ПОДБОР СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ПРЕДЕЛАХ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

А.В. Беляшов¹, Ц.А. Тубанов²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

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

Поскольку решающую роль в процессе локализации сейсмических источников играет задаваемая скоростная модель, то стала актуальной задача подбора модели, максимально соответствующей реальным скоростным условиям района исследований. На основании анализа опубликованных результатов сейсмической изученности района озера Байкал подобраны слоистые модели *P*-волн для двух ситуаций: высокоскоростных консолидированных пород по бортам озера и низкоскоростных осадочных отложений толщиной до 10 км под его дном.

Байкальская рифтовая зона, локализация сейсмических событий, скоростная модель

VELOCITY MODELS FITTING FOR THE SEISMIC EVENTS LOCATION WITHIN THE BAIKAL RIFT ZONE

A.V. Belyashov¹, Ts.A. Tubanov²

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Geological Institute of SB RAS, Sakhyanova Str. 6a, Ulan-Ude, Russia, 670047,
e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

Whereas the defined velocity model plays a key role in the process of seismic events localization, so selection of the model as much as possible corresponding to the real velocity conditions of the investigated area becomes a crucial task. Basing on the analyses of published results of the Lake Baikal area seismic study a layered *P*-waves models for two situations defined: For the high velocity consolidated rock on the lake banks and low velocity sediments up to 10 km thick under the lake bottom.

Baikal rift zone, seismic events localization, velocity model

ВВЕДЕНИЕ

Установлено [Billings et al., 1994; Kissling et al., 1994; Соломин, 2008], что наиболее точное решение по локализации событий получается в том случае, когда скоростная модель максимально совпадает с реальной скоростью сейсмических волн в геологической среде. Соответственно, для подбора адекватной стартовой модели необходимо априори иметь как можно больше информации о распределении скорости на изучаемом участке.

Скоростная ситуация в пределах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) обусловлена сложным геолого-тектоническим строением [Леви и др., 1999; Tiberi et al., 2003] и существенно неоднородна [Petit et al., 1998; Суворов и др., 1999; Мордвинова, Артемьев, 2010]. Результаты геолого-геофизических исследований [Scholz, Hutchinson, 2000; ten Brink, Taylor, 2002; Суворов и Мишенькина, 2005; Nielsen, Thybo, 2009a, b] свидетельствуют о наличии под оз. Байкал мощного слоя осадочных отложений толщиной до 10 км, отличающихся низкой скоростью сейсмических волн (со средней скоростью порядка 3.2 км/с). При этом значительное число сейсмических событий произошло в пределах акватории озера Байкал [Мельникова и др., 2013; Radziminovich et al., 2019], часть из них может располагаться в глубинном интервале до 10 км [Гилева и др., 2000; Радзиминович, 2010], попадая, таким образом, в зону низкоскоростных осадочных пород.

Для локализации землетрясений в районе озера Байкал в качестве стартовых, как правило, используются однородные модели, характеризующие среднюю скорость консолидированных пород земной коры (около 6 км/с) [Déverchère et al., 1993; Гилева и др., 2000].

Попытка учесть влияние вертикальных неоднородностей в среде была предпринята в работе [Суворов, Тубанов, 2008] путем использования слоистой скоростной модели. Такой подход, безусловно, дает более адекватное представление о скоростных свойствах среды изучаемой области. К недостаткам этой модели можно отнести некоторую расчлененность разреза (особенно в верхней его части), что усложняет процедуру лучевого трассирования в ходе локализации, и наличие сейсмической границы на глубине 16 км с резким скачком скорости (с 6.26 до 6.7 км/с), положение которой требует обоснования. Также указанная модель описывает только высокоскоростные условия района исследований.

Для подбора приемлемой модели необходимо учитывать присутствие в разрезе, в том числе, и низкоскоростного слоя, и в случае попадания источника события в эту область, необходимо учитывать скоростные свойства данного слоя в стартовой модели.

