При этом границы района исследований были несколько раздвинуты с тем, чтобы появились общие с перечисленными выше методами зоны исследования. Цель предлагаемой работы состоит в том, чтобы выяснить, насколько согласуются полученные здесь результаты изучения поля поглощения с данными прошлых лет и, насколько они коррелируют с результатами исследований строения района другими методами.

Материалы и методы

В основе работ по изучению пространственно-временных неоднородностей поля поглощения в сейсмически активных районах⁶ лежат экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что определяющее влияние на формирование сейсмического волнового поля оказывает структура поля поглощения, и что кода местных землетрясений, в основном, сформирована поперечными волнами, отраженными от многочисленных слабых субгоризонтальных границ в земной коре и верхней мантии⁷.

В упомянутой работе для изучения пространственных неоднородностей поля поглощения использовались крупные морфологические детали огибающих коды местных землетрясений⁸. Часть огибающих на временах $t-t_0 < 80$ с (t_0 – время в очаге) имели пологий участок (значения эффективной добротности Q_s около 500), который сменялся крутым участком ($Q_s = 50$), на временах $t-t_0 = 70–80$ с огибающие выходили на асимптоту. Минимальное время перехода от пологого участка к крутому составляло 28–30 с. Другие огибающие начинались с крутого участка, затем следовало чередование крутых и пологих участков.

Для первого типа огибающих оценивалась глубина кровли слоя сильного поглощения h_k (по наиболее выраженному перегибу огибающей коды – моменту резкого уменьшения Q_s). Эффективная добротность определялась из выражения

$$A(t) \cong \frac{1}{t} \exp\left(-\frac{\pi t}{Q_s T}\right),$$

где $A(t)$ – амплитуда в коде в момент времени t от начала излучения, T – период колебаний.

Если конкретные значения различных параметров поля поглощения относить, например, к областям эпицентров, то по имеющемуся набору огибающих коды для многих гипоцентров землетрясений можно построить трехмерную структуру поля поглощения в коре и верхней мантии. Для этого, в предположении, что кода формируется однократно отраженными волнами, нужно найти положение в пространстве кровли и подошвы слоев сильного и слабого поглощения, и оценить эффективную добротность в этих слоях. Достоинством метода является большая детальность и высокая точность картирования неоднородностей поля поглощения поперечных волн. Точность построений зависит, в первую очередь, от точности локации очага землетрясения.

В предлагаемой работе использованы трехкомпонентные цифровые записи станцией ААК 150 событий с магнитудами более 4,0. Станция расположена на востоке рассматриваемого района, эпи-

¹ Vinnik L.P., Roecker S., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Koulakov I.Yu. "Crustal Structure and Dynamics of the Tien-Shan." *Geophys. Res. Lett.* 29.22 (2002): 41–44; Schneider F.M., Yuan X., Schurr B., Mechie J., Sippl C., Haberland C., Minaev V., Oimahmadov I., Gadoev M., Radjabov N., Abdybachev U., Orunbaev S., Negmatullaev S. "Seismic Imaging of Subducting Continental Lower Crust Beneath the Pamir." *Earth and Planetary Science Letters* 375.1 (2013): 101–112. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.05.015.

² Забелина И.В., Кулаков И.Ю., Буслов М.М. Выявление глубинных механизмов горообразования Киргизского Тянь-Шаня по результатам сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 7. С. 906–920; Багманова Н.Х., Миркин Е.Л. Особенности скоростного строения мантии и их роль в формировании очаговых зон сильных коровых землетрясений Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2018. № 1(11). С. 12–17.

³ Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympe J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu. "Resistivity Structure Underneath the Pamir and Southern Tian Shan." *Geophys. J. Int.* 198.1 (2014): 564–579. DOI:10.1093/gji/ggu146.

⁴ Zubovich A.V., Xiao-Qiang Wang, Scherba Yu.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Jie Li, Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Ya-min Dang, Bragin V.D., Beisenbaev R.T. "GPS Velocity Field for the Tien Shan and Surrounding Regions." *Tectonics* 29 (2010): TC6014. DOI: 10.1029/2010TC002772.

⁵ Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф., Копничев Ю.Ф., Рогожин Е.А. Указ. соч.

