УДК 550.344 PACS 91.30.-f

НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В РАЙОНАХ ГИМАЛАЕВ, ИНДИЙСКОЙ ПЛИТЫ И ЮЖНОГО ТИБЕТА И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

Ю.Ф. КОПНИЧЕВ¹, И.Н. СОКОЛОВА²

- ¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия
- ² Филиал «Институт геофизических исследований» Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов, Казахстан

Автор для переписки: И.Н. Соколова, e-mail: sokolova@kndc.kz

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.; после доработки 03.06.2021 г. Принята к публикации 07.06.2021 г.

Аннотация. Рассматриваются характеристики поля поглощения короткопериодных S-волн в регионе Южной Азии. Обрабатывались записи местных землетрясений, полученные станцией NIL. Анализировались отношения максимальных амплитуд волн S_n и P_n в диапазоне расстояний 300-1900 км. В общей сложности обработано около 200 записей землетрясений. Установлено, что в целом пониженное поглощение наблюдается в верхах мантии под Индийской плитой (для меридионального профиля, ориентированного по направлению к очаговой зоне Бхуджского землетрясения 26.01.2001 г., M_w = 7.7). Значительно более высокое поглощение соответствует районам Гималаев и особенно Южного Тибета. Показано, что повышенное поглощение наблюдается в очаговой зоне сильнейшего Непальского землетрясения 25.04.2015 г. ($M_w = 7.8$). В то же время пониженное или промежуточное поглощение имеет место в очаговых зонах сильных и сильнейших межплитных событий (M_w = 7.0-8.1), произошедших в районе Гималаев в 1897–1930 гг. С другой стороны, существенно пониженное поглощение соответствует очаговой зоне внутриплитного Бхуджского землетрясения. Новые результаты согласуются с полученными ранее данными, свидетельствующими о концентрации мантийных флюидов под очаговыми зонами перед сильными межплитными землетрясениями, а также о подъеме флюидов в земную кору после этих событий. Выделены области высокого поглощения в районе Западных Гималаев и в центральном Пакистане, где достаточно давно не было сильных землетрясений. Предполагается, что здесь могут идти процессы подготовки сильных сейсмических событий.

DOI: https://doi.org/10.21455/VIS2021.2-3

Ключевые слова: поглощение, S-волны, верхи мантии, сильные землетрясения

Цитирование: Копничев Ю.Ф, Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных *S*-волн в районах Гималаев, Индийской плиты и Южного Тибета и их связь с сейсмичностью // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48, № 2. С. 47–61. https://doi.org/10.21455/VIS2021.2-3

ВВЕДЕНИЕ

Для получения представления о характере распределения флюидов в земной коре во многих работах исследуются характеристики поля поглощения короткопериодных *S*-волн. В ходе таких исследований были, например, обнаружены значимые изменения этих характеристик в районах полигонов проведения подземных ядерных взрывов; эти изменения интерпретировались в связи с миграцией флюидов в результат воздействия на земную кору мощных взрывов [*Копничев, Соколова,* 2001, 2018а; *Копничев и др.,* 2013; *Корпichev, Sokolova,* 2018].

В различных районах мира установлено, что перед многими сильными землетрясениями в литосфере формируются зоны высокого содержания флюидов, которые выделяются по скоростям или поглощению короткопериодных поперечных волн [Husen, Kissling, 2001; Копничев, Соколова, 2003, 2005, 2007, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2018б, 2019б, в, 2020; Одаwа, Некі, 2007; Копничев и др., 2009; Аптикаева, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019а, б, 2020; Аптикаева, Аптикаев, 2016, 2019]. Это позволяет использовать методы картирования полей скоростей или поглощения для обнаружения зон, в которых могут идти процессы подготовки сильных неглубоких землетрясений. Такие исследования особенно важны в связи с регулярно получаемыми новыми данными о катастрофических событиях, которые имели место в тех районах, где они не ожидались исходя из анализа совокупности инструментальных и исторических данных.

За последние 20 лет такие землетрясения произошли, в частности, в районах Суматры (26.12.2004 г., $M_W = 9.1$) и северо-восточной Японии (11.03.2011 г., $M_W = 9.0$). Как известно, эти события привели к грандиозным разрушениям, в том числе аварии на атомной электростанции в префектуре Фукусима, а также к огромному количеству жертв. Пространственно-временные особенности поля поглощения короткопериодных S-волн в районах очаговых зон этих мегаземлетрясений исследованы в работах [Ogawa, Heki, 2007; Konничев, Соколова, 2008, 2019а].