ФОРМИРОВАНИЕ СТАРТОВОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ РЕГИОНА

На основании результатов исследований прошлых лет, направленных на сейсмическое изучение скоростных характеристик района озера Байкал, собраны сводные одномерные модели для двух типов сред – консолидированных высокоскоростных пород и осадочных отложений. Анализ сейсмических данных осуществлялся в соответствии со структурно-скоростными характеристиками разреза в районе озера Байкал с изучением основных параметров, влияющих на конфигурацию подбираемой скоростной модели – глубины залегания границы Мохо, наличия внутрикоровых границ, распределения скорости *P*-волн в коре и верхней мантии.

Толщина земной коры и скорость *P*-волн в верхней мантии в пределах БРЗ

Сведения о положении границы Моховича в зоне действия Байкальской рифтовой впадины у разных авторов отличаются. Так в работах [Puzirev et al., 1973; Крылов и др., 1981; Сун Юншен и др., 1996] толщина земной коры в БРЗ уменьшена относительно соседних районов и определена значением 36 км (рис. 1А и 2 соответственно). При этом в другой своей работе [Puzirev et al., 1978] авторы приводят одномерную скоростную модель $V(h)$, на которой положение границы Мохо в районе БРЗ определяется глубиной 39 км (рис. 1Б).

Рис. 1. Структурно-скоростной разрез (А) [Puzyrev et al., 1973]; одномерная скоростная модель по P -волнам (Б) [Puzyrev et al., 1978] (М – граница Мохоровичича)

Рис. 2. Фрагмент профиля ГСЗ [Сун Юншен и др., 1996]: 1 – сейсмические границы; 2 – изолинии скорости в км/с (изолиния 6.4 км/с утолщена); 3 – контур верхнемантийной области с аномально низкой скоростью (7.7–7.8 км/с); V и V_r – средняя и граничная скорости в км/с

В соответствии с работами [Крылов и др., 1981; Суворов и др., 1999] в области Байкальской рифтовой зоны изменения мощности коры происходят в широком диапазоне от 35–37 до почти 50 км, как и вне ее пределов.

Сейсмические данные, представленные в работе [ten Brink, Taylor, 2002], также свидетельствуют о более глубоком залегании границы Мохо в диапазоне от 39 до 42.5 км (рис. 3). Отсутствие уменьшения толщины коры подтверждается данными из работы [Nielsen, Thybo, 2009a], в соответствии с которыми в пределах БРЗ граница Мохо залегает в интервале от 42 до 44 км.

Рис. 3. Скоростной разрез по данным [Brink, Taylor, 2002]

Согласно результатам исследований, приведенным в [Мордвинова, Артемьев, 2010], подошва коры под Байкалом залегает на глубине 39 км.

Таким образом, глубина залегания границы Мохо в пределах БРЗ по данным от разных авторов изменяется в диапазоне от 36 до 44 км и для подбираемой скоростной модели в качестве среднего значения можно взять величину 40 км.

Существуют некоторые разногласия и в оценке скорости P -волн в верхней мантии для района БРЗ. В приведенных выше источниках [Puzryev et al., 1973, 1978; Сун Юншен и др., 1996] описана область пониженных до 7.7–7.8 км/с значений скорости, сформированная под подошвой коры (см. рис. 1 и 2). При этом по данным из [ten Brink and Taylor, 2002; Nielsen, Thybo, 2009a] ниже границы Мохо скорость превышает значение 8.0 км/с. Поскольку природа сейсмических событий в пределах БРЗ носит, в основном, коровый характер [Гилева и др., 2000; Киссин, Рузайкин, 2000], то полагаем, что отмеченные различия в значениях скорости в верхней мантии не окажут влияние на формирование стартовой скоростной модели.

Скоростная структура земной коры в пределах изучаемой области

В рассмотренных литературных источниках данные по количеству структурных этажей и распределению скорости в слоях внутри земной коры для БРЗ также отличаются. В статьях [Puzryev et al., 1973; Крылов и др., 1981, 1993; Сун Юншен и др., 1996] представлены разрезы с относительно плавным нарастанием скорости с глубиной с 5.5 до 6.8 км/с без резких границ (см. рис. 1 и 2). Региональный

масштаб этих разрезов не дает возможность оценить детальные скоростные характеристики для верхней части разреза (ВЧР) и озера Байкал с мощными осадочными отложениями.

