

А. В. Беляшов¹, А. В. Яблоков¹, П. А. Предеин²

Предварительная оценка структурно-скоростного строения Центрального Байкала методом Накамуры

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация
e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. На вертикальных компонентах сейсмограмм некоторых станций Центрального Байкала проявляется волна неизвестной природы, опережающая S-волну на фиксированное для каждой станции время. Указанные станции расположены в пределах кайнозойского осадочного чехла, и неизвестная волна, предположительно, имеет обменную природу, когда на границе кровли фундамента и подошвы осадочного слоя S-волна меняет свой тип на SP. В соответствии с оценочной средней скоростью в осадочном слое в 3.6 км/с для P- и 1.9 км/с для S-волны по разнице времени пробега Ts-Tsp его толщина определена приблизительно 8 км для района дельты реки Селенги и в 2-3 км для окраинных областей. С использованием метода Накамуры проведена оценка глубинной структуры района исследований.

Ключевые слова: Центральный Байкал, метод Накамуры, структурно-скоростное строение

A. V. Belyashov¹, A. V. Yablokov¹, P. A. Predein²

Preliminary assessment of the structural and velocity framework of Central Baikal by the Nakamura method

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Geological Institute of SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation
e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

Abstract. A wave of unknown nature appears on the vertical components of the seismograms of some stations of Central Baikal, which is ahead of the S-wave by a fixed time value for each station. These stations are located within the Cenozoic sedimentary cover, and the unknown wave is presumably of an converted nature – at the boundary of the roof of the foundation and the bottom of the sedimentary layer, the S-wave changes its type to SP. In accordance with the estimated average velocity in the sedimentary layer of 3.6 km/s for the P-wave and 1.9 for the S-wave, its thickness is estimated at 8 km for the delta region of the Selenga River and 2-3 km for marginal areas based on the Ts-Tsp travel time difference. Using the Nakamura method, an assessment of the depth structure of the research area was carried out.

Keywords: Central Baikal, Nakamura method, structural and velocity framework

Введение

Информация о геологическом строении в районе размещения стационарных сейсмических станций важна для оценки станционных поправок с целью правильного определения значений энергетического класса и других динамических параметров землетрясений [1]. В случае размещения станции на мощных нестабильных грунтах (как правило, осадочных), генерирующих резонансные эффекты, необходимо иметь оценку толщины этих отложений. Для станций сей-

смической сети в районе Центрального Байкала геологический разрез описан, в основном, до глубин первых метров [2].

В ходе обработки землетрясений, зарегистрированных в блоке земной коры Центрального Байкала, на сейсмограммах станций «Степной Дворец» (STDB), «Фофоново» (FFNB) и «Заречье» (ZRNB) была обнаружена устойчивая волна неизвестной природы (пример для одного из землетрясений показан на рис.1). Проявляется она на вертикальных компонентах и по времени привязана к S-волне: для всех событий, независимо от эпицентральных расстояний, на станции STDB она опережает S-волну примерно на 2 сек, на FFNB – на 0.7 сек, на ZRNB – на 0.5 сек. Время опережения может немного варьироваться в зависимости от параметров землетрясения: глубины очага и обратного азимута, влияющих на положение точки входа сейсмического луча в осадочную толщу.

Предположительно, эта волна имеет обменную природу – оригинальная S-волна, двигаясь от очага землетрясения вверх к дневной поверхности, на одной из границ, разделяющих среды с резко различными акустическими жесткостями, меняет свой тип на продольный и распространяется в вышележащем слое в виде обменной SP-волны. Подтвердить это предположение можно на примере станции STDB, размещенной в дельте реки Селенги на толще аллювиальных отложений. Селенгинская депрессия характеризуется сложным блоковым строением с мощностью осадков, резко изменяющихся в глубинном диапазоне от 2 до 9 км [3, 4]. Средняя скорость P-волн в этом слое для интервала глубин от 0 до 10 км оценивается в 3.6 км/с [5], скорость S-волн (с учетом повышенного здесь параметра $V_p/V_s=1.9$ [6]) рассчитана в значении 1.9 км/с. Для указанных значений скорости разница во времени пробега между P- (SP-) и S-волной в 2 сек соответствует толщине слоя порядка 8.0 км. Обменообразующей границей, предположительно, служит раздел между породами фундамента и осадочным чехлом.