⁶ Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф. Тонкая структура литосферы и астеносферы Гармского района и ее связь с сейсмичностью // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317. № 3. С. 326–330.

⁷ Там же; Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф. Детальное картирование литосферы и астеносферы Гармского района по поглощению поперечных волн // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5–6. С. 101–118.

⁸ Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф., Копничев Ю.Ф., Рогожин Е.А. Указ. соч.

центральные расстояния составляли 30–450 км. В данном случае поглощение оценивалось по огибающим короткопериодной коды (в том числе и коды Lg) на частоте ~ 1 Гц (фильтр аналогичный каналу ЧИСС 1–1,6 Гц) на временах $t-t_0 > 2t_s$.

Как показано в работе Каазика с соавт.¹, на частотах ~ 1 Гц коды волны Lg сформирована в основном S-волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии. С ростом времени t коды формируют волны, падающие на границу Мохо все более круто и проникающие на большие глубины в верхней мантии. Если в области очага в верхах мантии существует зона относительно слабого (сильного) поглощения, то это приводит к сравнительно медленному (быстрому) затуханию амплитуд в начальной части коды Lg. Эффективная добротность в данном случае определялась по приведенной выше формуле.

На рис. 1 показаны огибающие коды землетрясений, записанных в 1961 г. передвижной станцией Кальта и в настоящее время станцией ААК (KNET). В обоих случаях выбраны землетрясения с близкими эпицентрами. Как видно, колебания в коде этих событий затухают одинаково, а значит есть основания считать, что исследуемый материал однороден.

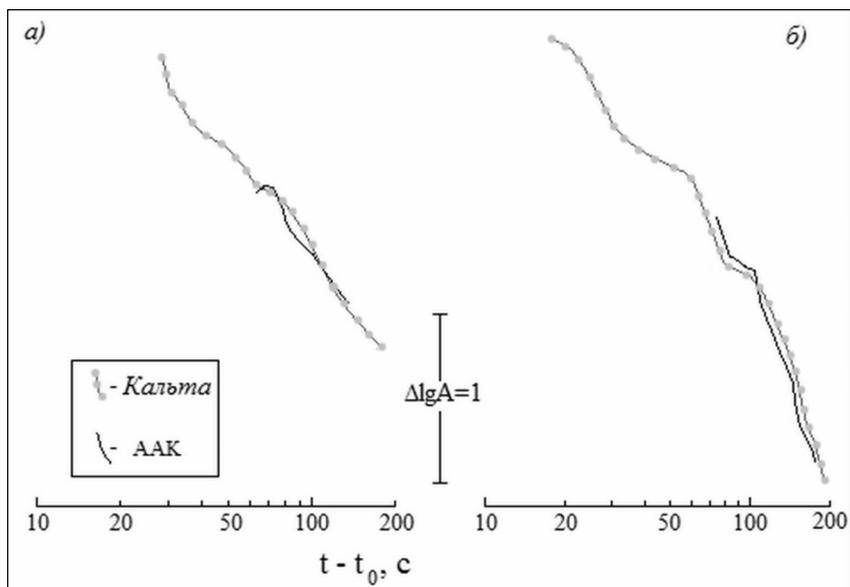


Рис. 1. Примеры огибающих коды землетрясений на частоте 1 Гц по записям станциями Кальта и ААК: а - 20.08.2016, $t_0 = 20:34$, $\varphi = 40,91$, $\lambda = 72,79$ (ААК); 29.08.1961, $t_0 = 13:33$, $\varphi = 40,90$, $\lambda = 72,77$ (Кальта); б - 29.10.2012, $t_0 = 01:25$, $\varphi = 40,53$, $\lambda = 73,00$ (ААК); 06.11.1961, $t_0 = 03:18$, $\varphi = 40,50$, $\lambda = 73,10$ (Кальта)

Пространственное распределение эффективной добротности

Карта вариаций Q_s на частоте ~ 1 Гц во временном окне от $2t_s$ до 80–100 с (рис. 2) построена по записям станцией SFK и передвижной станций ЧИСС. На севере района выделяются два блока слабого поглощения с максимальными значениями $Q_s \sim 350$. Они разделены ослабленной линейно-вытянутой зоной, где значения параметра Q_s составляют около 70. В центральной части района значения добротности значительно выше (в блоках слабого поглощения Q_s достигает 1000, в ослабленной зоне – 110). Южная часть района характеризуется значениями параметра Q_s такого же порядка, как и северная часть.