В более поздних работах структура земной коры представлена уже в виде расчлененного разреза с перепадами скорости на сейсмических границах. В статье [Суворов и др., 1999] представлена модель трехслойной кристаллической коры с двумя сейсмическими границами: первый слой заключен между поверхностью коры и уровнем 10 км, второй – между 10 и 20 км, третий слой простирается до раздела Мохо. График изменения латеральной скорости внутри выделенных глубинных интервалов приведен на рис. 4.

В пределах БРЗ вертикальное и латеральное распределение скорости характеризуется следующими значениями:

- для слоя 0–10 км скорость изменяется от 5.8 до 6.1 км/с;
- для слоя 10–20 км – от 6.4 до 6.65 км/с;
- для нижнего слоя – от 6.5 до 6.7 км/с.

Рис. 4. График латеральных изменений скорости в районе БРЗ [Суворов и др., 1999]

На разрезе в работе [ten Brink, Taylor, 2002] (см. рис. 3) кора состоит из четырех структурных этажей (сверху вниз):

1. Осадочных отложений под дном озера Байкал с толщиной, изменяющейся в диапазоне от 0.5 до 6.0 км, и средней скоростью P -волн порядка 2.5 км/с.
2. Верхней коры мощностью от 1 до 16 км и скоростью P -волн, возрастающей с 5.2 км/с на кровле слоя (на средней глубине 6 км) до 6.1 км/с на его подошве (на глубине примерно 15 км).

3. Средней коры с толщиной слоя от 11 до 26 км и скоростью, незначительно возрастающей с 6.4 до 6.5 км/с.
4. Нижнего высокоскоростного слоя со средней мощностью порядка 7 км и скоростью 7.4–7.7 км/с.

Значительные скачки скорости в рамках данной модели наблюдаются при переходе от осадочных отложений к породам верхней коры на глубине в районе 5–7 км – с 3 до 5 км/с, и с выходом в нижний отдел коры на глубине порядка 32 км – с 6.5 до 7.4 км/с.

В работе [Суворов, Мишенькина, 2005] представлен детальный структурно-скоростной разрез осадочных отложений под дном озера Байкал, построенный по данным сейсмического изучения методом преломленных волн в районе его южной части (рис. 5).

Рис. 5. Скоростной разрез по профилю КМПВ [Суворов, Мишенькина, 2005]: 1 – изолинии скорости (км/с), 2 – сейсмические границы, 3 – предполагаемые разломы, 4 – фундамент

Разрез представлен слоисто-градиентной моделью, включающей в себя, по меньшей мере, четыре слоя с подстилающим полупространством с выделяемым скачком скорости на границах между ними. Скорость P -волн на разрезе увеличивается от 1.7 км/с на кровле четвертичных отложений до 5.8–6.0 км/с в кристаллическом фундаменте на глубине порядка 14 км. Это хорошо согласуется с данными, представленными в работе [Крылов и др., 1995].

Более объемные сейсмические данные представлены в работе [Nielsen, Thybo, 2009b], здесь изучены не только вертикальные изменения структурно-скоростного состояния земной коры для высокоскоростных кристаллических пород, но и рассмотрены свойства осадочных отложений под озером Байкал (рис. 6).

Осадочная толща представлена трехслойной моделью мощностью до 10 км: в верхнем слое скорость P -волн неизменна и оценивается величиной 1.48 км/с; на кровле нижележащего градиентного слоя значение скорости составляет 1.9 км/с и к подошве слоя увеличивается до 3.6 км/с; нижний слой, также градиентный, характеризуется изменением скорости от 4.5 до 5.25 км/с.

Скоростной разрез для консолидированной части земной коры по бортам озера Байкал включает в себя четыре слоя:

1. Слой осадочных пород толщиной до 2 км и скоростью от 5.1 до 5.55 км/с.
2. Слой верхней коры мощностью до 10 км и скоростью от 6.2 до 6.35 км/с.
3. Средняя кора толщиной до 15 км характеризуется вертикальным ростом значений скорости от 6.55 до 6.8 км/с.
4. Скорость P -волн в нижнем отделе коры в пределах БРЗ отличается повышенными до 7.4–7.6 км/с значениями.

