

УДК 550.34
PACS 91.30.-f

КАРТИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН ПО КОДЕ ЗАПИСЕЙ МЕСТНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И КАРЬЕРНЫХ ВЗРЫВОВ В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

© 2019 г. Ю.Ф. Копничев^{1*}, И.Н. Соколова²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан,
г. Алма-Ата, Казахстан

* e-mail: yufk777@mail.ru

Аннотация. Проводится картирование поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Северного Тянь-Шаня. Анализировались записи местных землетрясений и карьерных взрывов, зарегистрированных пятью сейсмическими станциями, которые установлены в области г. Алма-Ата и ее близких окрестностях (в том числе поблизости от атомного реактора ВВР-К). Описываются характеристики общих огибающих коды S-волн для разных секторов относительно станций. По данным об огибающих коды строятся разрезы поля поглощения для рассматриваемых станций. Сравниваются характеристики поля поглощения к северу от Заилийского разлома (на южной окраине Казахской платформы) и к югу от него (в горных областях). Это позволяет судить о различии содержания глубинных флюидов в указанных областях. Строятся карты поля поглощения в разных диапазонах глубин и на различных азимутах по данным для всех станций. Выделяются зоны наибольшего поглощения, где могут идти процессы подготовки сильного землетрясения. Даются рекомендации по установке дополнительных станций в целях более быстрого и точного определения координат эпицентра возможного сильного землетрясения и оценки его магнитуды для принятия мер по безопасности атомного реактора ВВР-К.

Ключевые слова: разрезы поля поглощения S-волн, сильное землетрясение, глубинные флюиды, атомный реактор.

<https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-18>

Цитирование: Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Картирование поля поглощения S-волн по коду записей местных землетрясений и карьерных взрывов в районе Северного Тянь-Шаня // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18, № 4. С. 219–230. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-18>

ВВЕДЕНИЕ

В последние 20 лет установлено, что перед многими сильными неглубокими землетрясениями в литосфере формируются зоны высокого содержания флюидов [Husen, Kissling, 2001; Копничев, Соколова, 2003, 2010, 2011, 2012, 2017, 2019а, б; Копничев и др., 2009]. В связи с этим обнаружение таких зон может быть полезным в целях определения мест подготовки сильных сейсмических событий.

Перспективные методы выделения зон высокого содержания флюидов связаны с картированием поля поглощения короткопериодных поперечных волн [Копничев, Соколова, 2003, 2010, 2011, 2012, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019а, б; Копничев и др., 2009, 2013; Антикаева, 2014, 2018; Антикаева, 2015; Копничев, Соколова, 2016, 2018]. Пример успешного прогноза места подготовки сильного землетрясения в районе Восточного Тянь-Шаня по характеристикам поля поглощения S-волн продемонстрирован в работах [Копничев, Соколова, 2012, 2017].

В настоящей работе с этой целью проводится картирование поля поглощения в литосфере Северного Тянь-Шаня (в области г. Алма-Ата).

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе рассматриваются характеристики поля поглощения в небольшом районе Северного Тянь-Шаня, в котором расположена бывшая столица Казахстана г. Алма-Ата (рис. 1). Этот район находится в зоне перехода от Казахской платформы к горным сооружениям Северного Тянь-Шаня с наибольшими высотами около 5 км [Гальперина и др., 1985]. К югу от г. Алма-Ата проходит крупный региональный Заилийский разлом, простирающийся в восток–северо-восточном направлении и отделяющий хр. Заилийский Алатау от Казахской платформы (см. рис. 1). В области г. Алма-Ата выделяется погруженный блок фундамента, вытянутый параллельно Заилийскому разлому, кровля которого в центральной части находится на глубинах до 4 км [Гальперина и др., 1985].

Район характеризуется достаточно высокой сейсмичностью. К востоку от меридиана 75.5° в.д. (до 80° в.д.) начиная с 1880 г. зарегистрировано четыре сильных и сильнейших землетрясений с $M = 7.0–8.2$ [Гальперина и др., 1985]. При этом наибольшее количество жертв и самые большие разрушения соответствуют Вернен-

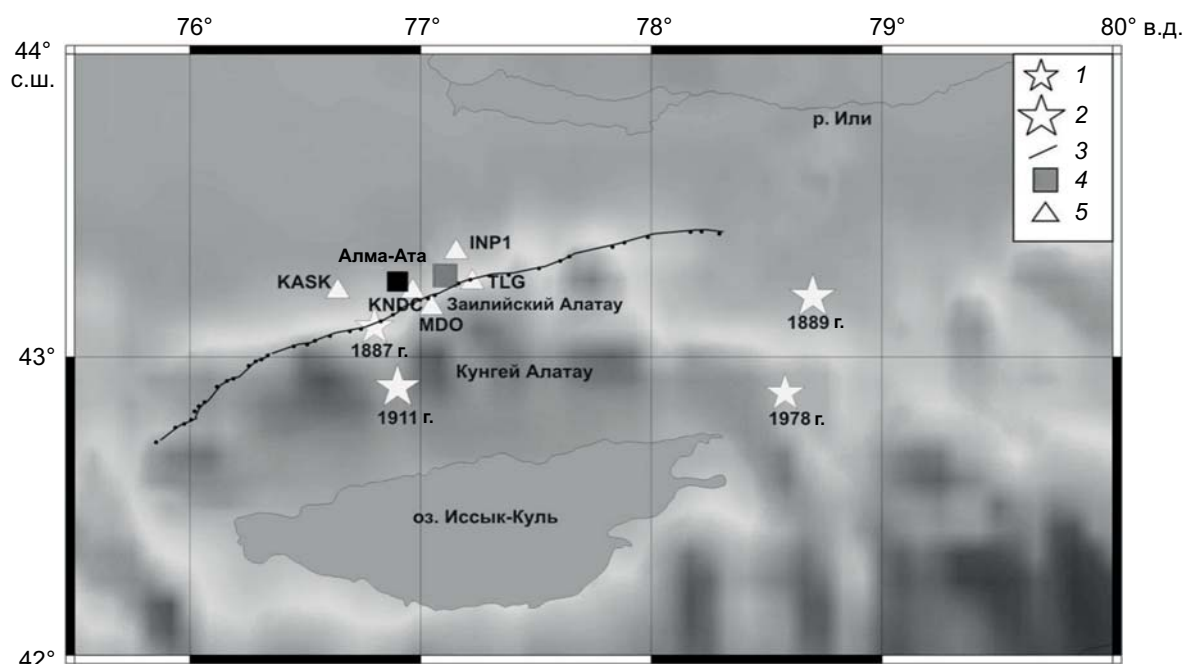


Рис. 1. Карта района исследований

1, 2 – эпицентры сильнейших землетрясений: 1 – $M = 7.0-7.3$; 2 – $M \geq 8.0$; 3 – Заилийский разлом; 4 – карьер Котур-Булак; 5 – сейсмостанции

скому землетрясению 1887 г. ($M = 7.3$). В то же время к западу от указанного меридиана наиболее сильное землетрясение за этот период времени имело магнитуду 6.9 (Беловодское 1885 г. [Новый..., 1977]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовались цифровые записи стационарных сейсмических станций MDO, TLG, KNDC и KASK, две из которых (MDO и KNDC) расположены в южной части г. Алма-Ата, а две другие – на расстояниях до 30 км от центра города (см. рис. 1). Дополнительно рассматривались записи временной станции INP1, установленной поблизости от исследовательского атомного реактора ВВР-К (Институт ядерной физики МЭ РК). Обработывались сейсмограммы местных землетрясений и карьерных взрывов (карьер Котур-Булак), зарегистрированных в 2000–2019 гг. в основном на эпицентральных расстояниях до 40 км. Глубины очагов землетрясений варьировались в диапазоне 0–15 км.