Как отмечалось выше, в предлагаемой работе поглощение оценивалось по огибающим коды землетрясений, записанных станцией ААК, на частоте 1,25 Гц на временах $t-t_0 > 2t_s$. На рис. 3 показаны примеры записей контрастных по затуханию колебаний в коде событий. Степень вариабельности поля поглощения в пределах изучаемого района можно оценить по соотношению уровней «ближней» и «дальней» коды. При совмещении (до наилучшего совпадения) огибающих коды индивидуальных землетрясений на временах более 150 с максимальные различия их уровней на временах ~ 50 с достигают 1 ед. лог.

¹ Каазик П.Б., Копничев Ю.Ф., Нерсесов И.Л., Рахматуллин М.Х. Анализ тонкой структуры короткопериодных сейсмических полей по группе станций // Физика Земли. 1990. № 4. С. 38–49.

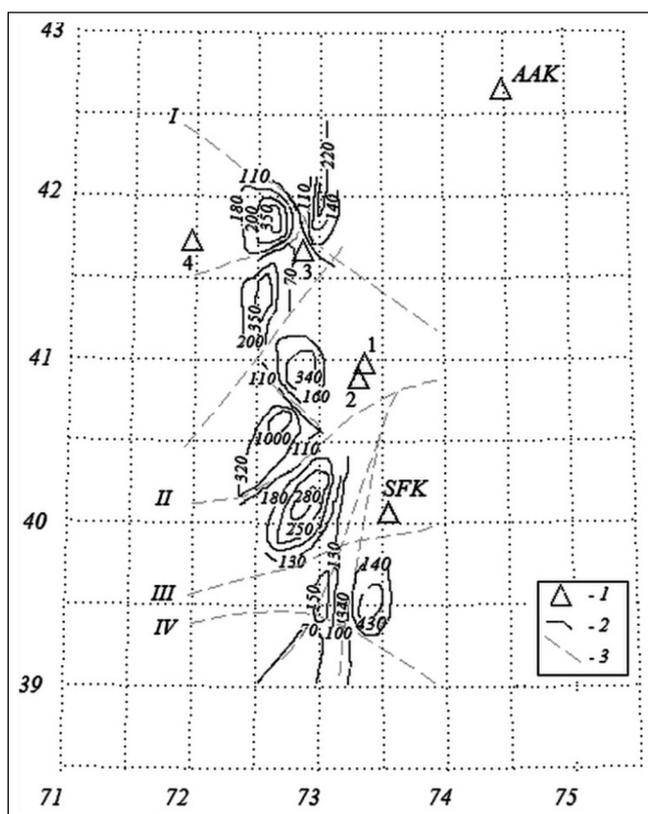


Рис. 2. Карта эффективной добротности Q_s для Ферганской зоны¹: 1 - стационарные станции Суфи-Курган (SFK) и передвижные станции ЧИСС в 1960-1984 гг. (1 - Ирису, 2 - Кальта, 3 - Карасу, 4 - Кызыл-Уран); 2 - изолинии эффективной добротности Q_s ; 3 - разломы (I - Таласо-Ферганский, II - Восточно-Ферганский, III - Гиссаро-Кокшаальский, IV - Дарваз-Каракульский)

