

УДК 550.34

ВОЗМОЖНОСТИ РЕЧНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ

А.В. Лисейкин¹, В.С. Селезнев¹, В.М. Соловьев², А.А. Брыксин¹, Д.Б. Севостьянов¹,
Д.В. Кречетов¹, И.В. Коковкин¹

¹СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²АСФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

В ФИЦ ЕГС РАН разработана технология речных сейсморазведочных исследований, основанная на использовании водных пневматических источников и устанавливаемых на берегу автономных сейсмических регистраторов, настроенных на непрерывную сейсмическую запись. В последние годы разработано несколько тысяч километров профилей методом ОГТ-2D на реках Восточной Сибири — Лена, Нижняя Тунгуска, Витим. Ранее применялись лишь 6—10-секундные сейсмограммы для изучения строения верхней части земной коры. Вместе с тем глубинное строение земной коры огромных территорий Восточной Сибири остается малоизученным ввиду высокой затратности исследований. С использованием данных речной сейсморазведки на участке профиля, выполненном в нижнем течении р. Лена, продемонстрирована возможность изучения строения земной коры на всю глубину, включая поверхность Мохоровичича. Для этого выполнялась переобработка архивных сейсмических записей с построением монтажей сейсмограмм увеличенной длительности (до 23 с). Малоамплитудные колебания отраженных волн от глубинных границ выделяются за счет многократного суммирования, существенно большего, чем при традиционной сейсморазведке. Используемая аппаратура имеет достаточный динамический диапазон, а высокая кратность достигается за счет увеличения площадки бинирования. Ветровые помехи, снижающие качество временных разрезов верхней части земной коры, не ухудшают разрез на больших глубинах и этот материал не следует исключать из обработки. Речные сейсморазведочные работы, выполненные по технологии, разработанной в ФИЦ ЕГС РАН, на реках Восточной Сибири в объеме порядка 2700 км, содержат в себе данные, позволяющие построить глубинные разрезы вплоть до границы Мохоровичича, и эту работу необходимо продолжить.

Речная сейсморазведка, глубинное строение, метод ОГТ-2D

POSSIBILITIES OF RIVER SEISMIC SURVEY FOR STUDYING THE STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST AND THE UPPER MANTLE OF THE TERRITORY OF SIBERIA

A.V. Liseikin, V.S. Seleznev, V.M. Solov'ev, A.A. Bryksin,
D.B. Sevost'yanov, D.V. Krechetov, I.V. Kokovkin

A river seismic survey technology based on using pneumatic water sources and autonomous seismic recorders, which are installed on the shore and configured for continuous seismic recording, is developed at the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS). In recent years, several thousand kilometers of profiles have been worked out by the CDP-2D method on the rivers of East Siberia: Lena, Nizhnyaya Tunguska, and Vitim. Previously, only 6- to 10-second seismograms were used to study the structure of the upper part of the Earth's crust. At the same time, the deep structure of the Earth's crust in the vast territories of East Siberia remains poorly understood due to the high cost of research. The river seismic survey data are used on a profile section worked out in the lower reaches of the Lena River to demonstrate the possibility of studying the structure of the Earth's crust to the full depth, including the Moho discontinuity. For this purpose, the archival seismic records are reprocessed the construction of montages of seismograms of increased duration (up to 23 s). The low-amplitude oscillations of reflected waves from deep boundaries are distinguished due to multiple summation, which is much larger than in conventional seismic surveys. The equipment used in this study has a sufficient dynamic range, and a high magnification is achieved by increasing the binning area. Wind noise reduces the quality of time sections of the upper part of the Earth's crust, but does not worsen the section at great depths, so this material should not be excluded from processing. The river seismic surveys carried out using the technology developed at the GS RAS on the rivers of East Siberia within about 2700 km contain data that make it possible to build deep sections up to the Moho discontinuity, and this work needs to be done.

River seismic survey, deep structure, CDP-2D method

ВВЕДЕНИЕ

Специалисты ФИЦ ЕГС РАН начали выполнять морские сейсморазведочные работы с 1983 г. на научно-исследовательском судне «Евпатория» водоизмещением 3050 т [Гинсбург и др., 1990]. В 1994—1995 гг. возникла необходимость проведения сейсморазведочных работ на Телецком озере, где самым большим судном была самоходная баржа водоизмещением 30 т [Селезнев и др., 1995; Seleznev et al., 1995, 1996]. Сотрудникам ФИЦ ЕГС РАН пришлось полностью модернизировать регистрирующую и излучающую часть сейсмической аппаратуры. Это позволило в дальнейшем начать проводить сейсморазведочные работы методом ОГТ-2D на реках Сибири (Лена, Витим, Енисей, Нижняя Тунгуска, Обь, Вах) [Селезнев и др., 2002, 2004, 2006, 2007; Сысоев и др., 2004]. Технология регистрации данных постоянно совершенствовалась и начиная с 2007 г. основывалась на использовании автономных регистраторов (аппаратура «Байкал» с широким динамическим диапазоном, разработанная в ФИЦ ЕГС РАН и выпускаемая малыми сериями), устанавливаемых вдоль речного профиля на берегу реки и осуществляющих запись в непрерывном режиме. Возбуждение упругого сигнала производилось в воде с помощью группы пневматических источников «Малыш», производства ООО «Пульс» [Бадиков, Гуленко, 2009]. При интервале между воздействиями 15—25 с расстояние между пунктами взрыва составляло от 10 до 20 м. Используемые пневмоисточники характеризуются широким частотным диапазоном излучателя (от первых единиц Гц до 200 Гц) и могут работать на глубинах до 0.5—0.7 м.

Важная особенность технологии состоит в том, что излучатели и приборы регистрации работают независимо друг от друга. Сейсмические регистраторы осуществляют запись в непрерывном режиме и, как и пневмоизлучатели, синхронизированы во времени с помощью систем ГЛОНАСС-GPS. В процессе полевых работ формируется набор табличных данных, позволяющих привести в однозначное соответствие время срабатывания группы источников и начало полезной записи сигнала на каждом из автономных регистраторов. Разработано специализированное программное обеспечение (ПО «SSlicer»), позволяющее строить монтажи сейсмограмм с приведением их к виду, аналогичному получаемым стандартными многоканальными сейсморазведочными станциями. Длительность записи таких сейсмограмм определяется геологическим заданием и составляет, как правило, от 6 до 10 с. Связано это с тем, что оно ориентировано на получение сведений только о верхней части земной коры. При этом глубинное строение огромных территорий Восточной Сибири до настоящего времени мало изучено ввиду высокой затратности исследований.

Интервал между сейсмическими воздействиями в речной сейсморазведке, как правило, составляет не менее 15 с и обусловлен, прежде всего, производственной необходимостью — требуется некоторое время для нагнетания сжатого воздуха в пневмоисточники и для перемещения судна-источника на следующий пункт возбуждения. В связи с этим появляется возможность, используя непрерывные записи сейсмических регистраторов «Байкал», сформировать сейсмограммы соответствующей длительности (больше 6—10 с, вплоть до интервала между воздействиями). Целевые отраженные волны от глубинных слоев земной коры, включая поверхность Мохоровичича, по имеющимся исследованиям методом ГСЗ в Восточной Сибири, находятся на временах до 13—15 с. Таким образом ожидается, что, сформировав сейсмограммы с увеличенным временем регистрации, можно без существенных затрат строить временные разрезы и изучать глубинное строение земной коры на участках отработки речных сейсморазведочных профилей.

В результате проведения экспериментальных полевых работ вдоль русел рек Лена, Витим и Нижняя Тунгуска на профилях общей длиной около 2700 км (рис. 1) получен и хранится в архивах значительный объем цифровых сейсмических данных: непрерывные записи пневмоисточников с интервалом между воздействиями 15—25 с. В данной статье на примере 60-километрового участка профиля, расположенного в нижнем течении Лены, обосновывается возможность использования данных речной сейсморазведки для изучения строения земной коры на всю глубину, включая поверхность Мохоровичича.