Поскольку поглощение существенно зависит от частоты колебаний, предварительно производилась частотная фильтрация (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и шириной полосы 2/3 октавы [Копничев, 1985]). Строились огибающие S -коды по вертикальным компонентам записей, как правило, на временах $t \geq 2t_s$, отсчитываемых от начала излучения в очаге (t_s – время пробега S -волны). Индивидуальные огибающие совмещались при построении общих огибающих для разных азимутальных секторов относительно станций.

В работах [Копничев, 1985; Aptikaeva, Koprnichev, 1993] показано, что на частотах около 1 Гц кода местных землетрясений и карьерных взрывов сформирована в основном поперечными волнами, отраженными от многочисленных слабых субгоризонтальных границ в земной коре и верхней мантии. Это позволяет карти-

ровать поле поглощения S -волн и строить разрезы добротности для разных азимутов по данным одной сейсмической станции. В этом принципиальное отличие модели отражений от модели изотропного рассеяния, в которой осредняются поглощающие характеристики больших объемов среды [Rautian, Khalturin, 1978]. Эффективная добротность Q_s определялась в предположении формирования коды однократно отраженными волнами [Бакиров, 2006] по формуле

$$A(t) \sim \exp(-\pi t / Q_s T) / t, \quad (1)$$

где T – период колебаний.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Огибающие коды. На рис. 2 представлены общие огибающие S -коды, построенные по записям станции MDO для четырех азимутальных секторов. Для трех секторов огибающие построены по записям местных землетрясений, а для одного (северного) – по записям взрывов на карьере Котур-Булак. Для северного и северо-западного секторов трассы лучей пересекают Заилийский разлом, а для двух других проходят к югу от разлома. Огибающая, соответствующая северному сектору, может быть разделена на три отрезка. После участка относительно слабого затухания ($t = 10-27$ с, $Q_s \sim 500$) наблюдается резкое увеличение наклона огибающей в интервале 27–50 с ($Q_s \sim 60$). После этого при $t > 50$ с наклон снова резко уменьшается, так что на отрезке 50–90 с он соответствует затуханию амплитуд по закону $A \sim t^{-1}$. В таких случаях (а также при еще более слабом затухании) мы формально принимали величину $Q_s = 2000$.

Для юго-восточного сектора на огибающей выделяется участок очень крутого наклона ($t = 16-60$ с, $Q_s \sim 75$), после которого наклон резко уменьшается ($Q_s \sim$

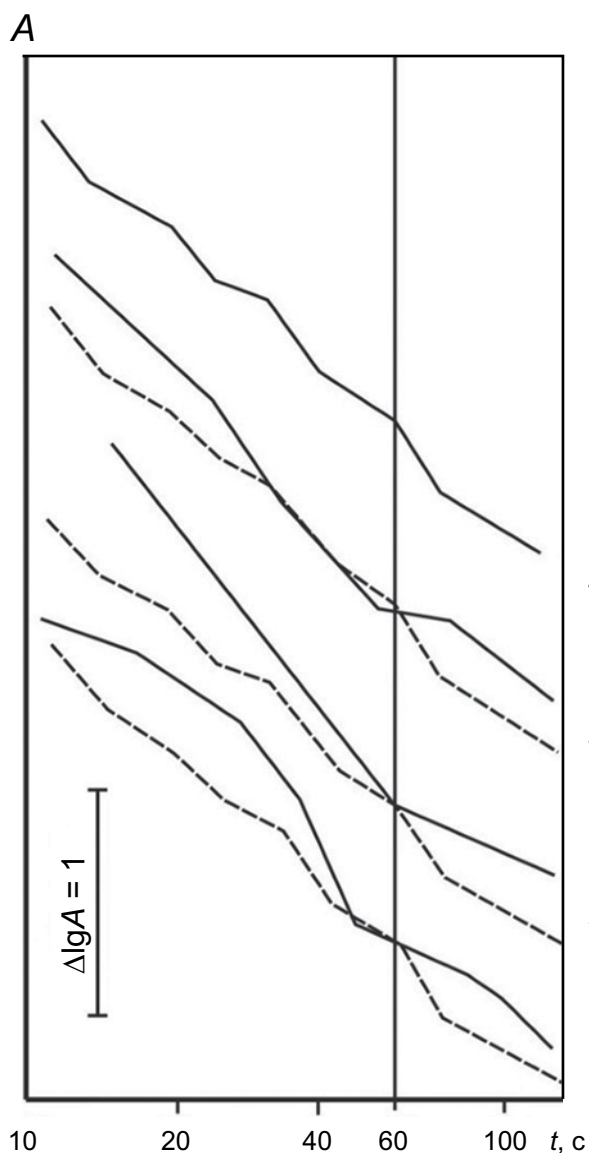


Рис. 2. Огибающие коды по данным станции MDO

Секторы: 1 – северный; 2 – юго-восточный; 3 – юго-западный; 4 – северо-западный. Пунктир – северо-западный сектор

2000). Юго-западному сектору соответствуют три отрезка огибающей, характеризующихся существенно различным наклоном: $t = 12\text{--}26$ с, $Q_s \sim 65$; $t = 26\text{--}55$ с, $Q_s \sim 90$ и $t = 55\text{--}100$ с, $Q_s \sim 2000$. И наконец, для северо-западного сектора на огибающей выделяются три главных отрезка, которым соответствует постепенное увеличение эффективной добротности от 90 ($t = 11\text{--}27$ с) до 680 ($t = 76\text{--}100$ с). В целом в интервале 16–60 с наиболее высокое поглощение наблюдается для юго-восточного сектора, а самое слабое – для северо-западного.

На рис. 3 представлены огибающие коды, построенные по записям станции KNDC. Восточному сектору, для которого обработаны записи взрывов на карьере Котур-Булак, соответствует очень слабое затухание коды на временах $t < 22$ с и $t > 70$ с ($Q_s \sim 2000$). Участок более крутого затухания амплитуд в коде выделяется на временах $t = 22\text{--}70$ с ($Q_s \sim 310$). Для южного сектора в коде выделяются два отрезка слабого падения