В настоящей работе описываются результаты исследования неоднородностей поля поглощения *S*-волн в высокосейсмичных районах Гималаев, Индийской плиты и Южного Тибета и сопоставления их с сейсмичностью.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно существующим представлениям, 55 млн. лет назад началась конвергенция Индийской и Евразийской плит, которая в настоящее время происходит со скоростью ~40–50 мм/год [Paul et al., 2001; Taylor, Yin, 2009]. В результате столкновения двух континентальных плит сформировались грандиозная горная цепь Гималаи и крупнейшее на планете высокогорное плато Тибет. Средняя толщина коры Индийской плиты – около 45 км, Тибета – около 75 км, при этом граница Мохо в обоих этих районах близгоризонтальна [Monsalve et al., 2006]. Мощность коры Гималаев постепенно возрастает от 45 до 75 км с юга на север на расстоянии ~120 км [Monsalve et al., 2006] (рис. 1).

Мы проводили картирование поля поглощения в трех районах, ограниченных соответственно координатами 23-31° N, 68.5-72.0° Е; 28.0–31.5° N, 81.0–88.5° Е и 24–33° N, 75–91° Е (рис. 2). Начиная с 1897 г. здесь зарегистрировано 11 сильных и сильнейших неглубоких землетрясений с $M_W \ge 7.0$. Очаги подавляющего большинства событий расположены в районе Гималаев и на северной и западной окраинах Индийской плиты. При этом наиболее сильные землетрясения произошли 12.06.1897 г. (Ассамское, $M_{W} = 8.1$) и 15.01.1934 г. (Бихар-Непальское, $M_{W}^{''} = 8.0$). Последние достаточно сильные события (в районе Непала) зарегистрированы 25.04.2015 г. ($M_W = 7.8$) и 12.05.2015 г. (афтершок, $M_w = 7.3$).

Следует отметить, что в районе Гималаев регистрируется также относительно глубокофокусная сейсмичность (в нижней коре, на глубинах до ~75 км). В то же время в южной части Тибетского плато регистрируются еще более глубокие события (в верхах мантии, на глубинах 75–100 км) [Monsalve et al., 2006]. Вместе с тем к северу от этой области наибольшие глубины очагов землетрясений резко уменьшаются (до ~50 км).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Анализировались записи землетрясений, полученные станцией NIL в 1995–2016 гг. на эпицентральных расстояниях $\Delta = 300-1900$ км. В общей сложности обработано около 200 записей землетрясений на глубинах до 33 км с магнитудами M = 4.0-5.5.

Методика картирования поля поглощения связана с анализом отношений максимальных амплитуд в группах S_n и P_n (параметра $\lg(A_{S_n}/A_{P_n})$, который для краткости будем обозначать как S_n/P_n). В работах [Molnar, Oliver, 1969; Konнuчев, Аракелян, 1988; Kaaзик и др., 1990] получены данные, свидетельствующие о том, что группа S_n сформирована поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии. Заметим, что при использовании записей одной станции

Вопросы инженерной сейсмологии 2021. т. 48. №2

48



Рис. 1. Одномерные модели поля скоростей для области, ограниченной координатами 85–89° Е *а* – район Непала (между 26° и 28° N); б – район Южного Тибета (между 28° и 30° N) [*Monsalve et al.*, 2006]. Пунктир – модель, использованная для предварительного определения координат землетрясений; сплошная линия – модель с минимальной погрешностью



Рис. 2. Карта района исследований

1-2 – эпицентры сильных землетрясений ($1 - M = 7.0 - 7.9, 2 - M \ge 8.0$); 3 - станция NIL; 4 - районы, в которых проводилось картирование поля поглощения

величина указанного параметра служит мерой поглощения *S*-волн в нижней коре и верхах мантии в области эпицентра. При анализе данных наибольший интерес представляют области с относительно низкими величинами S_n/P_n , которые часто связаны с подготовкой и реализацией сильных землетрясений [Копничев и др., 2009; Копничев, Соколова, 2012, 2016, 2020].