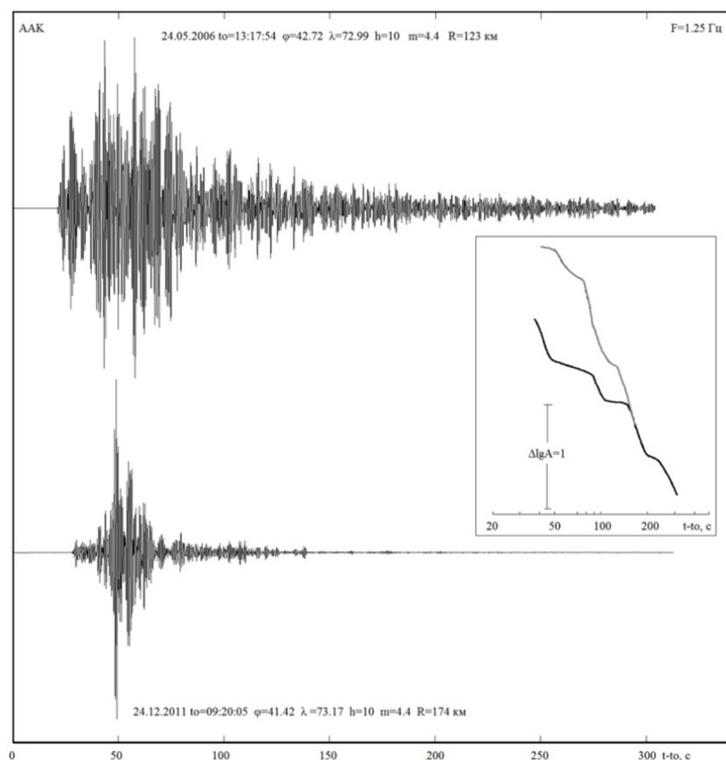


Рис. 3. Примеры записей землетрясений с $m = 4,4$, зарегистрированных станцией ААК. На врезке огибающие коды, построенные по этим записям

¹ Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф., Копничев Ю.Ф., Рогожин Е.А. Указ. соч.

Как видно из рис. 4 (цветная вкладка, с. 231), основные тенденции распределения добротности (положение добротных блоков и ослабленных зон) сохраняются и при использовании коды событий, записанных станцией ААК. При этом значения Q_s в пределах добротных блоков несколько выше, чем в первом случае, а в ослабленных зонах – несколько ниже. Временное окно, в пределах которого в данном случае определялась добротность, из-за больших эпицентральных расстояний смещено в сторону больших времен. В рамках выбранной нами модели это означает, что в данном случае значения добротности описывают поле поглощения на больших глубинах.

По сравнению с картой предыдущего периода на севере района очерчен пространственный высокодобротный блок, с которым связано Сусамырское землетрясение 1992 г., а также землетрясение 1885 г. На юго-востоке района выделен блок, восточные контуры которого из-за отсутствия данных показаны пунктиром. По всей видимости, эпицентры землетрясений 1983 и 1985 гг. приурочены к границе этого блока.

На рис. 4 показаны еще две станции сети KNET – EKS2 и AML, для которых в работе Сычевой с соавт. были рассчитаны частотные зависимости добротности по коде в радиусе 50 км от каждой из них¹. Для станций ААК, EKS2 и AML на частоте 1 Гц значения добротности при длине окна коды 50 с составляют соответственно 152, 152 и 131, т.е. мало отличаются друг от друга. Как видно из рис. 3, станции ААК и EKS2 находятся на периферии блока, и значения добротности в районе каждой из них примерно одинаковы. Станция AML расположена за пределами блока, значения добротности здесь несколько ниже. Полученный в указанной работе результат² вполне ожидаем, если принять во внимание, что приведенные выше значения характеризуют зону диаметром 100 км, внутри которой добротность может изменяться в несколько раз. Отметим, что и поле скоростей здесь может испытывать скачкообразные изменения, как например, в районе станции ААК (см. верхнюю врезку на рис. 4)³.

На рис. 4 показан также профиль магнитотеллурических исследований из работы P. Sass с соавт.⁴. Район магнитотеллурических исследований совпадает с интересующим нас районом только северной своей частью. Наиболее протяженные по вертикали и по латерали проводники C5, и особенно C6, совпадают с расположенными здесь низкодобротными зонами, которые разделяют высокодобротные блоки (см. нижнюю врезку рис. 4). Это наблюдение свидетельствует в пользу наличия в низкодобротных зонах жидкой фазы, которая является фактором, снижающим как сопротивление, так и добротность, так как в рамках выбранной модели формирования короткопериодной коды вариации поглощения S-волн мы связываем с содержанием флюидов в соответствующих слоях земной коры и верхней мантии.

Обращает на себя внимание, что некоторые проводники (см. рис. 4) протягиваются на глубину до 150 км. Заметим, что подобные структуры были выявлены и в поле поглощения. Например, отмечалось, что нижняя часть коры и верхи мантии Гармского района представляют собой систему ярко выраженных вертикальных линейных и «столбчатых» структур⁵.