Основные параметры сейсморазведочных исследований на р. Лена в 2018 г.

№ п/п	Параметр, единица измерения	Значение
1	Средний интервал между пунктами приема (ПП), м	50
2	Средний интервал между пунктами возбуждения (ПВ), м	19
3	Максимальный вынос ПП—ПВ, не менее, м	8000
4	Шаг дискретизации, мс	2
5	Источники возбуждения/кол-во в группе, шт.	Пневмоисточники «Малыш»/10
6	Временной интервал между воздействиями, с	23
7	Регистрирующая аппаратура	«Байкал-7», «Байкал-АСН»
8	Сейсмоприемники	«GS-One» или группы из трех GS20DX



Рис. 1. Схема профилей речной сейсморазведки МОГТ-2D, по которым имеются архивные данные с возможностью переинтерпретации для изучения глубинного строения земной коры.

l — линии профилей.

Полевые сейсмические работы в нижнем течении р. Лена заказаны АО «Иркутскгеофизика» и в 2018 г. были выполнены с привлечением сотрудников ФИЦ ЕГС РАН.

ОПИСАНИЕ ДАННЫХ И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Экспериментальной базой исследования являются наборы непрерывных сейсмических записей, полученных автономными регистраторами «Байкал-7», расставленными по берегу реки (рис. 2). Источники возбуждения — группа из десяти пневмоисточников типа «Малыш». Основные параметры системы наблюдения представлены в таблице. Для анализа выбран 60-километровый участок профиля, расположенный в нижнем течении Лены (см. рис. 2, *a*).

На рисунке 3 показана схема построения монтажей сейсмограмм с использованием непрерывных записей регистраторов «Байкал». Исходная запись содержит серию сейсмических импульсов от воздействий пневмоисточников с известным временем срабатывания. В ФИЦ ЕГС РАН разработано специализированное программное обеспечение (ПО «SSlicer»), позволяющее формировать монтажи сейсмограмм. Длина записи на результирующей сейсмограмме определена геологическим заданием, исходя из глубинности исследований, и составляла в данном случае 6 с. Кроме этого, геологическим заданием были ограничены и максимальные расстояния между источниками и приемниками до 8000 м. Подобные сейсмограммы, ограниченные по времени и максимальным расстояниям, являлись результатом полевых

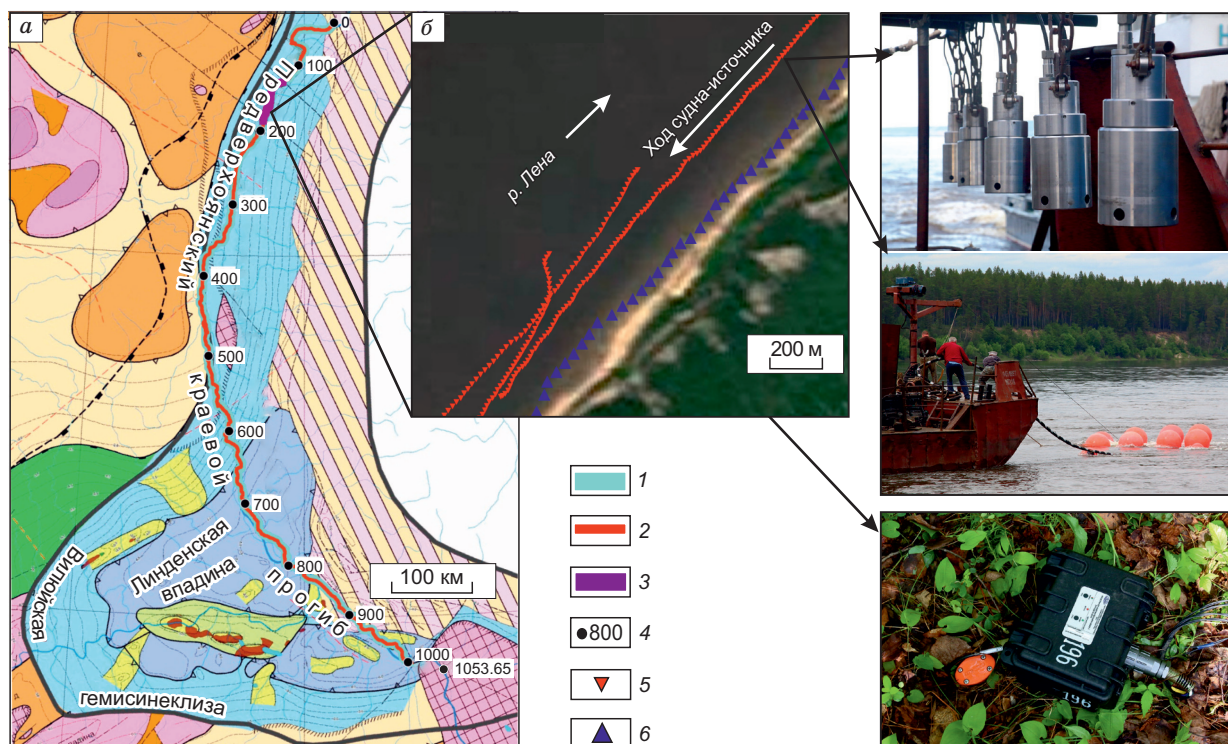


Рис. 2. Схема обработки речного сейсморазведочного профиля на р. Лена в 2018 г.

а — профиль на структурно-тектонической карте, составленной в АО «СНИИГГиМС» (<http://www.sniiggims.ru/maps/strtect.html>); *б* — детальная схема обработки на основе спутникового снимка (<https://www.google.ru/maps/>). 1 — линия приема; 2 — линия источников; 3 — анализируемый участок профиля; 4 — отметки расстояния по региональному профилю, км; 5 — пневмоисточники типа «Малыш»; 6 — пункты приема (регистраторы типа «Байкал»).

сейсморазведочных работ и именно в таком виде сдавались заказчику. Исходные непрерывные записи до настоящего времени не использовались, однако были сохранены в цифровых архивах и находятся в ФИЦ ЕГС РАН. Таким образом, существует техническая возможность формировать сейсмограммы с большими удалениями источников—приемник и большей длительности, вплоть до интервала между воздействиями, который для данного участка профиля составлял 23 с. Это даст возможность строить временные разрезы с существенно большей глубиной по сравнению с разрезами, получаемыми стандартной сейсморазведкой МОГТ-2D.

Анализ изученности района исследований методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [Атлас..., 2013] показал, что речной сейсморазведочный профиль не пересекается профилями ГСЗ, проходящими на расстояниях в 30—70 км с севера и с юга. Как пример, на рис. 4 представлен фрагмент временного разреза, полученного при производстве речных сейсморазведочных работ МОГТ-2D. Здесь и далее начальная и конечная точка 60-километрового профиля соответствуют 130 и 190 км регионального профиля. Видно, что разрез освещает лишь самую верхнюю часть земной коры до времен 1—3 с. Таким образом, глубинное строение данного участка Предверхооянского прогиба ранее не было изучено.