Необходимо отметить, что низкие величины параметра S_n/P_n могут быть связаны не только с повышенным поглощением S-волн, но и с особенностями поля скоростей. Так, например, величина S_n/P_n может резко падать в диапазоне эпицентральных расстояний ~1000-1200 км вследствие суммарного эффекта попадания волн S_{_} в верхнемантийный волновод и фокусировки волны P_n (или близкой к ней P). Вместе с тем, как видно на рис. 3, в районе Индийской плиты на таких расстояниях величина S_n/P_n уменьшается незначительно. Кроме того, в работах [Копничев, Соколова, 2016, 2020] показано, что в районах Алтая, а также Туркмении и северо-восточного Ирана в указанном диапазоне расстояний величина S_n/P_n даже возрастает.

В то же время простые оценки показывают, что при величине добротности $Q_s \sim 50$, которая достаточно часто наблюдается на частотах ~1 Гц в нижней коре и верхах мантии сейсмоактивных районов [Бакиров, 2006; Копничев, Соколова, 2019в]), амплитуда волны S_и может уменьшаться почти в 4 раза на отрезке трассы длиной ~100 км. Важно также заметить, что еще в работе [Molnar, Oliver, 1969] было проведено крупномасштабное картирование верхней мантии всего земного шара и была установлена четкая корреляция низких величин параметра *S_n*/*P_n* с вулканическими зонами. Впоследствии в работе [Al-Damegh et al., 2004] были детально исследованы характеристики поля поглощения в районе Аравийской плиты и ее окрестностей по амплитудам волн S_и. Было обработано около 2400 сейсмограмм, полученных 20 цифровыми станциями в диапазоне расстояний ~200-2000 км. В результате установлена тесная связь зон высокого поглощения поперечных волн с областями неоген-четвертичного вулканизма (независимо от эпицентрального расстояния при пересечении таких областей).

При этом в [Al-Damegh et al., 2004] не было найдено указаний на существование зон тени для группы S_n . Отсюда следует, что волновод для короткопериодных поперечных волн в верхней мантии не имеет глобального распространения. Кроме того, авторы указанной работы не обнаружили и эффектов фокусировки волн S_n , которые должны проявляться в импульсивном характере записей; вместе с тем они указывают, что эти волны представляют собой

Вопросы инженерной сейсмологии 2021. т. 48. №2

50



Рис. 3. Зависимость параметра S_n/P_n от эпицентрального расстояния: 1 - для района Индийской плиты; <math>2 - для района Гималаев

размытые цуги колебаний длительностью до 2 мин (это следует и из рис. 4, 5, 6, а также из большого числа других публикаций). Отметим, что данный эффект связан с горизонтальной неоднородностью верхней мантии, а также с мелкомасштабными неоднородностями, которые «размывают» импульсивную форму сейсмограмм [Копничев, 1985].

Исходя из этого, многими авторами в течение нескольких десятков лет проводится детальное исследование неоднородностей поля поглощения в верхах мантии по характеристикам волн S_n в различных сейсмоактивных районах [Ni, Barazangi, 1983; Копничев, Аракелян, 1988; Furumura, Kennett, 2001; Zhao et al., 2003; Копничев, Соколова, 2012, 2014, 2016, 2020; и др.].

При картировании поля поглощения нами сначала строятся зависимости параметра S_n/P_n от расстояния и определяются уравнения регрессии. После этого находятся отклонения индивидуальных величин S_n/P_n от корреляционных зависимостей. Большие положительные отклонения соответствуют пониженному поглощению S-волн, большие отрицательные – повышенному, а небольшие отклонения разного знака – промежуточному поглощению. Параметр S_n/P_n используется для нормировки, поскольку волны S_n и P_n распространяются близкими трассами [Storchak et al., 2003].

Поглощение S-волн существенно зависит от частоты, поэтому при анализе записей применялась узкополосная фильтрация (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы [Konничев, 1985]). Кроме того, для минимизации эффекта азимутальной направленности излучения волн P и S проводилось осреднение величин S_n/P_n для близких эпицентров (как правило, для площадок с линейными размерами несколько десятков километров). Отметим, что такая процедура позволяет дополнительно уменьшить вклад неустойчивых эффектов фокусировки волн P_n .

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для удобства изложения рассмотрим сначала данные для района Гималаев, для которого обработано наибольшее количество записей землетрясений.