Рис. 6. Скоростные разрезы ГСЗ до глубины 60 км (а) и для ВЧР (б) [Nielsen, Thybo, 2009b]

Значительные скачки скорости наблюдаются на границе между осадочным чехлом и верхней корой на глубине около 1 км (с 5.2 до 6.2 км/с) и на границе между средней и нижней корой на глубине порядка 30 км (с 6.8 до 7.4 км/с). Наличие в разрезе границы на глубине 16 км с резким увеличением скорости, описанной в работе [Суворов, Тубанов, 2008], не подтверждено ни одним из рассмотренных источников.

Таким образом, материалы сейсмического изучения земной коры в пределах БРЗ, прежде всего, свидетельствуют о некоторых вариациях в представлении авторами работ структурно-скоростных свойств земной коры в пределах БРЗ, которые будут учтены при подборе стартовой скоростной модели. Основная же характеристика района исследований заключается в том, что он представлен двумя типами скоростного разреза: низкоскоростными осадочными отложениями под дном озера Байкал и высокоскоростными консолидированными породами по его бортам.

Подбор одномерной скоростной модели

На основании структурно-скоростной информации для района озера Байкал, представленной на рис. 1–6, построены одномерные скоростные модели $V(h)$, сводный график по которым приведен на рис. 7.

Рис. 7. Сводный график для подобранных скоростных моделей $V(h)$ с обобщенными моделями для двух разных скоростных ситуаций

Как и отмечалось ранее, для изучаемого района характерна ситуация с двумя вариантами поведения скорости: группа моделей, описывающих осадочные отложения под озером Байкал, в верхней части разреза характеризуется низкими значениями скорости (порядка 1.5–2 км/с), плавно возрастающими до 6 км/с на глубине 10–15 км. Для консолидированных пород по бортам озера Байкал сразу от дневной поверхности наблюдаются высокие значения скорости (от 5.2 до 6.0 км/с). Выделенные группы аппроксимированы двумя слоистыми моделями (на графике показаны черными жирными линиями), которые рекомендуется применять в ходе локализации сейсмических событий в зависимости от конкретных скоростных условий.

Результат модельного эксперимента по решению прямой задачи способом лучевого трассирования [Zelt, Smith, 1992] с использованием разреза на базе обобщенных скоростных моделей представлен на рис. 8.

Рис. 8. Пример лучевого моделирования с заданными источниками на глубине 8 и 28 км с включением скоростной неоднородности (осадочных отложений под озером Байкал): внизу – лучевые схемы от трех источников (толстыми линиями обозначены сейсмические границы, на разрез вынесены значения скорости P -волн в км/с);верху – модельные времена в редуцированном масштабе (указан тип волны: P^* - прямая, P' – преломленная на границе 10 км)

Были заданы три источника: два источника на глубине 8 км, один из которых помещен в низкоскоростную область осадочных отложений под озером Байкал (синие линии и значки), другой расположен в зоне консолидированных пород (зеленые линии и значки); третий источник размещен под озером Байкал также в консолидированных породах на глубине 28 км (красные линии и значки). Цель моделирования заключалась в оценке величин времен пробега в зависимости от положения источника.

Для источников, расположенных на глубине 8 км в разных скоростных условиях разница во временах пробега прямой волны (P^*) достигает 1 сек на эпицентральных расстояниях 20–30 км. На этих расстояниях время пробега прямой волны для источника, расположенного в области пониженной скорости, сопоставимо с временами от источника на глубине 28 км. С увеличением эпицентральных расстояний до 50–60 км для низкоскоростного источника в первые вступления выходит волна, преломленная на границе с глубиной 10 км (P'), время пробега которой также сопоставимо с временем прямой волны от источника на глубине 28 км. Эта ситуация подтверждает необходимость, во-первых, более плотного расположения станций наблюдения; во-вторых, корректного определения на сейсмограммах целевых типов сейсмических волн.