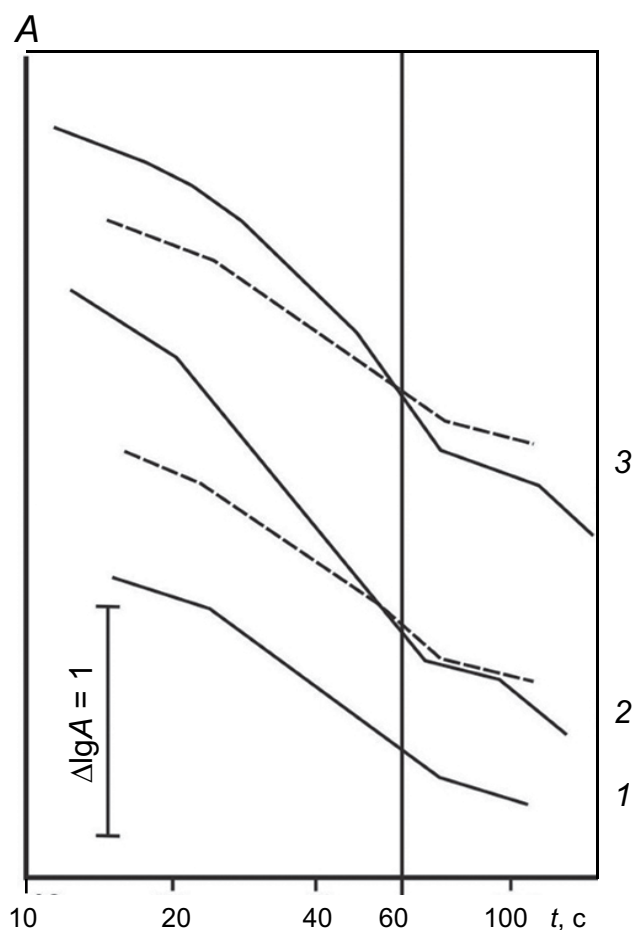


Рис. 3. Огибающие коды по данным станции KNDC

Секторы: 1 – восточный; 2 – южный; 3 – юго-западный. Пунктир – восточный сектор

амплитуд при $t < 20$ с и $t > 65$ с ($Q_s \sim 2000$), а также участок относительно быстрого падения между ними ($Q_s \sim 100$). Для юго-западного сектора общую огибающую можно разделить на три части, характеризующиеся различным наклоном: $t < 28$ с ($Q_s \sim 2000$), $t = 28\text{--}70$ с ($Q_s \sim 120$) и $t > 70$ с ($Q_s \sim 2000$). Отметим, что для восточного и юго-западного секторов трассы лучей идут к северу от Заилийского разлома, а для южного – пересекают разлом.

Рис. 4 иллюстрирует характеристики огибающих коды по данным станции TLG. Для западного сектора, для которого трассы лучей от карьера Котур-Булак пересекают Заилийский разлом, выделяется короткий участок быстрого падения амплитуд ($t = 22\text{--}39$ с, $Q_s \sim 80$) на фоне относительно слабого затухания (величины Q_s варьируются от 300 ($t = 39\text{--}74$ с) до 2000 ($t = 10\text{--}22$ с)). Для юго-восточного сектора достаточно быстрое падение амплитуд соответствует интервалам $t = 15\text{--}40$ с ($Q_s \sim 80$) и $t = 40\text{--}60$ с ($Q_s \sim 150$); на больших временах ($t = 60\text{--}100$ с) добротность резко возрастает ($Q_s \sim 2000$). Близкая форма огибающей соответствует юго-западному сектору; здесь выделяются три отрезка ($t = 15\text{--}45$ с, $t = 45\text{--}60$ с и $t = 60\text{--}100$ с), для которых величины Q_s равны соответственно 85, 160 и 2000. Из данных рис. 4 следует, что в интервале $t = 15\text{--}60$ с для западного сектора поглощение значительно слабее, чем

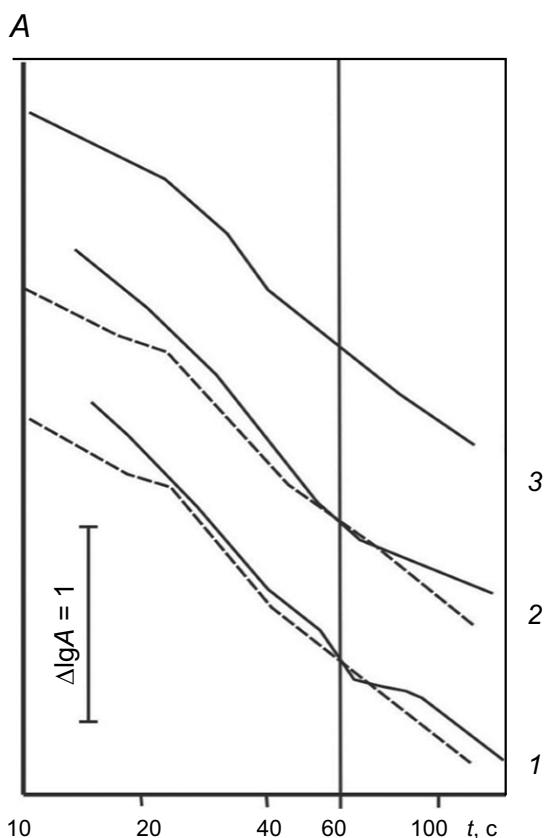


Рис. 4. Огибающие коды по данным станции TLG

Секторы: 1 – юго-восточный; 2 – юго-западный; 3 – западный. Пунктир – западный сектор

для других секторов.

Для станции INP1 получены данные для двух азимутальных секторов (рис. 5). Видно, что на временах $t < \sim 65$ с в обоих случаях выделяются участки повышенного наклона огибающих; при этом наиболее высокое поглощение соответствует юго-восточному сектору для трасс, пересекающих Заилийский разлом (при $t > 25$ с $Q_s \sim 120$), в то время как для западного сектора при $t > 28$ с $Q_s \sim 200$.

Станции KASK соответствует наименьшее количество полученных данных, которые относятся только к юго-восточному сектору (эпицентры в зоне Заилийского разлома и к югу от него). На огибающей для данной станции (рис. 6) выделяется участок быстрого падения амплитуд при $t = 29\text{--}56$ с ($Q_s \sim 90$), разделяющий отрезки слабого затухания ($t = 18\text{--}29$ с, $Q_s \sim 2000$ и $t = 56\text{--}100$ с, $Q_s \sim 740$). Для сравнения на рис. 6 приведена огибающая, построенная по данным станции MDO для эпицентров из той же области, расположенной к юго-западу от указанной станции. Видно, что на малых временах ($t = 18\text{--}29$ с) огибающая для станции KASK идет значительно выше, что соответствует более слабому поглощению по сравнению со станцией MDO.

Разрезы поля поглощения. При построении разрезов мы принимали простейшую двухслойную модель среды с мощностью коры 50 км и средними скоростями S-волн в коре и мантии соответственно 3.5 и 4.6 км/с. Исходя из оценок глубин гипоцентров местных зем-