Гималаи. На рис. 4 показаны примеры сейсмограмм землетрясений из района Гималаев. Видно, что на расстоянии $\Delta \sim 300$ км уровень

Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова



Рис. 4. Примеры сейсмограмм землетрясений из района Гималаев

l-13.10.2000г., 32.63° N, 76.23° E, h=33км, $\Delta=299$ км; 2-27.05.2003г., 30.38° N, 79.09° E, h=33км, $\Delta=664$ км; 3-28.07.2012г., 29.85° N, 80.60° E, h=23км, $\Delta=812$ км; 4-22.02.1998г., 28.45° N, 85.44° E, h=33км, $\Delta=1295$ км. Показаны моменты вступлений волн P_{μ}, S_{μ} и L_{σ}



Рис. 5. Примеры сейсмограмм землетрясений из района Индийской плиты

l-04.04.1995 г., 28.15° N, 71.60° Е, h=20 км, $\Delta=630$ км; 2-26.01.2001 г., 23.24° N, 70.19° Е, h=10 км, $\Delta=1192$ км

группы S_n в несколько раз выше уровня P_n . По мере увеличения расстояния величина S_n/P_n в общем падает, так что при $\Delta \sim 1300$ км она становится отрицательной. Отметим, что записях 1-3 доминирует коровая группа L_g , тоглда как на записи 4 она практически «тонет» в коде S_n . Рис. 7 иллюстрирует зависимость параметра S_n/P_n от эпицентрального расстояния. Величина S_n/P_n существенно падает при возрастании Δ ; корреляционная зависимость описывается выражением

$$S_n/P_n \approx 0.84 - 0.00071 \cdot \Delta$$
 (км), (1) коэффициент корреляции $r = -0.90$.

Вопросы инженерной сейсмологии 2021. т. 48. №2 Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районах Гималаев...





l-27.10.2004г., 30.85° N, 81.19° E, h=10 км, $\Delta=808$ км; 2-25.04.2015г., 28.39° N, 87.32° E, h=10 км, $\Delta=1461$ км



Рис. 7. Зависимость параметра S_n/P_n от эпицентрального расстояния для района Гималаев

На рис. 8 представлена карта поля поглощения S-волн в литосфере Гималаев и небольшой области на северо-восточной окраине Индийской плиты. При построении карты здесь (а также на рис. 9 и 11) принималось, что промежуточное поглощение соответствует диапазону $\Delta S_n/P_n = \pm 0.10$. Из карты следует, что поле поглощения в рассматриваемом районе характеризуется существенной неоднородностью. На крайнем северо-западе выделяется пятно пониженного поглощения, примыкающее к очагу сильнейшего землетрясения 04.04.1905 г. ($M_W = 7.8$). Юго-восточнее (до 80° E) прослеживается протяженная полоса повышенного и частично промежуточного поглощения, с которой не связаны очаги сильных землетрясений (по крайней мере зарегистрированных начиная с 1900 г.). В то же время к востоку от этой полосы выделяется небольшая область повышенных величин $\Delta S_{\mu}/P_{\mu}$, с которой связан очаг сильного землетрясения 28.08.1916 г. ($M_W = 7.2$). Далее к юго-востоку (до 82.5° Е) проявляются небольшие области различного поглощения.

Далее к востоку от 84° Е выделяется довольно крупная область повышенного и промежуточного поглощения, в которую попадает западная часть очаговой зоны сильного Непальского землетрясения 25.04.2015 г. $(M_w = 7.8)$ вместе с его эпицентром. Вместе с тем восточной части очаговой зоны, в которой находится эпицентр сильнейшего афтершока Непальского землетрясения $(M_w = 7.3)$, соответствует пониженное поглощение. Еще восточнее (к востоку от 87° Е) расположена обширная область в основном промежуточного и частично пониженного поглощения. Отметим, что к этой области примыкают очаги двух сильнейших землетрясений 12.06.1897 г. и 15.01.1934 г. с магнитудами 8.1 и 8.0 соответственно, а также двух более слабых 08.07.1918 г. и 02.07.1930 г. $(M_w = 7.5$ и 7.1 соответственно).

Индийская плита. Здесь рассмотрены данные для сравнительно узкой области, вытянутой в меридиональном направлении, на юге которой находится очаговая зона сильного Бхуджского землетрясения 26.01.2001 г. ($M_w = 7.7$, см. рис. 2). На рис. 5 приведены примеры записей землетрясений, произошедших в указанной области. Видно, что на обеих записях на расстояниях ~630 и ~1200 км уровни амплитуд в группе S_n в несколько раз выше, чем в группе P_n . Кроме того, на этих записях доминирует коровая группа L_o .