Как уже отмечалось, изучаемый район был расширен по сравнению с районом предыдущих исследований, что позволило проследить, как согласуется распределение поля поглощения с распределением поля скоростей S-волн, которое было получено методом сейсмической томографии⁶ (см. рис. 4 средняя врезка). Распределение скоростей S-волн от поверхности до глубины 35 км остается практически неизменным, поэтому здесь показано поле скорости на глубине 35 км (наиболее близкое к глубинам наших исследований). Несмотря на то, что методом коды исследуется поглощение на существенно больших глубинах, в первом приближении участкам с высокой добротностью соответствуют участки с положительными аномалиями скорости поперечных волн.

На рис. 5а (цветная вкладка, с. 231) показана часть профиля, построенного методом приемных функций⁷, линия профиля субмеридианальна и соответствует примерно 73,5° в.д. Как видно, профиль представляет собой «слоеный пирог», состоящий из низкоскоростных и высокоскоростных слоев. Особенно заметен контраст скоростей на глубинах до 60–70 км. Но он имеет место и на больших глубинах. На рис. 5в приведены огибающие коды событий, записанных станцией Суфи-Курган. Локализация эпицентров этих событий показана на рис. 5б. Заметим, что для модели формирования коды в результате однократных отражений поперечных волн при средней глубине очага 10 км интервалу 25–100 с соответствует слой на глубине 50–220 км. Огибающие коды представляют собой чередование участков

¹ Сычева Н.А., Сычев В.Н., Сычев И.В., Ильичев П.В. Указ. соч.

² Там же.

³ Vinnik L.P., Roecker S., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Koulakov I.Yu. *Op. cit.*

⁴ Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympel J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu. *Op. cit.*

⁵ Aptikaeva O.I., Kopnichenov Yu. F., Shevchenko V. I. "Structure of the Crust and Upper Mantle in Relationship with the Tectonogenesis of the Garm Test Area, Tajikistan." *Fizika Zemli* 7–8 (1994): 53–64.

⁶ Забелина И.В., Кулаков И.Ю., Буслов М.М. Указ. соч.

⁷ По Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympel J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu. *Op. cit.*

сильного и слабого затухания разной продолжительности. Это в рамках выбранной нами модели означает, что мощность слоев сильного и слабого поглощения не остается постоянной, также как не остаются постоянными количество разнородных слоев и их мощности. К сожалению, на основании такого скоростного профиля можно говорить только о тенденциях, точную пространственную привязку данных двух методов сделать проблематично. Заметим, что этот фрагмент описывает район между 40 и 41° с.ш., для которого характерны небольшие по размерам блоки. Добротность мантии в пределах этих блоков $\sim 300\text{--}350$, тогда как на севере и юге района ее значения достигают $700\text{--}1000$. Относительно невысокая добротность может быть следствием вертикальной неоднородности блоков.

В работе Р. Sass с соавт.¹ приводится литосферная модель вдоль линии Южный Памир – Северный Тянь-Шань, построенная на основе анализа данных различных геофизических методов. С районом исследований она перекрывается только северной своей частью. Тем не менее, отраднo, что выделенным в предлагаемой работе зонам с высокой эффективной добротностью на широте около 39° , 39.5° и 40° соответствует последовательность стабильных блоков модели, описанной Р. Sass и соавт.² (рис. 6, цветная вкладка, с. 231). В модели нижняя граница блоков не достигает границы Мохо. Судя из приведенных выше данных, корни этих блоков могут быть погружены глубоко в мантию. Но подтверждение этому предположению требует дополнительных исследований.

Обсуждение результатов

Рассмотренное здесь распределение эффективной добротности характеризует поле поглощения преимущественно в мантии. Как было показано, оно чрезвычайно неоднородно как по глубине, так и по латерали. Приведенные данные свидетельствуют о существовании в мантии изучаемого района добротных блоков и ослабленных зон. Причем складывается впечатление, что контраст поглощения с глубиной увеличивается, по крайней мере, в ослабленных зонах на больших глубинах добротность среды оказывается ниже, чем в выше лежащих слоях.