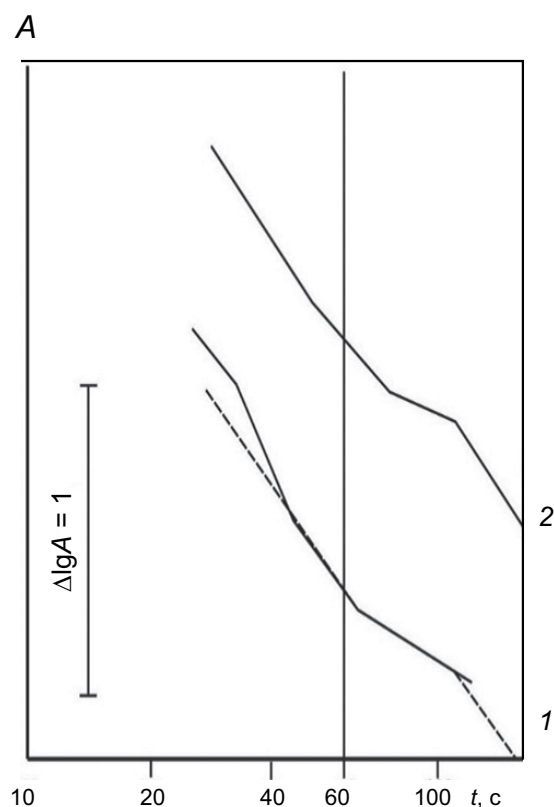


Рис. 5. Огибающие коды по данным станции INP1

Секторы: 1 – юго-восточный; 2 – западный. Пунктир – западный сектор

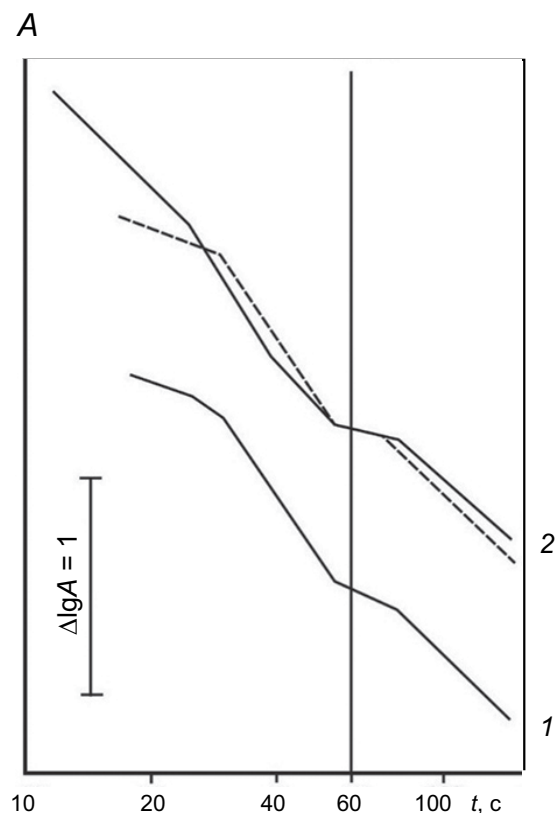


Рис. 6. Огибающая коды по данным станции KASK

1 – юго-восточный сектор; 2 – огибающая коды по данным ст. MDO (юго-западный сектор)

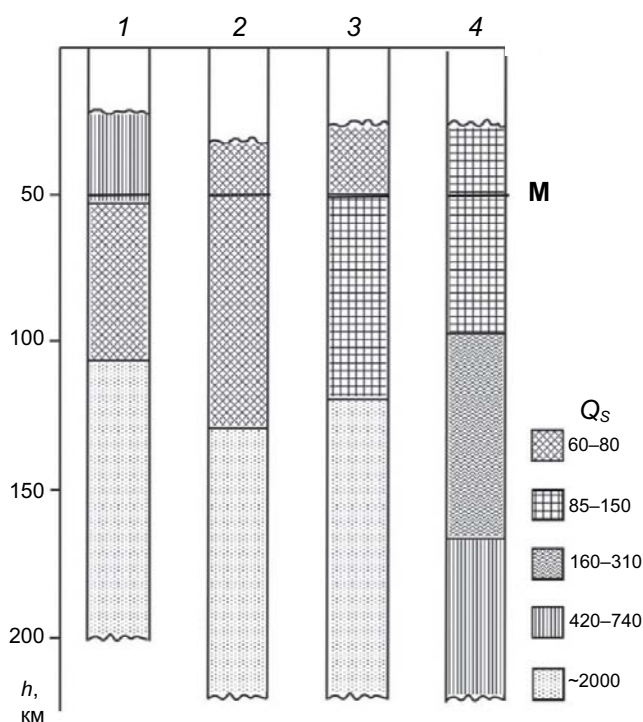


Рис. 7. Разрезы поля поглощения по данным станции MDO

Секторы: 1 – северный; 2 – юго-восточный; 3 – юго-западный; 4 – северо-западный. Здесь и далее на рис. 8–11 «М» – положение границы Моховичича

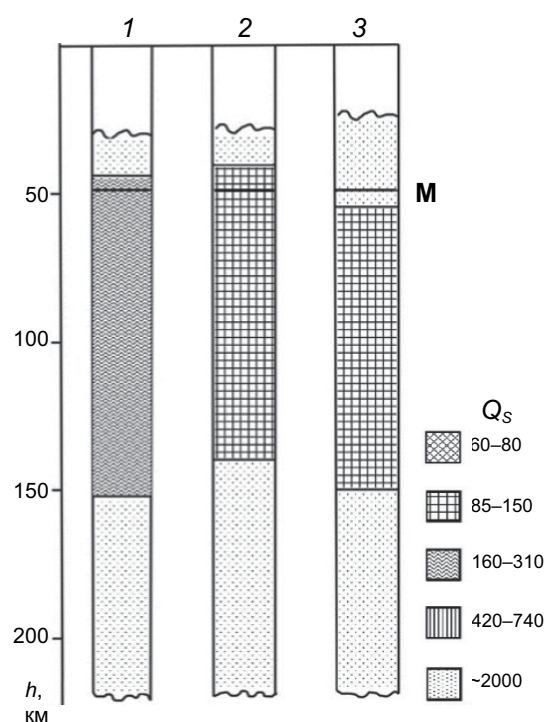


Рис. 8. Разрезы поля поглощения по данным станции KNDC

Секторы: 1 – восточный; 2 – южный; 3 – юго-западный

летрясений [Гальперина и др., 1985], была выбрана средняя глубина 10 км. Глубины границ определялись из простых геометрических соображений в предположении доминирования однократно отраженных волн. Точность определения положения границ слоев различного поглощения составляет ~ 5 км в коре и ~ 10 км в верхах мантии.

На рис. 7 представлены разрезы поля поглощения, построенные по данным станции MDO. Видно, что для северного сектора выделяется слой достаточно высокого поглощения с величиной $Q_s \sim 60$, расположенный в верхах мантии, на глубинах ~ 53–106 км. Поглощение резко уменьшается в средней и нижней коре, а также на глубинах ~ 106–200 км в верхней мантии. Самый мощный слой высокого поглощения в литосфере соответствует юго-восточному сектору (на глубинах ~ 33–129 км величина $Q_s \sim 75$). Для юго-западного сектора наиболее высокое поглощение ($Q_s \sim 65$) наблюдается только в средней и нижней коре. Поглощение существенно падает в верхах мантии, на глубинах ~ 50–120 км ($Q_s \sim 90$) и еще сильнее – на глубинах ~ 120–250 км ($Q_s \sim 2000$). Наиболее слабое поглощение в нижней коре и верхах мантии, на глубинах ~ 26–100 км имеет место в северо-западном секторе ($Q_s \sim 90$ –130). Вместе с тем на относительно больших глубинах (130–220 км) эффективная добротность здесь ниже ($Q_s \sim 200$ –680), чем в других секторах.

На рис. 8 представлены разрезы поля поглощения по данным станции KNDC. Для восточного сектора разрез построен на основании анализа записей взрывов на карьере Котур-Булак, трассы от которого идут к северу

от Заилийского разлома. Этому сектору соответствует достаточно слабое поглощение в низах коры и верхах мантии, на глубинах ~ 45–150 км ($Q_s \sim 310$). Значительно более низкие величины Q_s (~ 100 и 120) получены в верхах мантии соответственно для южного и юго-западного секторов, для которых трассы лучей пересекают Заилийский разлом. В нижней коре, а также на глубинах ~ 150–220 км здесь наблюдается очень слабое поглощение.