Рис. 8. Неоднородности поля поглощения в районе Гималаев

1–3 – поглощение: *1* – пониженное, *2* – промежуточное, *3* – повышенное; *4* – зона афтершоков землетрясения 25.04.2015 г. Остальные обозначения – см. рис. 2



На рис. З представлена зависимость параметра S_n/P_n от расстояния в рассматриваемой области (для сравнения показана та же зависимость для района Гималаев). В данном случае корреляционная зависимость описывается выражением

$$S_n/P_n \approx 1.08 - 0.00068 \cdot \Delta$$
 (KM), (2)

r = -0.90.

Сопоставление с рис. 7 показывает, что величины S_n/P_n в районе Индийской плиты в целом

идут значительно выше и убывают с расстоянием несколько слабее, чем в районе Гималаев.

На рис. 9 показана карта поля поглощения в районе Индийской плиты (рассмотрены отклонения от корреляционной зависимости (2)). Из этой карты следует, что повышенное поглощение наблюдается главным образом в северной части района. Здесь выделяется полоса повышенного и промежуточного поглощения, вытянутая вдоль меридиана 70° *Е*. Очаговой зоне Бхуджского землетрясения 26.01.2001 г.



Рис. 9. Неоднородности поля поглощения в районе Индийской плиты *1*, 2 – землетрясения: 1 - M = 6.5 - 6.9, $2 - M \ge 7.0$. Остальные обозначения – см. рис. 8

соответствует в основном промежуточное поглощение. Важно отметить, что при рассмотрении отклонений величин $S_n/P_n(\Delta)$ от корреляционной зависимости (1), соответствующей Гималаям, практически для всего района (за исключением двух значений) будет наблюдаться только пониженное поглощение.

Тибет. На рис. 6 представлены примеры записей землетрясений из района Южного Тибета. На записи *l*, полученной на расстоянии ~800 км, уровень группы S_n выше, чем группы P_n , а амплитуды волн S_n и L_g близки между собой. Запись 2 соответствует расстоянию ~1460 км. На ней четко выделяется группа S_n , уровень которой почти в три раза ниже, чем у P_n , при этом волна L_g «тонет» в коде S_n .

На рис. 10 представлена зависимость параметра S_n/P_n от расстояния для района Южного Тибета. Видно, что разброс данных здесь значительно выше, чем на рис. 3 и 7, при этом корреляционная зависимость описывается выражением

$$S_n / P_n \approx 0.55 - 0.00055 \cdot \Delta$$
 (KM), (3)

r = -0.77.

На рис. 10, кроме того, проведено сопоставление зависимостей $S_n/P_n(\Delta)$ для всех трех рассматриваемых районов Южной Азии, а также района Байкальской рифтовой зоны (БРЗ [Копничев, Соколова, 2014]). Видно, что поглощение короткопериодных S-волн в районе Индийской платформы значительно выше, чем в районе БРЗ, однако ниже, чем в районах Гималаев и Тибета.

Рис. 11 иллюстрирует неоднородности поля поглощения в районе Южного Тибета. Интересно, что на севере рассматриваемого района наблюдается только пониженное и промежуточное поглощение, тогда как южной части района соответствует повышенное и частично промежуточное поглощение. При этом самые низкие величины параметра $\Delta S_n/P_n$ связаны с полосой северо-западного простирания, где, по данным работы [Monsalve et al., 2006], зарегистрированы наиболее глубокие землетрясения (h = 70-100 км).



Рис. 10. Сопоставление зависимостей параметра S_n/P_n от расстояния для разных районов *I* – Южный Тибет; *2* – Гималаи; *3* – Индийская плита; *4* – БРЗ; *5* – индивидуальные величины S_n/P_n для района Южного Тибета

Рис. 11. Неоднородности поля поглощения в районе Южного Тибета. Пунктир – область глубокофокусной сейсмичности [*Monsalve et al.*, 2006]. Остальные обозначения – см. рис. 5

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о сравнительно слабом поглощении короткопериодных S-волн в литосфере Индийской плиты. Это согласуется с выводами о пониженном содержании глубинных флюидов в литосфере древних платформ [Ваньян, Хайндман, 1996; Kumar et al., 2007]. Вместе с тем из рис. 10 следует, что поглощение в верхах мантии Индийской плиты существенно сильнее, чем в районе БРЗ. Это, с одной стороны, может говорить об относительно эффективном «осушении» верхов мантии в районе БРЗ [Копничев, Соколова, 2014], литосфера которой находится в условиях близгоризонтального растяжения, а с другой - согласуется с данными об аномально тонкой литосфере Индийской плиты по сравнению с другими древними платформами [*Kumar et al.*, 2007].