По геологическим данным [7] на северо-восточном краю этой кайнозойской осадочной толщи на границе с высокометаморфизованными венд-раннепалеозойскими образованиями расположена станция ZRNB (рис. 2). Станция FFNB размещена на юго-восточной окраине осадочного слоя на границе с позднепалеозойскими гранитоидами (в непосредственной близости к пойме р. Селенги).

Если предположить, что описанные выше скоростные параметры прослеживаются в пределах всего осадочного слоя, то с учетом разницы между S- и SP-волной ~ 0.5 сек под станцией ZRNB его толщина оценивается ~ 2.0 км, а для станции FFNB с разницей $T_{sp}-T_s \sim 0.7$ сек - ~ 2.9 км.

Ранее в районе оз. Байкал проводились детальные сейсмические исследования, в том числе и по оценке толщины осадочного слоя [8, 9], но выполнялись они, как правило, по дну оз. Байкал в пределах его акватории.

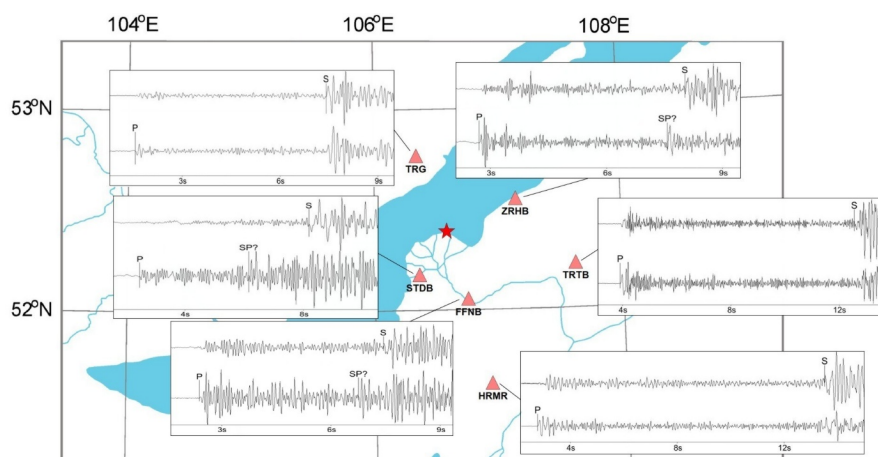


Рис. 1. Пример выделения волны SP на вертикальных компонентах некоторых станций Центрального Байкала (станции обозначены розовыми треугольниками с кодовым названием, красная звезда – эпицентр землетрясения 2003 г. с глубиной около 16 км)

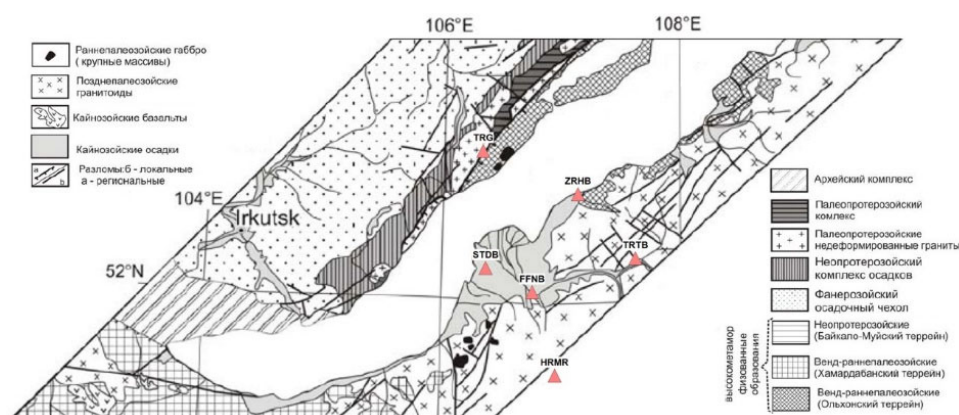


Рис. 2. Фрагмент схемы геологического строения Байкала [5] (розовые треугольники – сейсмические станции с кодовым названием)

Таким образом, цель данной работы – попытаться определить глубинную структуру верхней части геологического разреза в районе сейсмических станций с использованием метода Накамуры [10].

Материалы

Метод Накамуры (метод Н/В) основан на анализе спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент микросейсмического шума [10]. Из Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН по нашему запросу были получены непрерывные сейсмические записи длиной 1 месяц (за февраль 2020 г.) для станций: FFNB, HRMR, STDB, ZRHB (станция TRG не входит в наблюдательную сеть Бурятского филиала, а станция TRTB была закрыта в 2014 г.).