Ввиду отсутствия сведений о строении земной коры на выбранном участке профиля, была построена приближенная скоростная модель по данным с ближайших профилей ГСЗ («Шпат» и «Горизонт»), по данным из работ [Атлас..., 2013; Кашубин и др., 2018]: глубина до поверхности Мохоровичича (далее — граница М) меняется в пределах 42—46 км, а средняя скорость продольных волн составляет 6.6—6.7 км/с. Рассчитаны теоретические сейсмограммы отраженных волн от подошвы земной коры (видимая частота волн выбрана равной 10 Гц) в моделях с пониженными (глубина 42 км, скорость 6.6 км/с) и повышенными (глубина 46 км, скорость 6.7 км/с) значениями мощности (рис. 5). По этим данным можно приближенно рассчитать, до каких времен на разрезах ОГТ следует ожидать проявлений отражающих границ, они составляют от 12.5 до 13.7 с. Необходимо отметить, что величины средней скорости в земной коре, использованные при расчетах, несколько выше значений, взятых из другого источника [Глубинное строение..., 1991]: так при глубинах до М в 42—46 км скорость продольных волн не превышает 6.5—6.6 км/с. Если использовать указанные значения средней скорости, то при тех же глубинах до М времена вступления отраженных продольных волн будут составлять от 12.9 до 13.9 с.

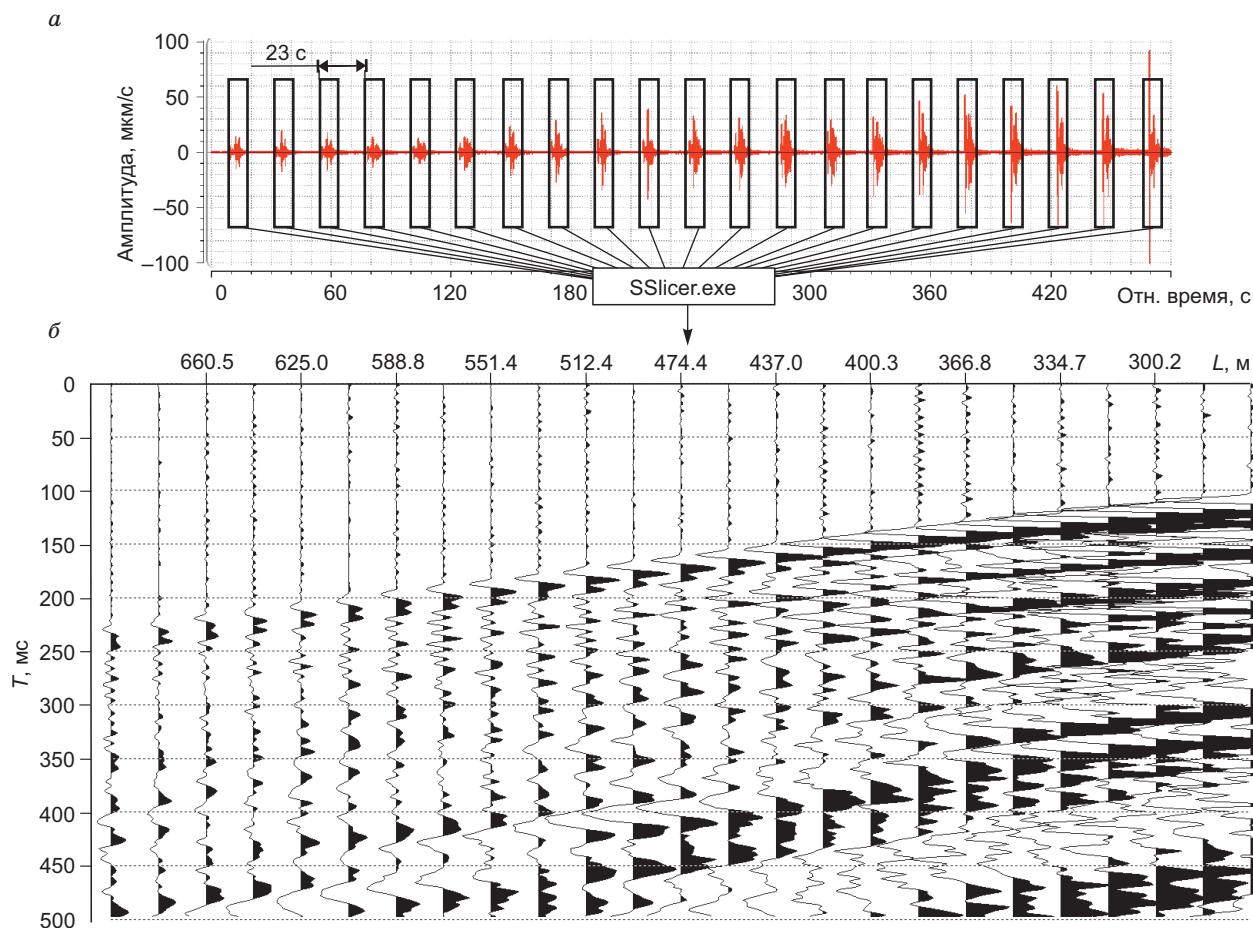


Рис. 3. Схема построения монтажей сейсмограмм из непрерывных записей автономных сейсмических регистраторов типа «Байкал».

a — исходная запись, *б* — результат монтажа.

По представленным теоретическим расчетам можно заключить, что влияние неточностей в определении значений эффективной скорости ($v_{\text{ОГТ}}$) на качество получаемого разреза методом ОГТ несущественно. Это объясняется малыми удалениями источник—приемник относительно глубины до границы — лучи отраженных волн практически вертикальные (рис. 5, *a*). Так, при удалениях до 10 км, частоте сигнала в 10 Гц и вариации скорости $v_{\text{ОГТ}}$ в пределах 6—7 км/с, различия кинематических поправок за счет разной кривизны годографов не превышают четверти видимого периода сигнала (см. рис. 5, *б, в*).

На рисунке 6 представлен пример типичной сейсмограммы, полученной при речных сейсмозаведочных исследованиях в нижнем течении Лены в 2018 г. Видно, что если на небольших временах (как правило, до 2 с) в волновом поле можно визуально проследить целевые отраженные волны, то на больших временах (порядка 13—14 с, где по предварительной скоростной модели следует ожидать вступлений отраженных волн от границы М) полезных сигналов не наблюдается. Предположим, что отраженные волны от границы М были зафиксированы

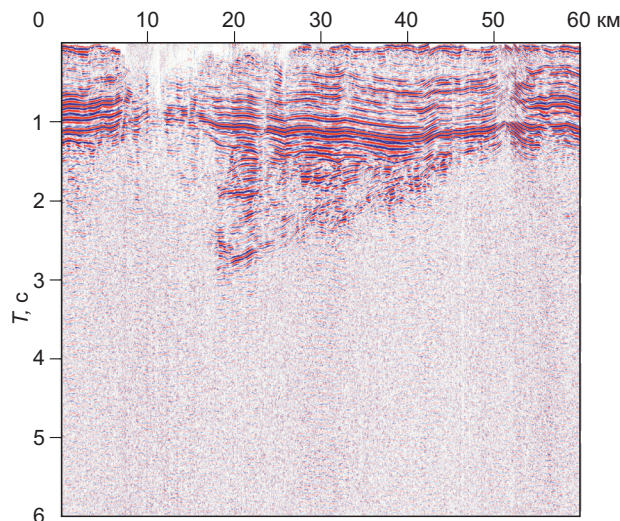


Рис. 4. Фрагмент временного разреза, полученного при региональной речной сейсмозаведке МОГТ-2D на р. Лена в 2018 г.