Согласно существующим представлениям, литосфера Индийской плиты в результате ее столкновения с континентом Евразии погружается под Гималаи [Paul et al., 2001; Kumar et al., 2007]. По аналогии с океаническими зонами субдукции можно полагать, что при этом происходит дегидратация пород плиты, что приводит к их охрупчиванию [Yamasaki, Seno, 2003], которое позволяет объяснить

относительно глубокофокусную сейсмичность в районе Южного Тибета и частично Высоких Гималаев. Существенно, что сейсмичность регистрируется не только в нижней коре, но и в верхах мантии. При этом, как следует из рис. 11, области наиболее глубоких событий в районе Южного Тибета соответствует самое высокое поглощение S-волн. Это может свидетельствовать о субдукции не только коры, но и частично мантийной литосферы Индийской плиты (судя по наибольшей глубине гипоцентров, слоя мощностью не более 20–25 км).

Дегидратация обусловливает выделение свободной воды, существование которой и служит причиной относительно повышенного поглощения короткопериодных S-волн в верхах мантии Гималаев и Южного Тибета. Вместе с тем наблюдается резкое уменьшение глубин очагов землетрясений при дальнейшем перемещении на север, в район Центрального Тибета [Monsalve et al., 2006], что, скорее всего, связано с близгоризонтальным положением границы Мохо в Тибете, которое препятствует дальнейшей дегидратации материала коры и верхов мантии. Этот же эффект, вероятно, позволяет объяснить сравнительно слабое различие поглощения S-волн в верхах мантии Гималаев и Южного Тибета.

Из рис. 5 и 8 следует, что зонам сильных событий в районах Гималаев и северо-восточной окраины Индийской плиты, произошедших до 1930 г., соответствует пониженное или промежуточное поглощение. В то же время относительно повышенное поглощение наблюдается в зоне недавнего Непальского землетрясения 25.04.2015 г. Эти данные согласуются со сделанными в работах [Husen, Kissling, 2001; Ogawa, Некі, 2007; Копничев, Соколова, 2003, 2005, 2010; Копничев и др., 2009] выводами о концентрации глубинных флюидов в нижней коре и верхах мантии в зонах многих готовящихся сильных землетрясений и подъеме их в течение нескольких десятков лет после этих событий. Отметим, что подъем флюидов после сильных землетрясений служит отражением процессов самоорганизации геологических структур, в конечном счете ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли [Летников, 1992].

В то же время очаговой зоне внутриплитного Бхуджского землетрясения соответствует пониженное поглощение. Это не противоречит полученным ранее данным об относительно низком содержании флюидов в литосфере под зонами сильных внутриплитных событий [Konнuчев, Соколова, 2013].

Особый интерес представляет достаточно крупная область повышенного поглощения в районе Западных Гималаев, между 77 и 80° Е (см. рис. 5). Существование такой области свидетельствует о высоком содержании флюидов в литосфере, что может говорить о подготовке здесь сильного корового землетрясения. В этой связи необходимо отметить, что начиная с 1900 г. здесь не зарегистрировано событий с $M_w \ge 7.0$.

Еще одна сравнительно небольшая область повышенного и промежуточного поглощения выделена на западной окраине Индийской плиты. Эта область расположена между очагами четырех довольно сильных землетрясений с M = 6.5, произошедших в 1919, 1928 и 1966 гг. (см. рис. 8). После 1966 г. прошло более полувека, поэтому здесь (на территории Пакистана) также можно ожидать подготовку нового сейсмического события.

В районе Южного Тибета также выделено одно малое пятно повышенного поглощения между 87.0 и 87.5° Е. Однако недостаточное количество данных не позволяет предполагать подготовку сильного землетрясения в этой области.