Рис. 9 иллюстрирует характеристики разрезов поля поглощения по данным станции TLG. В данном случае для юго-восточного сектора выделяется слой высокого поглощения на глубинах ~ 31–82 км ($Q_s \sim 80$). Поглощение существенно падает в диапазоне глубин 82–129 км ($Q_s \sim 150$) и особенно при $h \sim 130$ –250 км. В юго-западном секторе слой пониженной добротности ($Q_s \sim 85$) соответствует глубинам 31–97 км. Данные для западного сектора получены по записям взрывов на карьере Котур-Булак. Из приведенных на рисунке данных следует, что высокое поглощение ($Q_s \sim 80$) здесь имеет место в диапазоне глубин 44–80 км. Поглощение резко падает на глубинах более 80 км ($Q_s \sim 300$ –550).

На рис. 10 представлены разрезы поля поглощения по данным станции INP1. Видно, что для юго-восточного сектора относительно повышенное поглощение ($Q_s \sim 120$) соответствует диапазону глубин ~ 50–140 км. Для западного сектора в верхах мантии поглощение значительно слабее ($Q_s \sim 200$). На больших глубинах в обоих секторах эффективная добротность резко возрастает.

По данным станции KASK для юго-восточного сек-

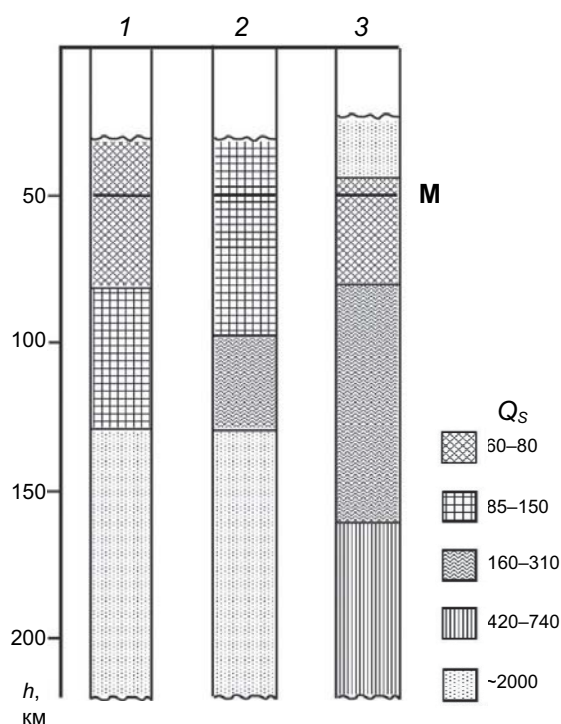


Рис. 9. Разрезы поля поглощения по данным станции TLG

Секторы: 1 – юго-восточный; 2 – юго-западный; 3 – западный

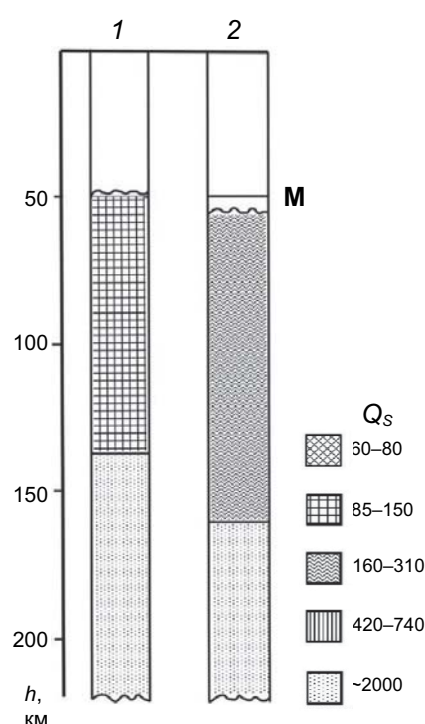


Рис. 10. Разрезы поля поглощения по данным станции INP1

Секторы: 1 – юго-восточный; 2 – западный

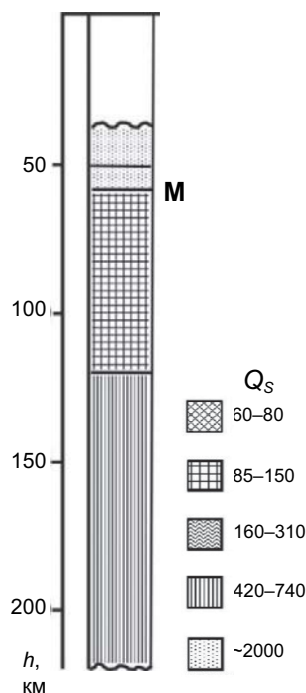


Рис. 11. Разрез поля поглощения по данным станции KASK. Юго-восточный сектор

тора слой относительно высокого поглощения ($Q_s \sim 90$) выделяется в верхах мантии, на глубинах ~ 60 – 120 км (рис. 11). Вместе с тем в нижней коре и на глубинах более 120 км здесь получены достаточно высокие величины Q_s .

Сопоставление данных на рис. 7–11 показывает, что в целом поглощение S -волн в нижней коре и верхах мантии для станций, расположенных к северу от Заилийского разлома (KNDC, INP1 и KASK) значительно слабее, чем для станций MDO и TLG, установленных к югу от разлома.

Карты поля поглощения. Были построены карты поля поглощения в диапазоне глубин 30 – 110 км, где наблюдается наибольший контраст эффективной добротности. Данные приведены отдельно для двух станций, расположенных к югу от Заилийского разлома (MDO и TLG), а также для станций, установленных к северу от него (KNDC, KASK и INP1). На рис. 12 представлены карты для диапазона глубин 30 – 50 км, который соответствует в основном нижней коре.

Видно, что по данным станций MDO и TLG наблюдается повышенное и промежуточное поглощение для трасс, проходящих к югу от Заилийского разлома. В то же время для трасс, пересекающих разлом, имеет место пониженное поглощение. Наиболее высокое поглощение соответствует двум областям, расположенным к юго-востоку и юго-западу от станции MDO. По данным станций KNDC и KASK поглощение S -волн существенно понижено как для трасс, идущих к северу от разлома, так и для трасс, пересекающих его.