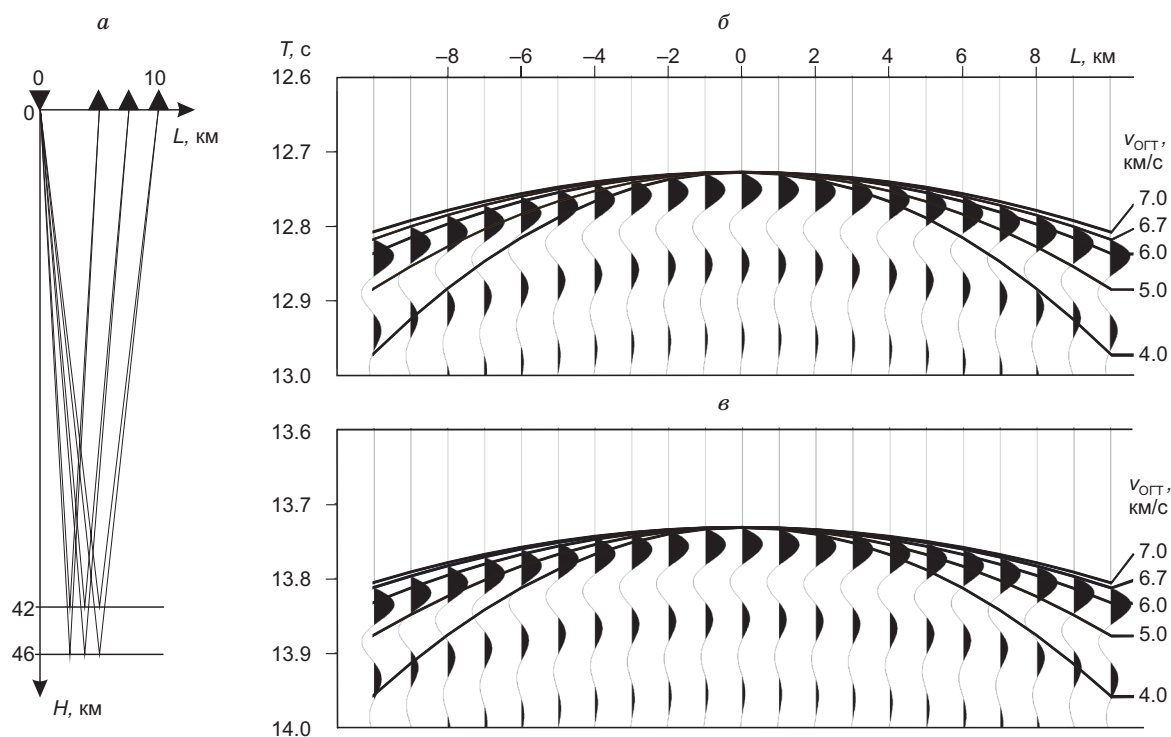


Рис. 5. Лучевая схема (а) и теоретические сейсмограммы (б, в) отраженных волн для однослойных однородных моделей земной коры.

б и в в моделях с $H = 42$ км, $v = 6.6$ км/с и $H = 46$ км, $v = 6.7$ км/с соответственно.

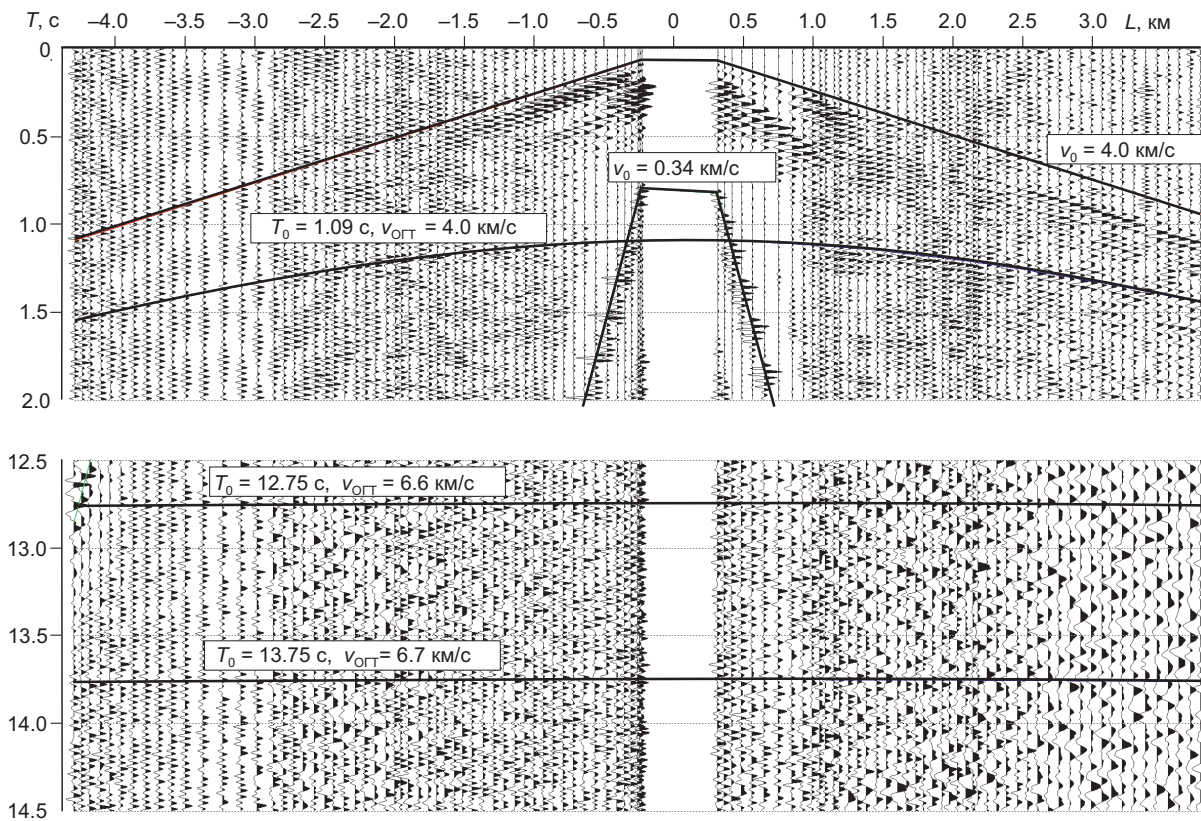


Рис. 6. Фрагмент типичной сейсмограммы, полученной при работах МОГТ-2D в нижнем течении р. Лена.

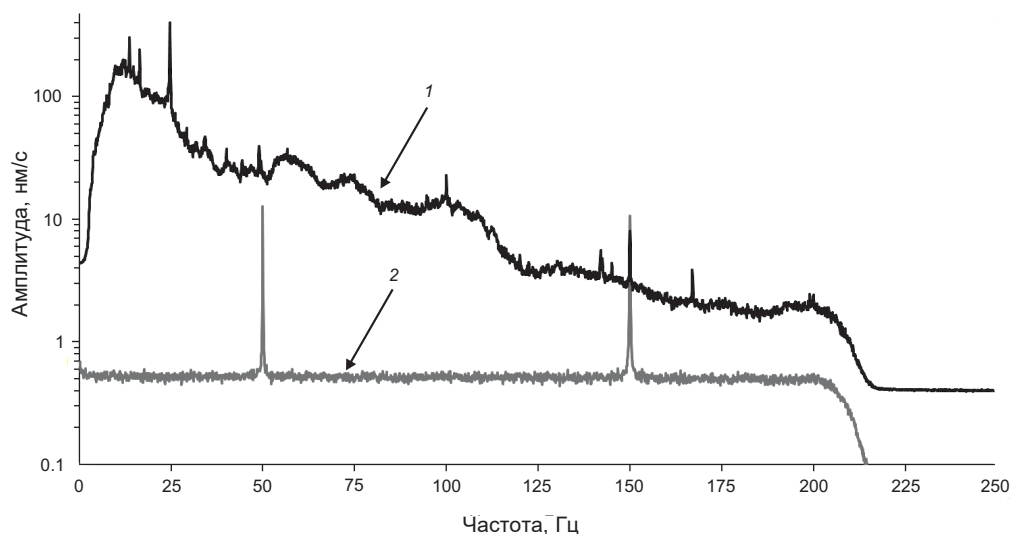


Рис. 7. Усредненные амплитудные спектры сейсмических и аппаратурных шумов для регистратора «Байкал-7» с вертикальным сейсмоприемником «GS-One».

1, 2 — вертикальное и горизонтальное положение сейсмоприемника соответственно.