В то же время, по нашему мнению, следует обратить особое внимание на анализ различных геофизических и геохимических данных в указанных выше областях Гималаев и Индийской плиты в целях возможного среднесрочного прогноза сильных землетрясений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено по госзаданию Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Аптикаева О.И. Поле поглощения очаговой области Алтайского землетрясения 2003 г. по огибающим коды афтершоков // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41, № 4. С. 57–66.
- Аптикаева О.И. Поле поглощения поперечных волн и сейсмичность в сейсмогенной зоне Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2016. № 66. С. 149–153.
- Аптикаева О.И. Сейсмическая активность и строение земной коры и верхней мантии очаговых зон сильнейших землетрясений Алтая и Саян // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44, № 2. С. 17–34. https://doi.org/10.21455/VIS2017.2-2
- Аптикаева 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
- Аптикаева О.И. Особенности Ванских землетрясений 1976 и 2011 гг., роевая сейсмичность и поле поглощения S-волн // Геология и геофизика Юга России. 2019а. Т. 9, № 3. С. 105–118. https:// doi.org/10.23671/VNC.2019.3.36475
- Аптикаева О.И. Поле поглощения S-волн и сейсмотектоника Восточной Анатолии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019б. Т. 46, № 3. С. 32–49. https://doi.org/10.21455/VIS2019.3-3
- Аптикаева О.И. Некоторые результаты изучения поля поглощения S-волн на Кавказе методом короткопериодной коды // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47, № 3. С. 104–125. https:// doi.org/10.21455/VIS2020.3-6
- Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф. Затухание сейсмических колебаний от умеренных землетрясений зоны Вранча // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43, № 1. С. 62–80.
- Аптикаева О.И., Аптикаев С.Ф. Поле поглощения *S*-волн в ближнем районе площадок атомных электростанций по данным сейсмического мониторинга (на примере АЭС «Аккую», Турция) // Геофизические исследования. 2019. Т. 20, № 2. С. 56–72. https://doi.org/10.21455/gr2019.2-5
- 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 консолидированной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11.

Вопросы инженерной сейсмологии 2021. т. 48. №2

58

- 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.
- Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука. 1985. 176 с.
- Копничев Ю.Ф., Аракелян А.Р. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 77–92.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственновременные вариации структуры поля поглощения поперечных волн в районе Семипалатинского полигона // Физика Земли. 2001. № 11. С.73–86.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственновременные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня // Физика Земли. 2003. № 7. С. 35–47.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Подъем мантийных флюидов в районах очагов сильных землетрясений и крупных разломных зон: геохимические свидетельства // Вестн. НЯЦРК. 2005. Вып. 2. С. 147–155.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в литосфере Центрального Тянь-Шаня // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 54–70.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики сейсмичности и поля поглощения s-волн в районе очага Суматринского землетрясения 26 декабря 2004 г. // Докл. РАН. 2008. Т. 422, № 5. С. 672–676.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центральной Азии и их связь с сейсмичностью // Докл. РАН. 2011. Т. 437, № 1. С. 97–101.
- 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. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов // Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 1. С. 5 15.
- 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. Временные вариации поля поглощения S-волн в районе ядерного полигона Лобнор // Наука и технологические

разработки. 2018а. Т. 97, № 3. С. 25–32. https:// doi.org/10.21455/std2018.3-3

- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных S-волн в районе Гиндукуша и их связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 20186. № 6. С. 70–79. https:// doi.org/10.1134/S0203030618060056
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики поля поглощения короткопериодных S-волн в очаговой зоне сильнейшего землетрясения Toхоку 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., Соколова И.Н. Картирование поля поглощения S-волн по коде записей местных землетрясений и карьерных взрывов в районе Северного Тянь-Шаня // Геофизические процессы и биосфера. 2019в. Т. 18, № 4. С. 241–252. https:// doi.org/10.21455/GPB2019.4-20
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики поля поглощения короткопериодных *S*-волн в литосфере Туркмении и северо-восточного Ирана и их связь с сейсмичностью // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 1. С. 56–66.
- 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. https://doi.org/10.7868/S0002333713060082
- *Летников* Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 229 с.
- Al-Damegh Kh., Sandvol E., Al-Lazki A., Barazangi M.
 Regional seismic wave propagation (Lg and Sn) and Pn attenuation in the Arabian Plate and surrounding regions // Geophys. J. Int. 2004. V. 157, N 2. P. 775–795.
- *Furumura T., Kennett B.* Variations in regional phase propagation in the region around Japan // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2001. V. 91. P. 667–682.
- Husen S., Kissling E. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile // Geology. 2001. V. 29, N 9. P. 847–850.
- Kopnichev 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
- *Kumar P., Yuan X., Kumar M., Kind R., Li X., Chadha R.* The rapid drift of the Indian tectonic plate // Nature. 2007. V. 449. P. 894–897.