К аналогичным выводам пришли исследователи скоростного поля методом сейсмической томографии³. Отмечается, что на глубинных срезах 80 и 130 км отчетливо проявляется мозаичность разнородных блоков. Выявлены также протяженные субвертикальные зоны аномально низких скоростей и изменение скоростной структуры мантии с глубиной. Под центральной частью Северного Тянь-Шаня (на восток от места с координатами $\varphi=42,5$ и $\lambda=73,5$) на глубине ~ 130 км выявлена отрицательная скоростная аномалия. Заметим, что аналогичная структура выделяется и в поле поглощения в районе станций ААК и ESK2.

Как отмечается в нашей работе 1996 г.⁴, глубина погружения кровли слоя сильного поглощения h_k в этом районе изменяется от 40 до 140 км (ограничения метода не позволяют выявить эту границу на меньших глубинах). Минимальная величина параметра $h_k = 40$ км характерна только для севера района, в других районах она составляет $55\text{--}60$ км. Как правило, области с минимальной глубиной погружения кровли слоя сильного поглощения имеют линейно-вытянутую форму и разделяют области, где этот слой погружен на максимальную глубину. Глубина слоя сильного поглощения h_k хорошо коррелирует с тектоническим строением района: в разломных зонах она составляет от 40 до 60 км, возрастая по мере удаления от них.

В той же работе указывается, что очаги наиболее сильных землетрясений Чаткальского $m = 7,5$ и Маркансуйского $m = 7,3$ приурочены к зонам, где $h_k = 40\text{--}55$ км. В местах возникновения землетрясений с $m > 6$ глубина погружения кровли слоя сильного поглощения составляет $60\text{--}65$ км. Полагая, что увеличение поглощения S-волн связано с уменьшением вязкости, можно заключить, что на севере (в районе Таласо-Ферганского разлома) и юге (в районе Дарваз-Каракульского разлома) подвижность блоков наибольшая в пределах рассматриваемого района за счет меньшей вязкости и меньшей мощности добротного слоя.

Записи землетрясений станцией ААК не могут быть использованы для определения глубины погружения кровли слоя сильного поглощения h_k , для этого нужны близкие землетрясения с $t_s - t_p < 4$ с. В тех случаях, когда записи близких землетрясений доступны для исследования, применение метода короткопериодной коды для построения пространственного распределения параметров затухания оказывается весьма успешным, как например, на Гармском прогностическом полигоне, в очаговых зонах Джиргатальского, Газлийского, Нефтегорского, Чуйского землетрясений.

¹ Ibid.

² Ibid.

³ Багманова Н.Х., Миркин Е.Л. Указ. соч.

⁴ Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф., Копничев Ю.Ф., Рогожин Е.А. Указ. соч.

Выводы

Получены не противоречащие друг другу данные о детальном распределении эффективной добротности по огибающим коды землетрясений на расстояниях до 50 км и на больших расстояниях (до 450 км). В первом случае Qs характеризует поле поглощения в нижней коре и верхней мантии, во втором случае – в мантии.

Поле поглощения включает изометричные в плане высокодобротные зоны (блоки) и близкие к линейным зоны сильного поглощения (ослабленные зоны). Структура поля поглощения коррелирует с тектоническим строением района, в частности, ослабленные зоны соответствуют зонам разломов.

Структура поля поглощения коррелирует со строением поля скоростей S-волн и скоростными аномалиями P-волн – низкоскоростные аномалии соответствуют зонам низкой добротности.

Наиболее ярко выраженные проводники, выявленные в результате исследований магнитотеллурическим методом, совпадают с низкодобротными зонами, что свидетельствует о существенном их флюидонасыщении.