сейсмической аппаратурой, но амплитуда их значительно ниже фона сейсмического шума и для их выделения требуется применять многократное суммирование по методу ОГТ. Тогда следует оценить, насколько позволяет это сделать динамический диапазон использованной сейсмической аппаратуры.

Оценка проведена путем сравнения амплитудного спектра микросейсмических колебаний, записанных в полевых условиях регистратором «Байкал-7» с вертикальным сейсмоприемником «GS-One», и спектра аппаратурного шума (рис. 7). Последний был получен из записи, когда вертикальный сейсмоприемник лежал горизонтально. Из данных, приведенных на рис. 7, можно оценить, что амплитуда сейсмического шума в интервале частот 10—20 Гц на два и более порядка выше, чем у аппаратурного. Отсюда можно полагать, что есть возможность из цифровой записи выделять слабые сигналы с амплитудой значительно меньше сейсмического шума как минимум на два порядка, для чего потребуется примерно 10 000-кратное суммирование.

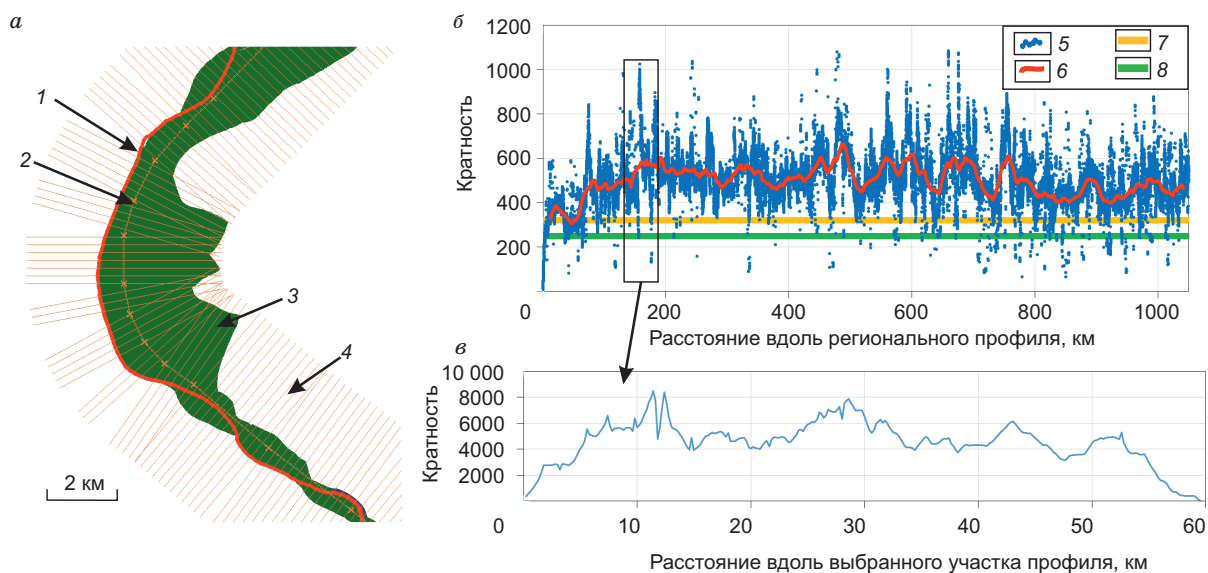


Рис. 8. Схема бинирования фрагмента речного сейморазведочного профиля (а) и графики кратности (б, в):

б — при размере бина 25×2500 м и ограничении максимальных удалений до 8000 м, в — при размере бина 200×2500 м и неограниченных удалениях. 1 — пневмоисточники; 2 — траверс-линия; 3 — множество средних точек; 4 — бины; 5–8 — кратности: 5, 6 — фактическая; 6 — усредненная; 7, 8 — соответственно требуемая и минимально допустимая кратность по геологическому заданию.

Высокую кратность можно получить за счет уменьшения расстояния между пунктами взрыва, увеличения баз зондирования и за счет увеличения размера бина вдоль профиля. Как правило, при интерпретации данных сейсморазведки указанный размер задается равным половине от интервала между пунктами приема или возбуждения. Так, при обработке сейсморазведочных данных, полученных на р. Лена в 2018 г., он составлял 25 м. При этом ширина бина достигала 2500 м из-за существенной криволинейности речного профиля и разброса средних точек (рис. 8, *а*). Кратность суммирования изменялась от 400 до 600 (см. рис. 8, *б*). Для изучения глубокозалегающих границ (в десятки километров), устанавливать небольшой размер бина (25 м) не имеет смысла. Указанный параметр можно увеличить в разы вдоль профиля, что приведет к росту кратности. Как пример, на рис. 8, *в* показана кратность, получившаяся после бинирования фрагмента профиля площадками размером 200×2500 м. Видно, что кратность существенно увеличилась — до 5000. Дополнительный прирост кратности возник также за счет использования всех имеющихся удалений источник—приемник. Следует отметить, что увеличение размера бина не только повышает кратность, но и одновременно приводит к уменьшению детальности разреза. Поэтому при обработке данных следует подобрать оптимальное его значение.

Основные графы обработки данных, такие как геометризация сейсмограмм, бинирование по криволинейному профилю, полосовая фильтрация, регулировка амплитуд, ввод кинематических поправок, суммирование с построением временных разрезов, выполнялись с использованием ПО «RadexPro», разработанного компанией ООО «Деко-геофизика СК».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Как отмечалось выше, в зарегистрированном при речной сейсморазведке первичном волновом поле визуально не наблюдается отраженных волн от глубинных границ. Используемая аппаратура имеет достаточный динамический диапазон для возможности многократного (как минимум до 10 000 крат) суммирования по методу ОГТ. Первоначально мы попытались просуммировать данные в области времен около 13—15 с (где ожидается проявление отражений от границы М), используя упрощенные параметры обработки, которые задавались исходя из следующих соображений. Известно, что отраженные волны от поверхности М достаточно низкочастотные (как правило, от первых Гц до первого десятка Гц) по срав-