- *Molnar P., Oliver J.* Lateral variations of attenuation in the upper mantle and discontinuities in the lithosphere // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 2648– 2682.
- Monsalve G., Sheehan A., Schulte-Pelkum V., Rajaure S., Pandey M., Wu F. Seismicity and one-dimensional velocity structure of the Himalayan collision zone: earthquakes in the crust and upper mantle // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B10301.
- Ni J., Barazangi M. High-frequency seismic wave propagation beneath the Indian shield, Tibetan plateau and surrounding regions: High uppermost mantle velocities and efficient *Sn* propagation beneath Tibet // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1983. V. 72. P. 665–689.
- Ogawa R., Heki K. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L06313. https:// doi.org/10.1029/2007GL029340

- Paul J., Bürgmann R., Gaur V.K., Bilham R., Larson K.M., Ananda M.B., Jade S., Mukal M., Anupama T.S., Satyal G., Kumar D. The motion and active deformation of India // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28., Iss. 4. P. 647–650. https://doi.org/10.1029/2000GL011832
- Storchak D., Schweitzer J., Bormann P. The IASPEI Standard Seismic Phase List // Seismol. Res. Lett. 2003. V. 74, N 6. P. 761–772.
- *Taylor M., Yin A.* Active structures of the Himalayan-Tibetan orogeny and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism // Geosphere. 2009. V. 5, N 3. P. 199–214. https://doi.org/10.1130/GES00217
- Yamasaki T., Seno T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N B4. https://doi.org/ 10.1029/2002JB001918
- Zhao C., Kennett B., Furumura T. Contrasts in regional seismic wave propagation to station WMQ in Central Asia // Geophys. J. Int. 2003. V. 155. P. 44–56.

Сведения об авторах

КОПНИЧЕВ Юрий Федорович – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: yufk777@mail.ru

СОКОЛОВА Инна Николаевна – Филиал «Институт геофизических исследований» Национального ядерного центра Республики Казахстан. Казахстан, 071100, г. Курчатов, площадка Меридиан. E-mail: sokolova@kndc.kz

HETEROGENEITIES OF SHORT-PERIOD S-WAVE ATTENUATION FIELD IN LITHOSPHERE OF THE HIMALAYA, INDIAN PLATE AND SOUTH TIBET AND THEIR RELATION TO SEISMICITY

YU.F. KOPNICHEV¹, I.N. SOKOLOVA²

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

² Branch Institute of Geophysical Research, RSE National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Corresponding author: I.N. Sokolova, e-mail: sokolova@kndc.kz

Abstract. We have been studying characteristics of the attenuation field in the lithosphere of the South Asia. Recordings of local earthquakes, obtained by station NIL were analyzed. We considered ratios of maximum amplitudes of S_n and P_n waves within the distance range of ~300–1900 km. A total number of ~200 earthquake seismograms were processed. It was established that as a whole lower attenuation is observed in the uppermost mantle under the Indian Plate (for meridian profile oriented in direction to the source zone of large Bhuj earthquake of 26/01/2001, $M_w = 7.7$). Considerably higher attenuation corresponds to the regions of the Himalaya and especially South Tibet. It was shown that increased attenuation is observed in the source zone of large and great interplate events ($M_w = 7.0-8.1$), occurred in the Himalaya region in 1897–1930. From the other hand, essentially lowered attenuation corresponds to the source zone of the intraplate Bhuj earthquake. New results agree with earlier obtained data, which testify to mantle fluids concentration below source zones prior to large interplate earthquakes, and also to fluids

ascending into the earth's crust after these events. Zones of high attenuation were picked out in the regions of West Himalaya and central Pakistan, where large earthquakes did not occur for a long time. It is supposed that processes of preparation of large seismic events can proceed there.

Keywords: attenuation, S-waves, uppermost mantle, large earthquakes

About the authors:

KOPNICHEV Yuri Fedorovich – Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. E-mail: yufk777@mail.ru

SOKOLOVA Inna Nikolayevna – Branch Institute of Geophysical Research, RSE National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. Kazakhstan, 071100, Kurchatov, Meridian site. E-mail: sokolova@kndc.kz

Cite this article as: Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. Heterogeneities of short-period *S*-wave attenuation field in lithosphere of the Himalaya, Indian Plate and South Tibet and their relation to seismicity, *Voprosy Inzhenernoi Seismologii* (Problems of Engineering Seismology). 2021. V. 48, No. 2. P. 47–61. [in Russian]. https://doi.org/10.21455/VIS2021.2-3

English translation of the article will be published in *Seismic Instruments*, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), https://link.springer.com/journal/11990