Диапазон глубин 50 – 90 км соответствует в основном

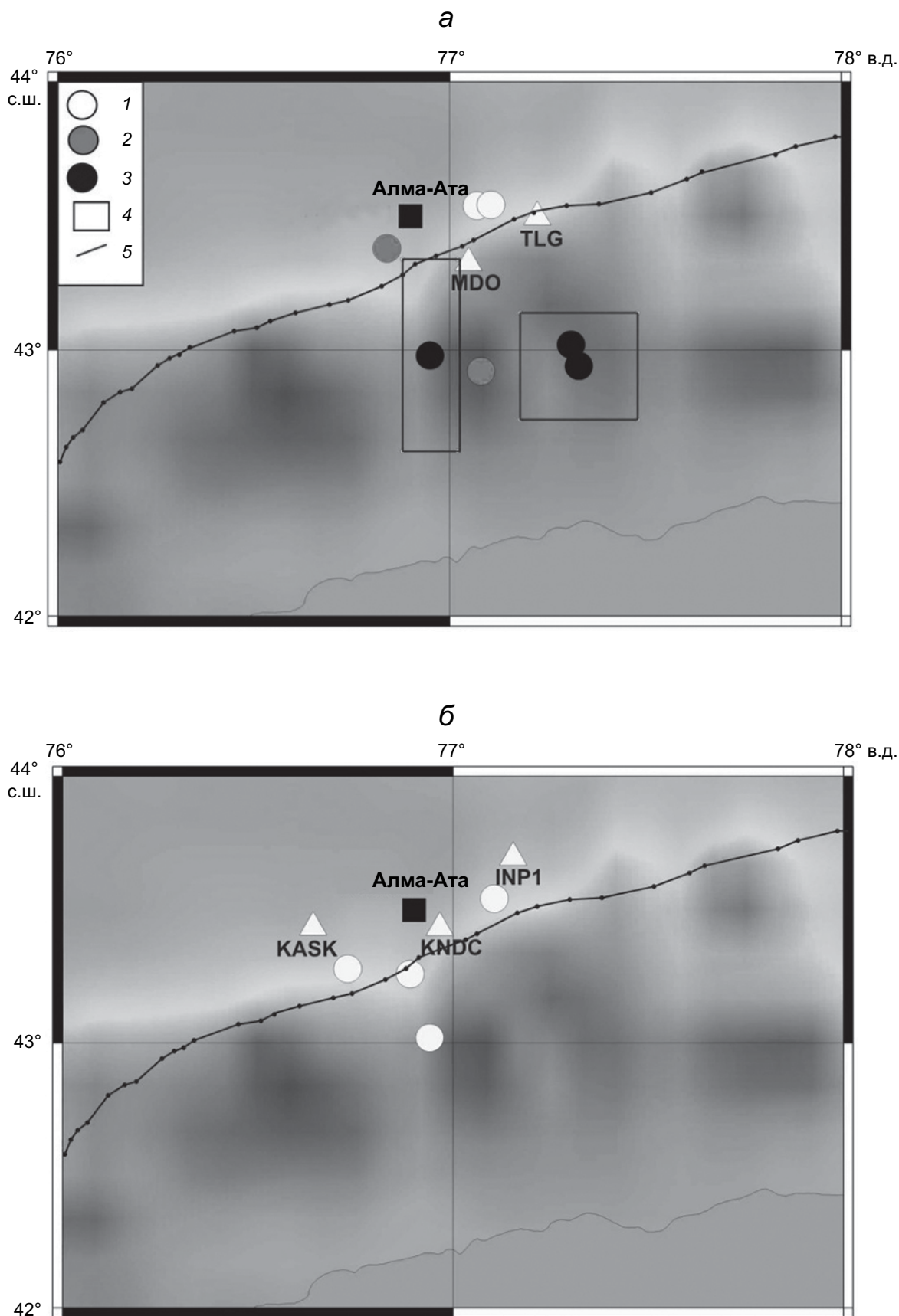


Рис. 12. Карты поля поглощения для диапазона глубин 30–50 км

а – по данным станций MDO и TLG; *б* – по данным станций KNDC, INP1 и KASK

1–4 – поглощение: 1 – пониженное; 2 – промежуточное; 3 – повышенное (значки соответствуют центрам соответствующих областей); 4 – области наиболее высокого поглощения в нижней коре. 5 – Зайлийский разлом

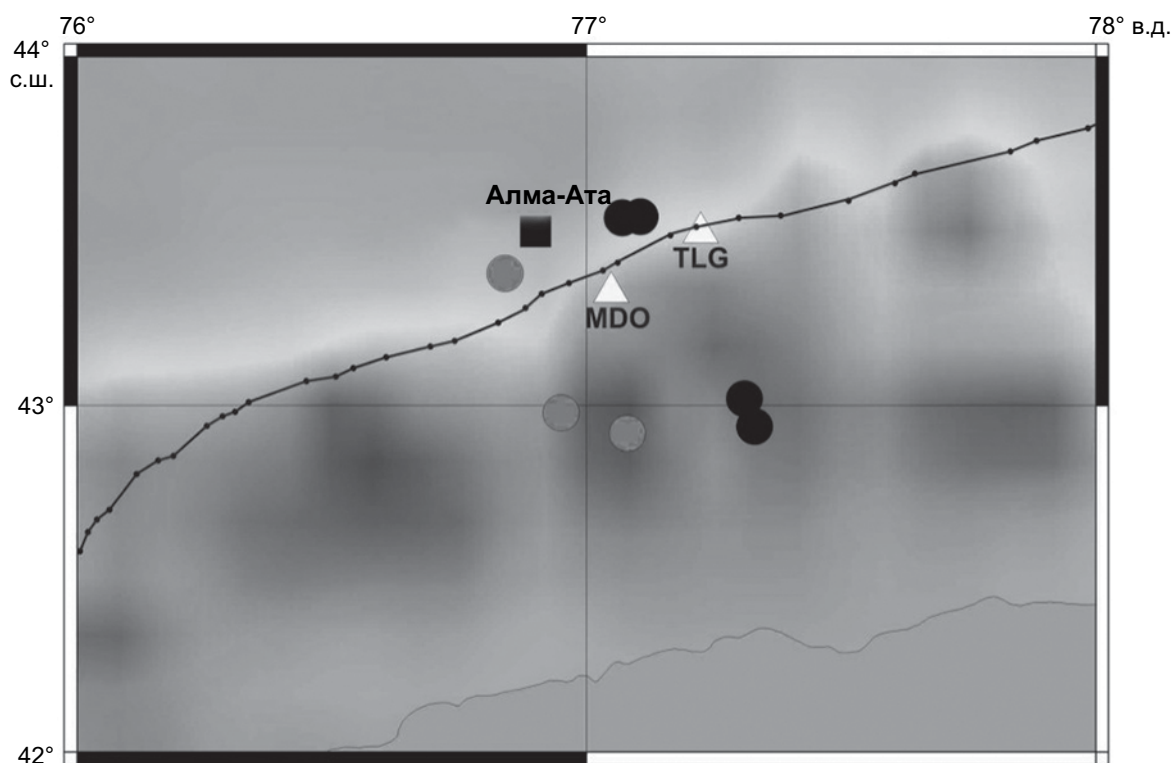


Рис. 13. Карта поля поглощения для диапазона глубин 50–90 км по данным станций MDO и TLG
Ост. обозн. см. на рис. 12

самым верхам мантии (рис. 13). По данным станций MDO и TLG в этом диапазоне для всех трасс наблюдается повышенное и промежуточное поглощение.

В диапазоне глубин 90–110 км по данным станций MDO и TLG наблюдается повышенное и промежуточное поглощение (рис. 14). По данным станций KNDC, KASK и INP1 в диапазоне 50–110 км для трасс, пересекающих разлом, имеет место промежуточное, а для трасс к северу от разлома – в основном пониженное поглощение.

Проведенный анализ показывает, что Зайлийский разлом служит достаточно резкой границей, разделяющей области пониженного (к северу от разлома) и повышенного (к югу от него) поглощения в нижней коре и верхах мантии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отметим сначала, что полученные данные свидетельствуют о существенных вариациях эффективной добротности для каждой из рассматриваемых станций на разных азимутах. Это еще раз говорит о несоответствии экспериментальных данных на частотах около 1 Гц модели формирования коды в результате изотропного рассеяния поперечных волн [Rautian, Khalturin, 1978], поскольку в этом случае огибающие коды должны быть близки по форме на разных азимутах от станций в результате осреднения поглощающих и рассеивающих характеристик больших объемов среды в земной коре и верхней мантии. С другой стороны, экспериментальные данные свидетельствуют об адекватности модели формирования коды на таких

частотах в результате отражений короткопериодных *S*-волн от многочисленных субгоризонтальных границ в литосфере и астеносфере [Копничев, 1985; Aptikaeva, Kopnichen, 1993].