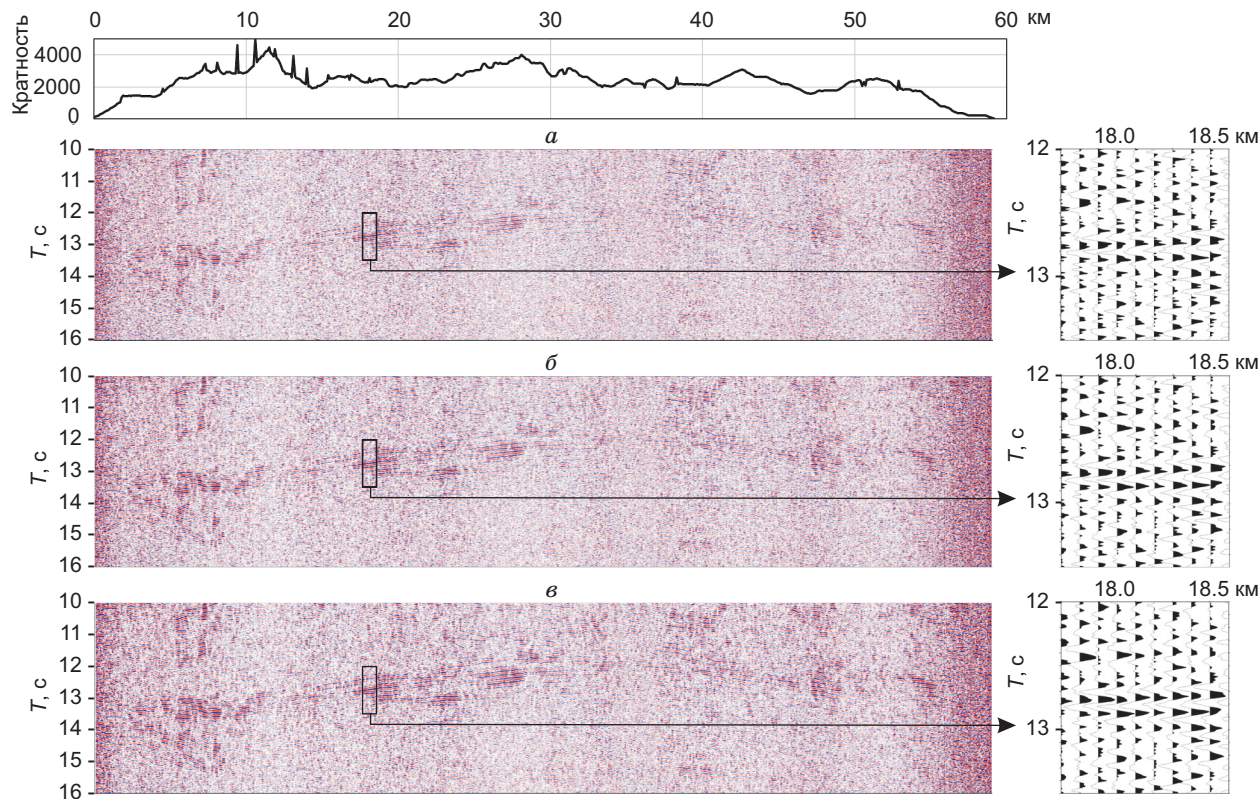


Рис. 9. Фрагменты временных разрезов после различной фильтрации исходных данных.

а, б, в — применены полосовые фильтры 5—15, 5—12 и 5—10 Гц соответственно.

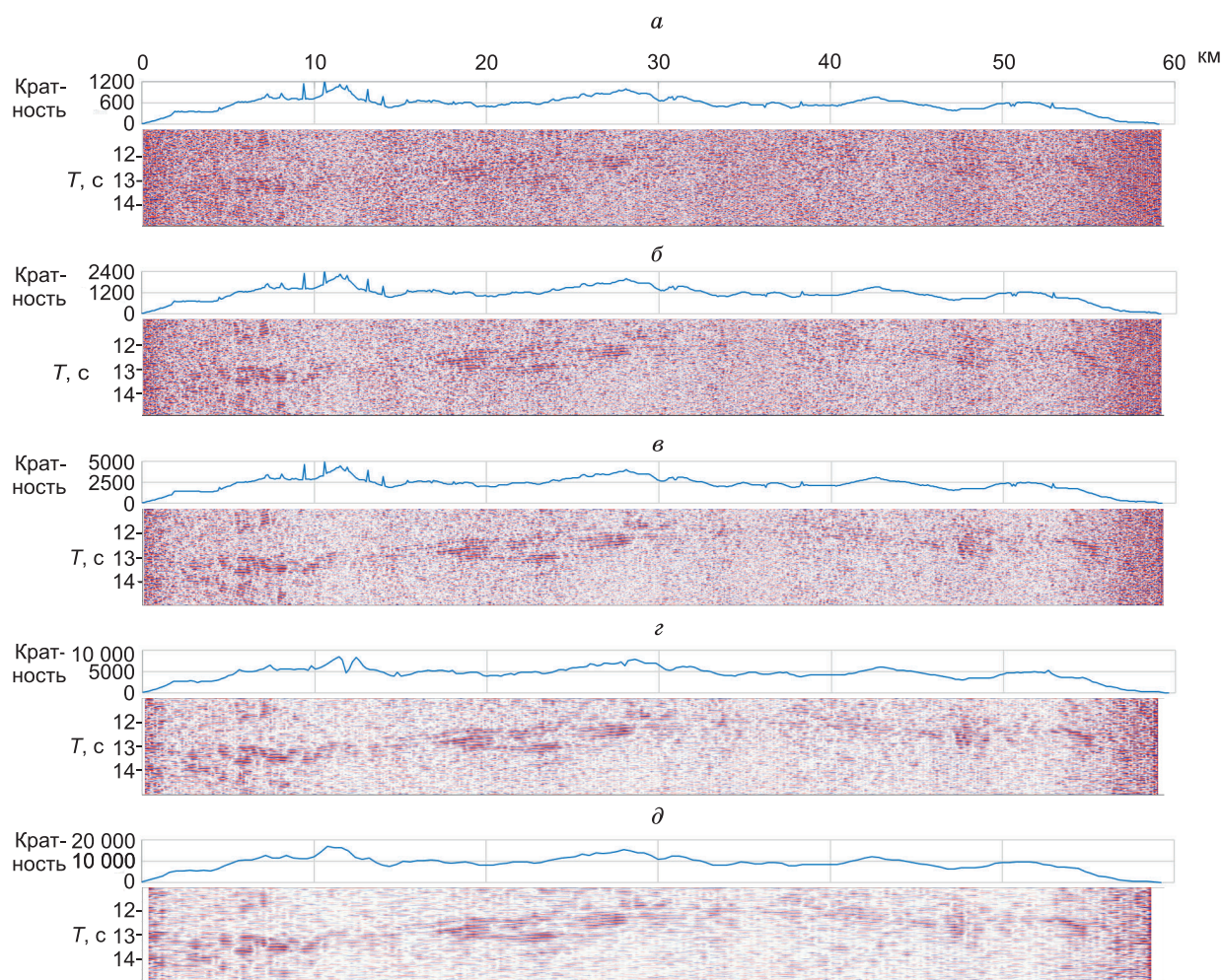


Рис. 10. Фрагменты временных разрезов, рассчитанных при различной кратности.

а, б, в — при размерах бинов 100×2500 м, прореживание с оставлением 25 % (*а*) и 50 % (*б*) данных; (*г, д*) — при размерах бинов 200×2500 и 400×2500 соответственно.

нению с целевыми волнами, которыми оперируют при сейсморазведке (десятки Гц). Исходя из этого первичные данные были отфильтрованы в полосах частот от 5 до 10—14 Гц. Следующим шагом применялась процедура автоматического регулирования усиления (АРУ) с окном в 1 с. Произведено бинирование данных с площадками 100×2500 м. Кратность на исследуемом участке профиля составила от 2000 до 4000. Последней процедурой был ввод кинематических поправок — они вычислялись в рамках упрощенной скоростной модели, представленной на рис. 5. Полученные в результате суммирования фрагменты временных разрезов с тремя разными фильтрациями показаны на рис. 9. Видно, что в разрезах на временах около 13—14 с прослеживаются волны, которые предположительно являются отраженными от М. Наиболее контрастно они выделяются при фильтрации 5—10 Гц. Поэтому в дальнейшем исследовании мы использовали указанную полосу частот. Видимый период сигнала, прослеживаемого на укрупненных фрагментах разрезов при трех разных фильтрациях, составляет около 8 Гц.