Для полноценного выделения всех частот, особенно в длиннопериодном диапазоне, регистрация данных должна осуществляться, по возможности, на широкополосных сейсмических датчиках, тем не менее, на некоторых станциях за-

действованы короткопериодные датчики. Для усиления сигнала на низких частотах к трехкомпонентным записям применялась процедура низкочастотной деконволюции до 0.01 Гц [11].

Обработка методом Накамуры

Обработка сейсмических данных осуществлялась в рамках следующих этапов:

Отбраковка высокоамплитудных сегментов записи предполагает удаление отрезков 3С-записи, подверженных сильным помехам (техногенные шумы большой длительности). Для этого вычисляется среднеквадратическое отклонение амплитуды (σ) внутри скользящего окна длительностью 60 секунд вдоль каждой компоненты записи. Затем определяется медианное значение σ для вертикальной компоненты (Z). Оно используется в качестве порогового значения для всех компонент. Окна записи, где σ любой из компонент превышает медианное значение σ вертикальной компоненты, удаляются из дальнейшей обработки.

Удаление высокоамплитудных всплесков направлен на детекцию и удаление импульсных помех, не связанных с микросейсмами. Для их поиска применяется алгоритм STA/LTA с коротким окном 0.1 с и длинным 30 с, пороговое значение равно 2. Отбраковывается все окно длительностью 60 с, центрированное в точке максимума всплеска.

Расчет суммарных амплитудных спектров: 3С-запись делится на временные окна (60 с). Для каждого окна и каждой компоненты вычисляется амплитудный спектр Фурье. Каждый амплитудный спектр возводится в квадрат. Это усиливает сигнал регулярных частотных компонент по сравнению со случайным шумом. Квадраты амплитудных спектров суммируются для каждого временного окна. Это позволяет накапливать энергию сигнала, связанного с микросейсмами [12]. Суммарные спектры каждой компоненты сглаживаются с использованием алгоритма Конно-Омачи.

Расчет H/V кривой: вычисляется среднее квадратическое значение горизонтальных компонент (H): $H = \sqrt{(NS^2 + WE^2)/2}$, где NS и WE – сглаженные суммарные амплитудные спектры горизонтальных компонент. Вычисляется H/V спектральное отношение, где V – сглаженный суммарный амплитудный спектр вертикальной компоненты (Z). Полученная кривая представляет собой зависимость амплитудного отношения горизонтальной и вертикальной компонент от частоты.

Проверка критериев надежности: значение максимума H/V -кривой и его частота автоматически проверяются по критериям надежности, предложенным в проекте SESAME [13]. Это необходимо для отбраковки некондиционных H/V -кривых, полученных для записей с сильными техногенными помехами.

Интерпретация H/V кривых выполняется вручную для набора H/V кривых, полученных в разный период наблюдения для каждой станции. Частота, соответствующая максимальному значению отношения H/V , интерпретируется как основная мода резонансной частоты SH-волны (f_0) для данного участка (рис.

3). Предполагается, что такая интерпретация корректна при наличии ярко выраженного контраста сейсмических жесткостей между слоем и подстилающим полупространством. В случае однородного упругого слоя со скоростью поперечной волны V_s и мощностью h , залегающего на однородном полупространстве, выражение для определения резонансных частот SH-волны (f_n) записывается следующим образом:

$$f_n = (2n + 1) V_s / 4h, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

где n – номер моды резонансной частоты. Резонансы более высокого порядка ($n > 0$), также могут наблюдаться как побочные максимумы на H/V кривой.

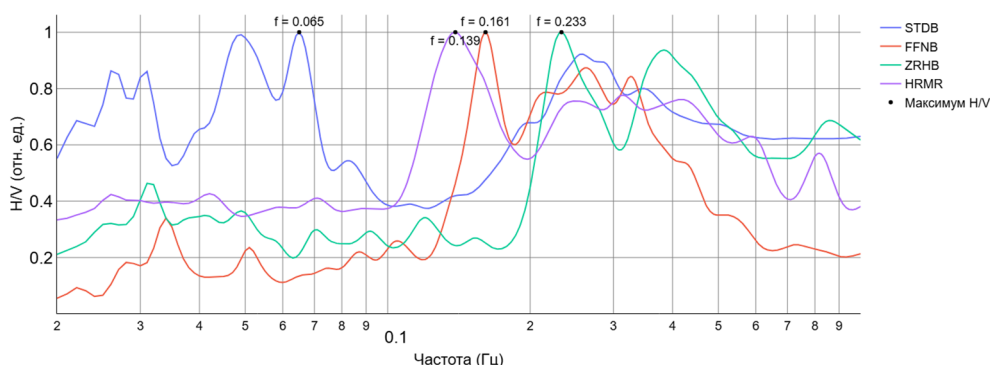


Рис. 3. Графики H/V кривых для станций в Центральном Байкале для первой частотной моды ($n=0$), соответствующей нижней границе осадочного слоя

С использованием выражения для резонансных частот (1) и значений f_0 рассчитана глубина нижней границы осадочного слоя для станций FFNB, STDB, ZRHB. Средняя скорость V_s в этом слое задана величиной 1.9 км/с в соответствии с вышеописанными оценками.