Результаты модельного эксперимента показывают важность учета всех скоростных условий в районе озера Байкал для получения надежного результата локализации сейсмических событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат системного анализа материалов сейсмического изучения района озера Байкал прошлых лет позволяет сделать вывод о резко неоднородном структурно-скоростном строении этой

территории. В геологическом плане изучаемая область состоит, по меньшей мере, из двух типов горных пород: низкоскоростной осадочной толщи мощностью до 10 км под озером Байкал (со средней скоростью порядка 3.5 км/с) и высокоскоростных пород (от 6.1 до 7.4 км/с) по его бортам.

Подобраны одномерные скоростные модели $V(h)$ для указанных типов скоростных сред. С помощью модельного эксперимента способом лучевого трассирования показана важность учета всех скоростных условий для более точной локализации сейсмических событий, что можно получить с использованием двухкомпонентной стартовой модели (низко- и высокоскоростной).

При этом, в рамках совершенствования методики локализации сейсмических событий в пределах Байкальской рифтовой зоны остаются открытыми следующие вопросы:

- корректность работы с первичными данными при определении времен вступления сейсмических фаз, соответствующих параметрам заданной скоростной модели;
- правомерность использования только слоистых стартовых моделей при отсутствии точной информации о положении внутрикоровых границ;
- наличие в изучаемом блоке горных пород не только вертикальных, но и латеральных скоростных неоднородностей, определяющих пространственную зависимость времен пробега сейсмической волны.

Все эти вопросы, по возможности, будут рассмотрены в следующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

- Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Девершер Ж.** Локализация землетрясений и средние характеристики земной коры в некоторых районах Прибайкалья // *Геология и геофизика*. – 2000. – Т. 41, № 5. – С. 629–636.
- Киссин И.Г., Рузайкин А.И.** Очаги землетрясений в поле геоэлектрических неоднородностей земной коры Байкальской рифтовой зоны // *Физика Земли*. – 2000. – № 7. – С. 67–75.
- Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Селезнев В.С.** Недр Байкала (по сейсмическим данным). – Новосибирск: Наука, 1981. – 105 с.
- Крылов С.В., Кульчинский Ю.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Селезнев В.С., Сергеев В.Н., Соловьев В.М., Суворов В.Д., Тен Е.Н., Шелудько И.Ф.** Детальные сейсмические исследования литосферы на P - и S -волнах. – Новосибирск, Наука, 1993. – 199 с.
- Крылов С.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф.** Изучение Байкальской рифтовой впадины методом сейсмической томографии на преломленных волнах // *Доклады РАН*, 1995. – Т. 345, № 5. – С. 674–677.
- Леви К.Г., Мирошниченко А.И., Ружич В.В., Саньков В.А., Алакшин А.М., Кириллов П.Г., Колман С., Лухнев А.В.** Современное разломообразование и сейсмичность в Байкальском рифте // *Физическая мезомеханика*. – 1999. – Т. 2, № 1–2. – С. 171–180.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.** Особенности сейсмических активизаций Среднего Байкала в 2008 – 2011 годах // *Доклады РАН*. – 2013. – Т. 453, № 6. – С. 1–6.
- Мордвинова В.В., Артемьев А.А.** Трехмерная модель юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий по обменным волнам // *Геология и геофизика*. – 2010. – Т. 51, № 6. – С. 887–904.
- Радзиминович Н.А.** Глубины очагов землетрясений Байкальского региона: обзор // *Физика Земли*. – 2010. – № 3. – С. 37–51.