Следующим этапом мы попытались оценить, какую кратность следует использовать для повышения качества временных разрезов. На рисунке 10 представлены фрагменты разрезов, построенных при обработке различных наборов исходных данных. Пониженную кратность (относительно расчетов, представленных на рис. 9, где средняя кратность составляла 2500) мы получили путем прореживания данных (использовали каждую 2-ю или каждую 4-ю трассы), а повышенную — за счет увеличения размера бина вдоль линии профиля. Видно, что уменьшение кратности (до 600—1200) приводит к закономерному ухудшению качества разреза (снижается отношение сигнал/шум, фрагменты отражающих границ не просматриваются). Увеличение кратности до 5000—10 000 путем увеличения размеров бина приводит к видимому росту отношения сигнал/шум. Однако дополнительной информации это не дает,

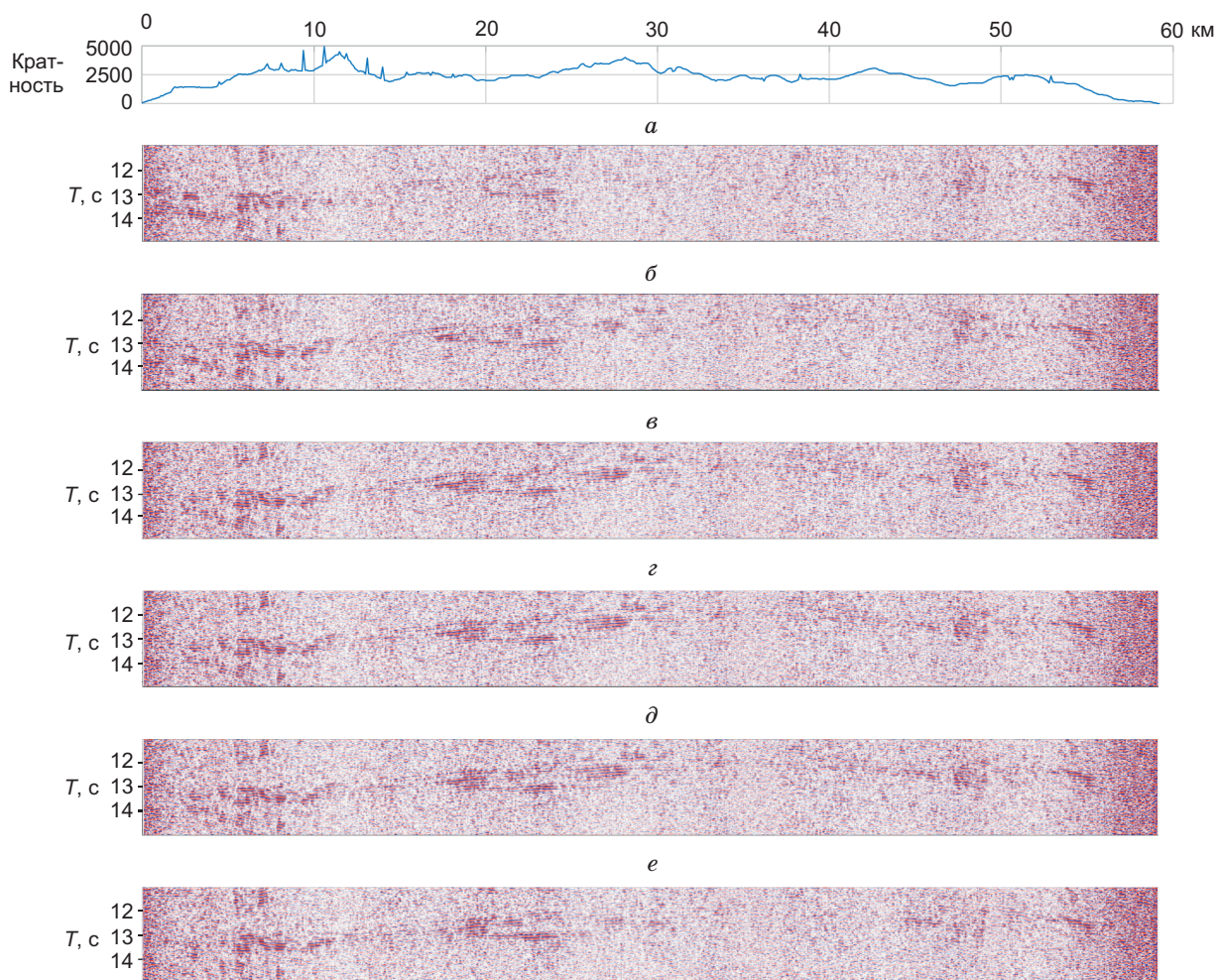


Рис. 11. Фрагменты временных разрезов, рассчитанных при разных скоростных моделях.

а—д — значения $v_{\text{ОГТ}}$ 4.0, 5.0, 6.0, 6.5, 7.0 км/с соответственно; *е* — без ввода кинематических поправок (эквивалентно бесконечной $v_{\text{ОГТ}}$).

а детальность разреза по горизонтали уменьшается. Поэтому для дальнейшего анализа мы использовали бинирование с площадками 100×2500 м, при котором средняя кратность на исследуемом фрагменте профиля составляет 2500.

Как отмечалось выше, теоретические расчеты показали, что неточность значений эффективных скоростей для расчета кинематических поправок будет слабо влиять на качество временных разрезов. Это справедливо для использованной системы наблюдений (малые удаления источник—приемник относительно глубины до границы, низкая частота сигнала — 8 Гц), и в этом одно из главных отличий настоящих исследований от традиционной сейсморазведки. По оценкам, изменения в средней скорости $v_{\text{ОГТ}}$ (используемой для расчета кинематических поправок на временах 13—14 с) в пределах 6—7 км/с не должно повлиять на качество построения разреза. Этот интервал значительно шире диапазона возможных значений средней скорости в земной коре, который для Восточной Сибири составляет 6.3—6.6 км/с [Глубинное строение..., 1991]. Как видно из рисунка 11, где представлены фрагменты временных разрезов, посчитанных при разных скоростях $v_{\text{ОГТ}}$, они заметно ухудшаются только при использовании значений скорости в 4—5 км/с, а это противоречит известным представлениям о скоростном строении земной коры. Таким образом, и теоретически, и экспериментально показано, что для имеющейся системы наблюдений неточность задания $v_{\text{ОГТ}}$ (в разумных пределах) не оказывает существенного влияния на качество построения временных разрезов.

При производстве и обработке данных сейсморазведочных работ особое внимание уделяется борьбе с помехами. Как правило, если в исходных данных присутствуют трассы с повышенным фоном помех, то они исключаются из обработки. При выполнении речной сейсморазведки в нижнем течении

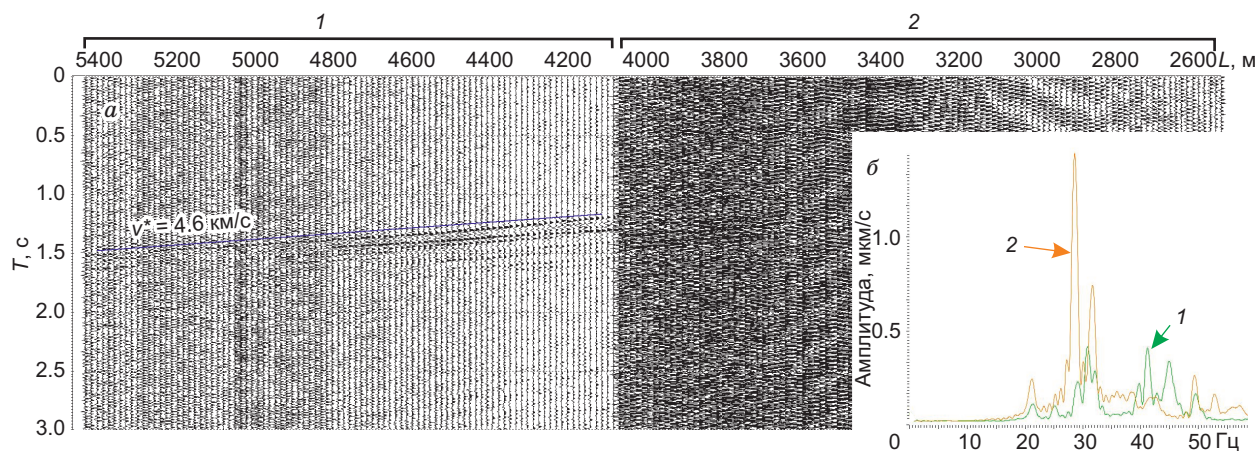


Рис. 12. Сейсмограмма общего пункта приема, зарегистрированная при разных погодных условиях (а) и усредненные амплитудные спектры (б).

1, 2 — слабый и умеренный ветер, пониженный и повышенный уровень помех соответственно.