В результате расчетов получены следующие значения глубины нижней границы осадочной толщи в районе станций:

- STDB – 7.3 км;
- ZRHB – 2.0 км;
- FFNB – 2.9 км.

Данные о толщине осадочного слоя по методу Накамуры хорошо согласуются с результатами расчетов по временам пробега с учетом разницы T_s - T_{sp} для станций ZRHB и FFNB. Для станции STDB отмечается снижение глубины границы до 7.3 км (относительно 8.0 км по разнице T_s - T_{sp}).

Необходимо отметить, что полученная информация не обязательно отражает конкретную толщину залегающего под станциями осадочного слоя, а говорит в целом о его влиянии на времена пробега сейсмических волн и резонансные явления, фиксируемые на станциях.

В спектре станции HRMR также был выделен пик на частоте 0.14 Гц, тем не менее, глубина границ не рассчитывалась из-за отличающихся геологических и, соответственно, скоростных условий.

В дальнейшем планируется продолжить исследования в данном направлении при улучшении следующих факторов:

- точности и надежности определения скорости Р- и S-волн в осадочном чехле и вмещающих горных породах Центрального Байкала, а также набора статистики по времени прихода волны SP;
- возможности использования технически более совершенных типов аппаратуры с полноценным частотным диапазоном регистрации.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 “Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сычева Н.А., Мансуров А.Н. Оценка станционных поправок для сейсмологической сети KNET на основе анализа отношения спектров *H*- и *V*-компонент сейсмического шума и локальных землетрясений / Геофизические исследования, 2018. – т. 19. - №1. – с. 30-48.
2. Кобелева Е.А., Гилёва Н.А., Хамидулина О.А., Тубанов Ц.А. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 44–50.
3. Неведрова Н. Н., Санчаа А. М., Щекаева Е. А. Трехмерная модель Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой зоны // Геофизические технологии. – 2023. – №. 3. – С. 64-76.
4. Ребецкий Ю.Л., Добрынина А.А., Саньков В.А. Современное напряженное состояние и геодинамика Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 1. С. 87–111.
5. Середкина А.И. Современное состояние исследований глубинного строения земной коры и мантии Байкальского рифта по сейсмологическим данным // Физика Земли, 2021. - № 2. - с. 46–70.
6. Беляшов А.В. Определение скоростной модели блока земной коры Центрального Байкала по данным Кударинского землетрясения // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024. Т. 51, № 1. С. 5–17.
7. Бухаров А.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Станевич А.М., Скляр Е.В., Федоровский В.С. Эволюция Земли в летописи Байкала // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. 2008. № 1. С. 88–101.
8. Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P., Moore T.C., Scholtz C.A., Klitgord K.D. Preliminary results from 1989 multichannel seismic reflection survey in lake Baikal // Russian Geology and Geophysics, 1993. – Vol. 34. - №10-11. – p. 19-27.
9. Brink U.S.t., Taylor M.H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, Iss. B7. P. ETG 2-1–ETG 2-15.
10. Nakamura Y. What is the Nakamura method? // Seismological Research Letters. – 2019. – V. 90. – №. 4. – p. 1437-1443.
11. Dergach P.A., Tubanov Ts.A., Yushin V.I., Duchkov A.A. Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms // Seismic Instruments. 2019. V. 55, Iss. 3. P. 345–352.
12. Яблоков А.В., Дергач П.А., Лисейкин А.В., Сердюков А.С. Алгоритм обработки микросейсм методом *H/V* для оценки параметров двуслойной скоростной модели на основе расчета эллиптичности поверхностной волны Рэлея // Вопросы инженерной сейсмологии – том 51 – № 1 – С. 95-108 – 2024.
13. Acerra C. et al. Guidelines for the implementation of the *H/V* spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation // European Commission–EVG1-CT-2000-00026 SESAME. – 2004.