Очаги наиболее сильных землетрясений с $K > 16,0$ приурочены к зонам максимального контраста поглощения, к границам блоков и ослабленных зон, где подвижность блоков определяется пониженной вязкостью низкодобротных и незначительной мощностью высокодобротных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф. Тонкая структура литосферы и астеносферы Гармского района и ее связь с сейсмичностью // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317. № 3. С. 326–330.
2. Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф. Детальное картирование литосферы и астеносферы Гармского района по поглощению поперечных волн // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5–6. С. 101–118.
3. Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф., Копничев Ю.Ф., Рогожин Е.А. Неоднородности литосферы и астеносферы Туранской плиты и южного Тянь-Шаня, их связь с тектоникой и сейсмичностью // Физика Земли. 1996. № 2. С. 3–15.
4. Багманова Н.Х., Миркин Е.Л. Особенности скоростного строения мантии и их роль в формировании очаговых зон сильных коровых землетрясений Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2018. № 1(11). С. 12–17.
5. Забелина И.В., Кулаков И.Ю., Буслов М.М. Выявление глубинных механизмов горообразования Киргизского Тянь-Шаня по результатам сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 7. С. 906–920.
6. Запольский К.К. Частотно-избирательные станции ЧИСС // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука. 1971. С. 20–26.
7. Земцова А.Г. Сейсмическая кода и динамические особенности землетрясений Киргизии: Дисс. ... к. ф.-м. н. Фрунзе, 1985. 164 с.
8. Каазик П.Б., Копничев Ю.Ф., Нерсесов И.Л., Рахматуллин М.Х. Анализ тонкой структуры короткопериодных сейсмических полей по группе станций // Физика Земли. 1990. № 4. С. 38–49.
9. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С., Земцова А.Г., Проскурин А.П., Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.Н., Синельникова Л.Г., Филина А.Г., Шенгелия И.С. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 144 с.
10. Сычева Н.А., Сычев В.Н., Сычев И.В., Ильичев П.В. Расчет добротности коры и верхней мантии Северного Тянь-Шаня на основе разработанного программного комплекса CodaQ // Геоинформатика. 2015. № 2. С. 12–23.
11. Aptikaeva O.I., Kopnichev Yu. F., Shevchenko V. I. "Structure of the Crust and Upper Mantle in Relationship with the Tectonogenesis of the Garm Test Area, Tajikistan." *Fizika Zemli* 7–8 (1994): 53–64.
12. Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympe J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu. "Resistivity Structure Underneath the Pamir and Southern Tian Shan." *Geophys. J. Int.* 198.1 (2014): 564–579. DOI:10.1093/gji/ggu146.
13. Schneider F.M., Yuan X., Schurr B., Mechie J., Sippl C., Haberland C., Minaev V., Oimahmadov I., Gadoev M., Radjabov N., Abdybaev U., Orunbaev S., Negmatullaev S. "Seismic Imaging of Subducting Continental Lower Crust Beneath the Pamir." *Earth and Planetary Science Letters* 375.1 (2013): 101–112. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.05.015.
14. Sippl C., Schurr B., Tympe 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* 384 (2013): 165–177. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.10.013.
15. Vinnik L.P., Roecker S., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Koulakov I.Yu. "Crustal Structure and Dynamics of the Tien-Shan." *Geophys. Res. Lett.* 29.22 (2002): 41–44.
16. Zubovich A.V., Xiao-Qiang Wang, Scherba Yu.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Jie Li, Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Ya-min Dang, Bragin V.D., Beisenbaev R.T. "GPS Velocity Field for the Tien Shan and Surrounding Regions." *Tectonics* 29 (2010): TC6014. DOI:10.1029/2010TC002772.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Аптикаева, О. И. Затухание в литосфере Западного Тянь-Шаня / О.И. Аптикаева // Пространство и Время. — 2018. — № 1—2(31—32). — С. 224—231. DOI: 10.24411/2226-7271-2018-11082. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provstl_2-31_32.2017.82.

Рис. 4. Карта эффективной добротности Q_e для Ферганской зоны, построенная по записям станцией Ала-Арча ААК. Желтые круги – эпицентры землетрясений с энергетическим классом $K > 16$. Жирной линией на рисунке слева показано положение профиля магнитотеллурических исследований из работы Р. Sass с соавт.¹ и наиболее яркие проводники С5 и С6. Остальные обозначения рис. 2. На верхней врезке – изменение скорости S-волн вдоль профиля, ориентированного с севера на юг и проходящего через станцию ААК из работы L.P. Vinnik с соавт.², на средней врезке – распределение аномалий скорости S-волн на глубине 35 км из работы Забелиной с соавт.³, на нижней врезке – профиль магнитотеллурических исследований из указанной работы Р. Sass с соавт.