- Соломин С.В.** Физика Земли. Часть 2: Сейсмология. – Саратов: Научная книга, 2008. – 42 с.
- Суворов В.Д., Мишенькина З.Р.** Структура осадочных отложений и фундамента под южной котловиной озера Байкал по данным КМПВ // *Геология и геофизика*, 2005. – Т. 46, № 11. – С. 1159–1167.
- Суворов В.Д., Тубанов Ц.А.** Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под Центральным Байкалом // *Геология и геофизика*. – 2008. – Т. 49, № 8. – С. 805–818.
- Суворов В.Д., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф.** Земная кора и ее изостатическое состояние в Байкальской рифтовой зоне и сопредельных территориях по данным ГСЗ // *Геология и геофизика*. – 1999. – Т. 40, № 3. – С. 304–316.
- Сун Юншен, Крылов С.В., Ян Баоцзюнь, Лю Цай, Дун Шисюэ, Лян Течен, Ли Цзинчжи, Сюй Синчжуи, Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М.** Глубинное сейсмическое зондирование литосферы на международном трансекте Байкал – Северо-Восточный Китай // *Геология и геофизика*, 1996. – Т. 37, № 2. – С. 3–15.
- Billings S.D., Sambridge M.S., Kennett B.L.N.** Errors in hypocenter location: Picking, model, and magnitude dependence // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1994. – Vol. 84 (6). – P. 1978–1990, doi: 10.1785/BSSA0840061978.
- Déverchère J., Houdry F., Solonenko N.V., Sankov V.A.** Seismicity, active faults and stress field of the North Muya Region, Baikal Rift: New insights on the rheology of extended continental lithosphere // *Journal of Geophysical Research*. – 1993. – Vol. 98 (B11). – P. 19,895–19,912, doi: 10.1029/93JB01429.
- Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Phillips, D., Kradolfer, U.** Initial reference models in local earthquake tomography // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – Vol. 99 (B10). – P. 19,635–19,646, doi: 10.1029/93JB03138.
- Nielsen C., Thybo H.** No Moho uplift below the Baikal Rift Zone: Evidence from a seismic refraction profile across southern Lake Baikal // *Journal of Geophysical Research*. – 2009a. – Vol. 114 (B8), doi: 10.1029/2008JB005828.
- Nielsen C., Thybo H.** Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // *Tectonophysics*. – 2009b. – Vol. 470 (3–4). – P. 298–318, doi: 10.1016/j.tecto.2009.01.023.
- Petit C., Koulakov I., Déverchère J.** Velocity structure around the Baikal rift zone from teleseismic and local earthquake traveltimes and geodynamic implications // *Tectonophysics*. – 1998. – Vol. 296 (1–2). – P. 125–144, doi: 10.1016/S0040-1951(98)00140-1.
- Puzyrev N.N., Mandelbaum M.M., Krylov S.V., Mishenkin B.P., Krupskaya G.V., Petrick G.V.** Deep seismic investigations in the Baikal rift zone // *Tectonophysics*. – 1973. – Vol. 209 (1–4). – P. 85–95, doi: 10.1016/0040-1951(73)90098-X.
- Puzyrev N.N., Mandelbaum M.M., Krylov S.V., Mishenkin B.P., Petrick G.V., Krupskaya G.V.** Deep structure of the Baikal and other continental rift zones from seismic data // *Tectonophysics*. – 1978. – Vol. 45 (1). – P. 15–22, doi: 10.1016/0040-1951(78)90219-6.
- Radziminovich N.A., Miroshnichenko A.I., Zuev F.L.** Magnitude of completeness, b-value, and spatial correlation dimension of earthquakes in the South Baikal Basin, Baikal Rift System // *Tectonophysics*. – 2019. – Vol. 759. – P. 44–57, doi: 10.1016/j.tecto.2019.04.002.

- Scholz C.A., Hutchinson D.R.** Stratigraphic and structural evolution of the Selenga Delta Accommodation Zone, Lake Baikal Rift, Siberia // *International Journal of Earth Sciences*. – 2000. – Vol. 89 (2). – P. 212–228, doi: 10.1007/s005310000095.
- ten Brink U.S., Taylor M.H.** Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – Vol. 107 (B7). – P. 2-1–2-15, doi: 10.1029/2001JB000300.
- Tiberi C., Diament M., Déverchère J., Petit-Mariani C., Mikhailov V., Tikhotsky S., Achauer U.** Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108 (B3) – P. 2133, doi: 10.1029/2002JB001880.
- Zelt C.A., Smith R.B.** Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure // *Geophysical Journal International*. – 1992. – Vol. 108 (1). – P. 16–34, doi: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00836.x.