Как показано выше, поглощающие характеристики среды в литосфере резко различаются для трасс к северу и к югу от Зайлийского разлома. Минимальные величины Q_s для станций KNDC, KASK и INP1 и эпицентров, расположенных к северу от разлома, варьируются в диапазоне 120–310, а для станций MDO и TLG и эпицентров, не пересекающих разлом, – в диапазоне 60–80. Отсюда следует, что с Зайлийским разломом связана достаточно резкая граница в литосфере, маркирующая переход от Казахской платформы к горным сооружениям Северного Тянь-Шаня. К северу от разлома литосфера на глубинах до ~ 100 км содержит значительно меньше свободных флюидов, чем к югу от него.

Можно полагать, что именно с этим эффектом связано резкое различие уровней сейсмичности в районах платформы и Северного Тянь-Шаня [Новый..., 1977]. Дело в том, что очень низкая плотность флюидов стимулирует их миграцию в вертикальном направлении. В случае, если флюиды, заполняя поры и трещины, формируют в некотором слое литосферы связную сеть, это приводит к концентрации напряжений на кровле слоя, что может служить триггером при реализации сильного землетрясения [Gold, Soter, 1984/1985]. Миграция флюидов энергетически выгодна, поскольку в конечном счете ведет к уменьшению потенциальной энергии Земли.

Отметим, что значительно более высокое поглоще-

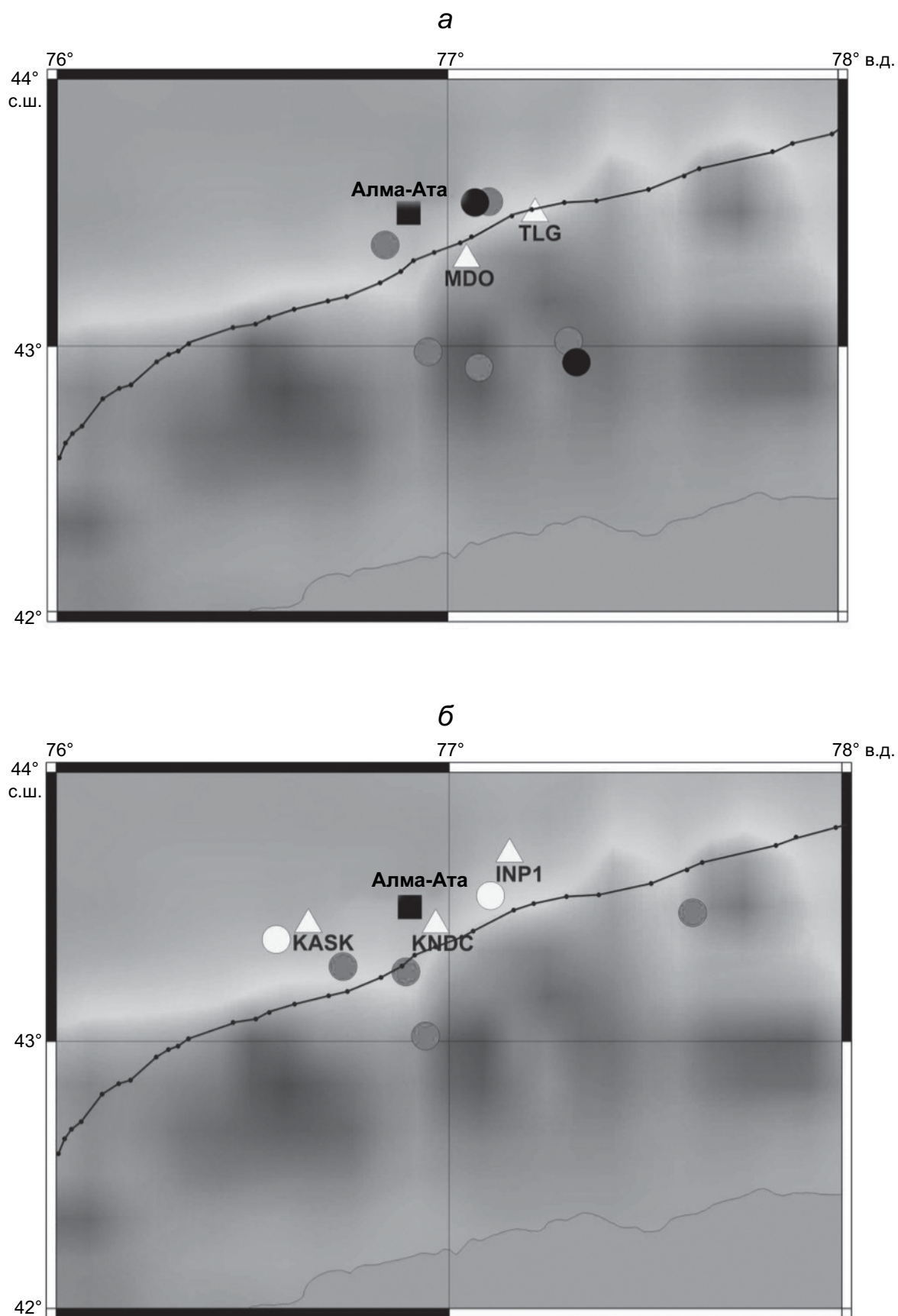


Рис. 14. Карты поля поглощения для диапазона глубин 90–110 км (а) и 50–110 км (б)

а – по данным станций MDO и TLG; б – по данным станций KNDC, INP1 и KASK

Ост. обозн. см. на рис. 12

ние S -волн в нижней коре к югу от Заилийского разлома согласуется с имеющимися данными МТЗ, согласно которым нижняя кора сейсмоактивных районов характеризуется очень высокой проводимостью, что многими авторами также связывается с присутствием соленых флюидов, формирующих связную сеть [Ваньян, Хайндман, 1996; Bielinski et al., 2003]. Кроме того, наши данные позволяют считать, что нижнекоревая аномалия проводимости не связана с наличием тонких пленок графита [Ваньян, Хайндман, 1996], которые не могут существенно повысить поглощение поперечных волн.

Полученные нами новые данные позволяют выделить наиболее опасные участки литосферы в близких окрестностях г. Алма-Ата, в которых наблюдаются самые низкие величины эффективной добротности. В первую очередь к ним относится область к юго-востоку от станции MDO (см. рис. 12). Еще одна такая область находится к юго-западу от станции MDO. Исходя из этого, можно рекомендовать провести более детальные исследования в выделенных областях с целью возможного раннего предупреждения о сильных землетрясениях и принятия мер по безопасности атомного реактора ВВР-К (в частности, установить здесь дополнительные сейсмические станции для более быстрого определения положения эпицентра и оценки энергии сейсмического события).

Подобные методики, основанные на хорошо известных данных о наибольших амплитудах сильных движений, связанных с поперечными волнами [Антикаев, 2012], разрабатываются в последние два десятилетия в разных странах [Nakamura et al., 2009]. Отметим, что наибольшее время запаздывания S -волн из указанных областей при распространении сейсмических колебаний до реактора может составлять около 8 с.

ВЫВОДЫ

Обработаны записи местных землетрясений и карьерных взрывов, которые получены стационарными сейсмическими станциями MDO, KNDC, TLG, KASK, а также временной станцией INP1, установленными в области г. Алма-Ата и ее близких окрестностях.

Сконструированы общие огибающие коды S -волны для указанных станций. Впервые установлено, что форма огибающих коды может существенно варьироваться на разных азимутах от одной и той же станции.