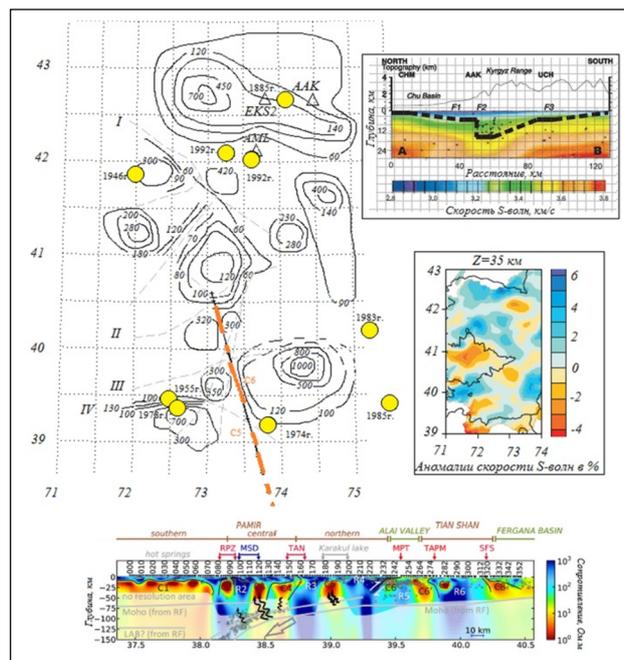


Рис. 5. Фрагмент скоростного профиля по указанной работе Р. Sass с соавт. (а), соответствующий положению эпицентров событий, записанных станцией Суфи-Курган (б), и огибающие коды этих событий (в).

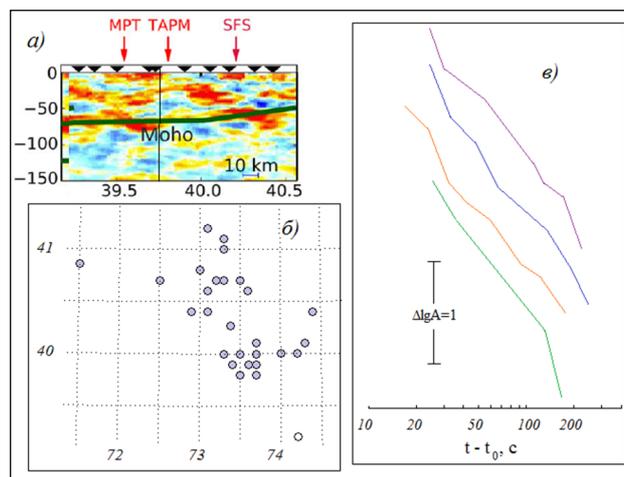
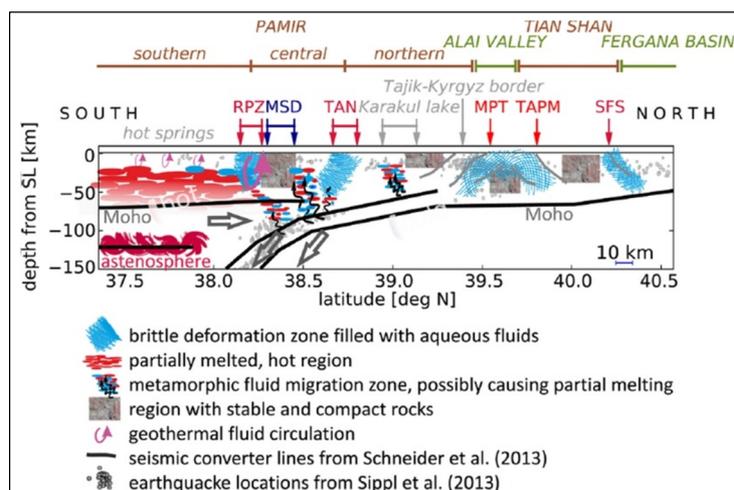


Рис. 6. Концептуальная литосферная модель вдоль линии от Южного Памира к Ферганскому бассейну из указанной работы Р. Sass с соавт.⁴



¹ Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympel J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu. *Op. cit.*

² Vinnik L.P., Roecker S., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Koulakov I.Yu. *Op. cit.*

³ Забелина И.В., Кулаков И.Ю., Буслов М.М. Указ. соч.

⁴ Указанная на рис. 6. работа Sippl et al. (2013) – 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* 384 (2013): 165–177. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.10.013.