REFERENCES

- Billings S.D., Sambridge M.S., Kennett B.L.N.** Errors in hypocenter location: Picking, model, and magnitude dependence // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1994. – Vol. 84 (6). – P. 1978–1990, doi: 10.1785/BSSA0840061978.
- Déverchère J., Houdry F., Solonenko N.V., Sankov V.A.** Seismicity, active faults and stress field of the North Muya Region, Baikal Rift: New insights on the rheology of extended continental lithosphere // *Journal of Geophysical Research*. – 1993. – Vol. 98 (B11). – P. 19,895–19,912, doi: 10.1029/93JB01429.
- Gileva N.A., Mel'nikova V.I., Radziminovich N.A., Déverchère J.** Location of earthquakes and average velocity parameters of the crust in some areas of the Baikal region // *Russian Geology and Geophysics*. – 2000. – Vol. 41 (5). – P. 609–615.
- Kissin I., Ruzaiкин A.** Earthquake focus in the field of geoelectric inhomogeneities within the Baikal rift zone earth crust // *Physics of the Solid Earth*. – 2000. – No. 7. – P. 67–75.
- Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Phillips, D., Kradolfer, U.** Initial reference models in local earthquake tomography // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – Vol. 99 (B10). – P. 19635–19646, doi: 10.1029/93JB03138.
- Krylov S., Kulchinsky Yu.V., Mandelbaum M.M., Mishenkin B.P., Mishenkina Z.R., Petrik G.V., Seleznev V.S., Sergeev V.N., Solovov V.M., Suvorov V.D., Ten E.N., Shelulko I.F.** Detailed seismic investigation of the lithosphere on the *P*- and *S*-waves [in Russian]. – Novosibirsk, Nauka. – 1993. – 199 p.
- Krylov S., Mandelbaum M., Mishenkin B., Mishenkina Z., Petrik G.V., Seleznev V.S.** Baikal earth depths (upon the seismic data) [in Russian]. – Novosibirsk, Nauka. – 1981. – 105 p.
- Krylov S., Seleznyov V., Solovyov V., Petrik G., Sheludko I.** Research of the Baikal rift depression using seismic tomography technique on the refracted waves // *Doklady RAN*, 1995. – Vol. 345 (5). – P. 674–677.
- Levi K.G., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., Sankov V.A., Alakshin A.M., Kirillov P.G., Colman S., Lukhnev A.V.** Present-day faulting and seismicity in the Baikal rift // *Physical Mesomechanics*. – 1999. – Vol. 2 (1–2). – P. 171–180.
- Melnikova V.I., Gileva N.A., Imaev V.S., Radziminovich Ya.B., Tubanov Ts.A.** Middle Baikal 2008-2011 years seismic activation features // *Doklady RAN*. – 2013. – Vol. 453 (6). – P. 1–6.