По данным об огибающих коды построены разрезы поля поглощения для рассматриваемых станций. Показано, что к северу от Заилийского разлома поглощение S -волн в литосфере значительно слабее, чем к югу от разлома. Это свидетельствует о большем содержании глубинных флюидов в зоне Заилийского хребта по сравнению с южной окраиной Казахской платформы.

Построены карты поля поглощения в разных диапазонах глубин для всех станций. Выделены зоны наибольшего поглощения к юго-востоку и юго-западу от станции MDO. Рекомендована установка дополнительных станций в этих зонах в целях более быстрого и точного определения координат эпицентра возможного сильного землетрясения и оценки его магнитуды для принятия мер по безопасности атомного реактора ВВР-К.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Антикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование. 2012. 175 с.
- Антикаева О.И. Поле поглощения очаговой области Алтайского землетрясения 2003 г. по огибающим коды афтершоков // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41. № 4. С. 57–66.
- Антикаева О.И. Детальная структура поля поглощения в районе Западного Тянь-Шаня по методу короткопериодной коды // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45. № 2. С. 21–32. <https://doi.org/10.21455/VIS2018.2-2>
- Бакиров А.Б. (ред). Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. Бишкек: Илим. 2006. 115 с.
- Ваньян Л.Л., Хайндман Р.Д. О природе электропроводности консолидированной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11.
- Гальперина Р.М., Нерсесов И.Л., Гальперин Е.И. Сейсмический режим района города Алма-Аты за 1972–1982 гг. М.: ИФЗ АН СССР, 1985. 246 с.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебакин. М.: Наука, 1977. 535 с.
- Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука, 1985. 176 с.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения S -волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня // Физика Земли. 2003. № 5. С. 73–86.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S -волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2010. № 6. С. 34–51.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S -волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010, $M_w = 8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом // Геофизические исследования. 2011. Т. 12, № 3. С. 22–32.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Восточного Тянь-Шаня и их связь с сейсмичностью // Докл. РАН. 2012. Т. 442, № 6. С. 821–824.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S -волн в районе Байкальской рифтовой зоны и их связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 52–59. <https://doi.org/10.7868/S0203030614050058>
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Аномалии высокого поглощения S -волн и кольцевые структуры сейсмичности в литосфере Алтая: Возможная подготовка сильных землетрясений // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15, № 1. С. 57–72.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Анализ кольцевых структур сейсмичности в литосфере Восточного Тянь-Шаня: Возможная подготовка сильных землетрясений // Вестн. КазНИИСА. 2017. № 1. С. 16–31.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Временные вариации поля поглощения S -волн в районе ядерного полигона Лобнор // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97,

- № 3. С. 25–32. <https://doi.org/10.21455/std2018.3-3>
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики поля поглощения короткопериодных S-волн в очаговой зоне сильнейшего землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. ($M_w = 9.0$) // Геофизические процессы и биосфера. 2019а. Т. 18, № 2. С. 16–27. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.2-2>
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения S-волн в литосфере Кавказа и их связь с сейсмичностью // Геофизические процессы и биосфера. 2019б. Т. 18, № 3. С. 67–76. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.3-4>
- Копничев Ю.Ф., Гордиенко Д.Д., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмичных районов // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 49–64.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н., Соколов К.Н. Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения S-волн в районе Невадского ядерного полигона // Физика Земли. 2013. № 6. С. 39–48.
- Aptikaeva O.I. The attenuation field in the focal zone of the 2003 Altai Earthquake, using the coda envelopes of the aftershocks // Seismic Instrument. 2015. V. 51, N 4. P. 367–374. <https://doi.org/10.3103/S0747923915040027>
- Aptikaeva O.I., Kopnichen Yu.F. Space-time variations of the coda wave envelopes of local earthquakes in the region of Central Asia // J. Earthq. Pred. Res. 1993. V. 2, N 4. P. 497–514.
- Bielinski R., Park S., Rybin A., Batalev V., Jun S., Sears C. Lithospheric heterogeneity in the Kyrgyz Tien Shan imaged by magnetotelluric studies // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 15. <https://doi.org/10.1029/2003GL017455>
- Gold T., Soter S. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes // Pageoph. 1984/1985. V. 122. P. 492–530.
- Husen S., Kissling E. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile // Geology. 2001. V. 29, N 9. P. 847–850.
- Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N. High S-wave attenuation anomalies and ringlike seismogenic structures in the lithosphere beneath Altai: Possible precursors of large earthquakes // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52, N 8. P. 806–815. <https://doi.org/10.1134/S0001433816080077>
- Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N. Temporal variations of the S-wave attenuation field in the area of the Lop Nor Nuclear Test Site // Seismic Instruments. 2018. V. 54, N 6. P. 691–694. <https://doi.org/10.3103/S0747923918060063>
- Nakamura H., Horiuchi S., Wu C., Yamamoto S., Rydelek P. Evaluation of the real-time earthquake information system in Japan // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L00B01, <https://doi.org/10.1029/2008GL036470>
- Rautian T.G., Khalturin V.I. The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1978. V. 68. P. 923–948.

Сведения об авторах

КОПНИЧЕВ Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (7272) 956-350. E-mail: yufk777@mail.ru

СОКОЛОВА Инна Николаевна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан. Республика Казахстан, 050020, г. Алма-Ата, ул. Чайкиной, д. 4. Тел.: +7 (7272) 631-330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

MAPPING S-WAVE ATTENUATION FIELD IN THE REGION OF THE NORTH TIEN SHAN USING SEISMOGRAM CODA FOR LOCAL EARTHQUAKES AND QUARRY BLASTS

© 2019 Yu.F. Kopnichenov¹*, I.N. Sokolova²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy of Republic Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

* e-mail: yufk777@mail.ru

Abstract. We have been mapping short-period shear wave attenuation field in the lithosphere of the North Tien Shan. We analyzed seismograms of local earthquakes and quarry blasts, recorded by five stations installed in the area of Almaty city and its close environs (including the place of nuclear reactor WWR-K). Characteristics of common S coda envelopes for various sectors relative to seismic stations are described. Sections of the attenuation field for the stations considered are constructed. Characteristics of the attenuation field to the north of Zaili deep fault zone (at the southern outskirts of Kazakh platform) and to the south of it (in mountain areas) are compared. This allows us to make conclusions on difference of deep-seated fluid content in these areas. We created maps of the attenuation field in various depth ranges and at different azimuths for all stations. We found zones of the highest attenuation, where processes of large earthquake nucleation could occur. Recommendations are given for installation of additional stations for more operative and accurate determining epicenter location of possible earthquake and estimating its magnitude to take measures for the safety of the nuclear reactor WWR-K.

Keywords: *S*-waves attenuation field sections, large earthquakes, deep-seated fluids, nuclear reactor.

About the authors

KOPNICHEV Yuri F. – Dr. Sci. (Phys. and Math.), professor, chief researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. Tel.: +7 (7272) 956-350. E-mail: yufk777@mail.ru

SOKOLOVA Inna N. – Dr. Sci. (Phys. and Math.), leading researcher, Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy of Republic Kazakhstan. Kazakhstan, 050020, Almaty, Chaykinoy st., 4. Tel.: +7 (7272) 631-330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

Cite this article as: Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. Mapping *S*-wave attenuation field in the region of the North Tien Shan using seismogram coda for local earthquakes and quarry blasts, *Geofizicheskie Protsessy i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2019, vol. 18, no. 4, pp. 219–230 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2019.4-18>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55, iss. 11. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>