- Mordvinova V.V., Artemyev A.A.** The three-dimensional shear velocity structure of lithosphere in the southern Baikal rift system and its surroundings // *Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – Vol. 51 (6). – P. 694–707, doi: 10.1016/j.rgg.2010.05.010.
- Nielsen C., Thybo H.** Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // *Tectonophysics*. – 2009b. – Vol. 470 (3–4). – P. 298–318, doi: 10.1016/j.tecto.2009.01.023.
- Nielsen C., Thybo H.** No Moho uplift below the Baikal Rift Zone: Evidence from a seismic refraction profile across southern Lake Baikal // *Journal of Geophysical Research*. – 2009a. – Vol. 114 (B8), doi: 10.1029/2008JB005828.
- Petit C., Koulakov I., Déverchère J.** Velocity structure around the Baikal rift zone from teleseismic and local earthquake traveltimes and geodynamic implications // *Tectonophysics*. – 1998. – Vol. 296 (1–2). – P. 125–144, doi: 10.1016/S0040-1951(98)00140-1.
- Puzyrev N.N., Mandelbaum M.M., Krylov S.V., Mishenkin B.P., Krupskaya G.V., Petrick G.V.** Deep seismic investigations in the Baikal rift zone // *Tectonophysics*. – 1973. – Vol. 20 (1–4). – P. 85–95, doi: 10.1016/0040-1951(73)90098-X.
- Puzyrev N.N., Mandelbaum M.M., Krylov S.V., Mishenkin B.P., Petrick G.V., Krupskaya G.V.** Deep structure of the Baikal and other continental rift zones from seismic data // *Tectonophysics*. – 1978. – Vol. 45 (1). – P. 15–22, doi: 10.1016/0040-1951(78)90219-6.
- Radziminovich N.A.** Focal depths of earthquakes in the Baikal region: a review // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2010. – Vol. 46 (3). – P. 216–229.
- Radziminovich N.A., Miroshnichenko A.I., Zuev F.L.** Magnitude of completeness, b-value, and spatial correlation dimension of earthquakes in the South Baikal Basin, Baikal Rift System // *Tectonophysics*. – 2019. – Vol. 759. – P. 44–57, doi: 10.1016/j.tecto.2019.04.002.
- Scholz C.A., Hutchinson D.R.** Stratigraphic and structural evolution of the Selenga Delta Accommodation Zone, Lake Baikal Rift, Siberia // *International Journal of Earth Sciences*. – 2000. – Vol. 89 (2). – P. 212–228, doi: 10.1007/s005310000095.
- Solomin S.V.** Physics of the Earth. Part 2: Seismology [in Russian]. – Saratov: Nauchnaya kniga, 2008. – 42 p.
- Song Youngsheng, Krylov S.V., Yang Baojun, Liu Cai, Dong Shixue, Liang Tiechen, Li Jingzhi, Xu Xingzhui, Mishen'kina Z.R., Petrik G.V., Shelud'ko I.F., Seleznev V.S., Solov'ev V.M.** Deep seismic sounding of the lithosphere on the Baikal-Northeastern China International Transect // *Russian Geology and Geophysics*. – 1996. – Vol. 37 (2). – P. 1–14.
- Suvorov V.D., Tubanov Ts.A.** Distribution of local earthquakes in the crust beneath central Lake Baikal // *Russian Geology and Geophysics*. – 2008. – Vol. 49 (8). – P. 611–7620, doi: 10.1016/j.rgg.2007.09.019.
- Suvorov V.D., Mishen'kina Z.R.** Structure of sedimentary cover and basement beneath the South basin of Lake Baikal inferred from seismic profiling // *Russian Geology and Geophysics*. – 2005. – Vol. 46 (11). – P. 1141–1149.
- Suvorov V.D., Mishen'kina Z.R., Petrik G.V., Shelud'ko I.F.** Structure and isostasy of the crust in the Baikal rift and the surrounding territory as determined from DSS data // *Russian Geology and Geophysics*. – 1999. – Vol. 40 (3). – P. 305–316.
- ten Brink U.S., Taylor M.H.** Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – Vol. 107 (B7). – P. 2-1–2-15, doi: 10.1029/2001JB000300.

Tiberi C., Diamant M., Déverchère J., Petit-Mariani C., Mikhailov V., Tikhotsky S., Achauer U. Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108 (B3). – P. 2133, doi: 10.1029/2002JB001880.

Zelt C.A., Smith R.B. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure // *Geophysical Journal International*. – 1992. – Vol. 108 (1). – P. 16–34, doi: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00836.x.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

БЕЛЯШОВ Андрей Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: сейсмическое изучение геологического строения земной коры, решение прямых и обратных задач в сейсморазведке, уточнение положения источников сейсмических событий с учетом латеральных скоростных неоднородностей.

ТУБАНОВ Цырен Алексеевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией методов сейсмопрогноза. ГИН СО РАН. Область научных интересов: естественная сейсмичность, предвестники землетрясений, строение земной коры, напряженно-деформированное состояние среды, определение координат и энергии землетрясений.

*Статья поступила в редакцию 24 августа 2021 г.,
принята к публикации 22 октября 2021 г.*