Лены, ввиду отсутствия промышленных источников шумов, основным источником помех являлся ветер и, как следствие, волны, воздействующие на берег, вдоль которого устанавливались сейсмоприемники. Хотя работы и проводились в тихую погоду, тем не менее ввиду больших пространств открытой воды (ширина реки в нижнем течении достигала десяти и более км) ряд сейсмограмм содержали в себе высокие по уровню помехи (рис. 12). Из рисунка видно, что частоты помех составляли от 20 Гц и выше. Это перекрывает частотный диапазон полезных волн, используемых при малоглубинной сейсморазведке. Поэтому такие данные считаются браком и исключаются из обработки. В настоящем исследовании, как

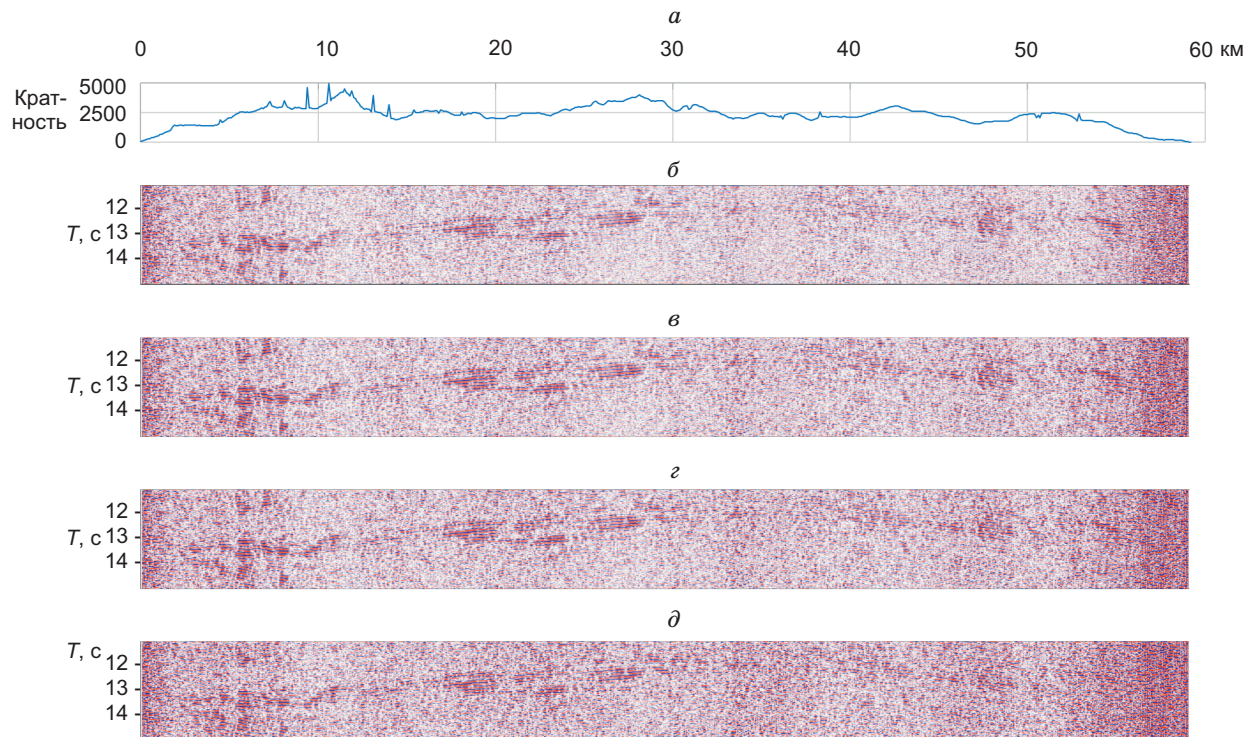


Рис. 13. Результат суммирования сейсмограмм с разным средним уровнем сейсмического шума.

а, б — соответственно график кратности и фрагмент временного разреза для исходного набора данных; в—д — фрагменты временных разрезов, посчитанных при исключении трасс с повышенным уровнем сейсмического шума (25, 50 и 75 % соответственно).

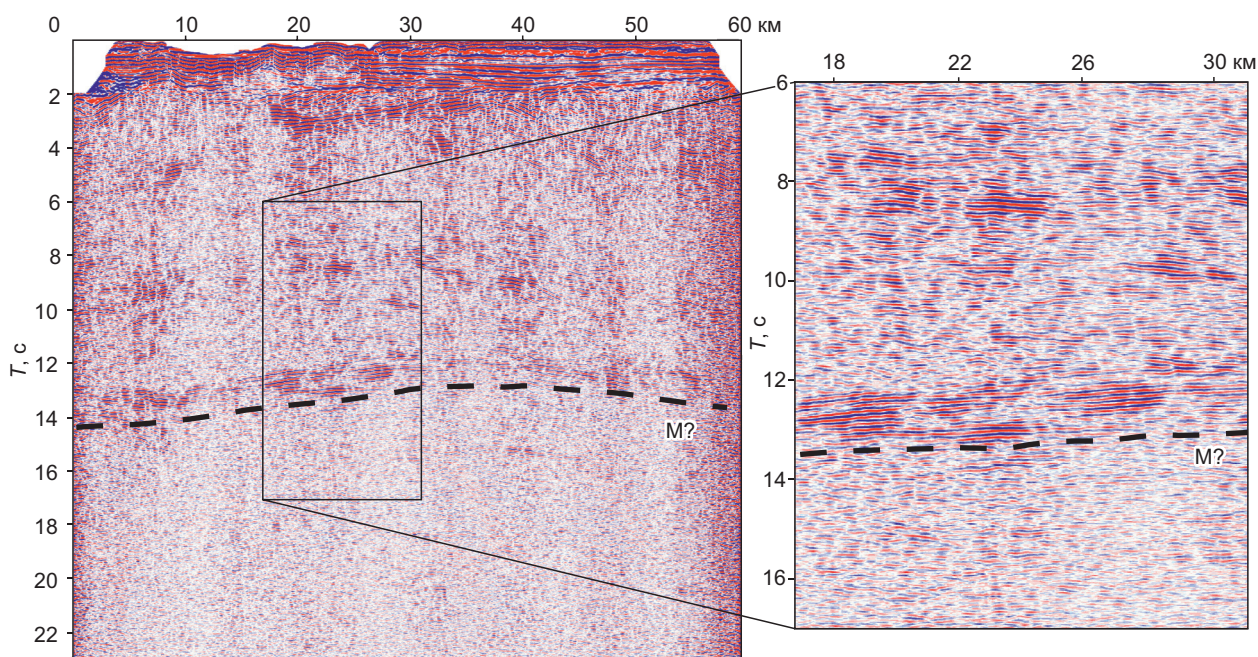


Рис. 14. Временной разрез, построенный для исследуемого фрагмента речного сейсморазведочного профиля.

было показано выше, частоты полезных сигналов существенно ниже частотного диапазона помех и наличие сейсмограмм, аналогичных изображенным на рис. 12, не должно ухудшить качество разреза. Для проверки этого предположения, мы произвели расчеты фрагментов временных разрезов для разных выборок данных. В первую очередь рассчитали разрез при использовании всех имеющихся данных, включая данные с повышенным уровнем помех. Затем для каждой трассы были рассчитаны средние (по модулю) амплитуды помех, произведена отбраковка трасс с повышенным шумом и рассчитаны соответствующие разрезы. Из рисунка 13, на котором представлены результаты расчетов фрагментов разрезов по различным (по уровню помех) выборкам данных, видно, что исключение шумных трасс не приводит к улучшению качества разреза. Более того, при исключении большого числа данных из обработки (50, 75 %) качество разреза заметно снижается, вероятно, из-за снижения кратности суммирования. Таким образом, можно заключить, что данные, которые при обычной сейсморазведке считаются браком из-за наличия ветровых помех, в настоящем исследовании могут быть использованы в обработке.

На рисунке 14 представлен временной разрез, построенный по всей совокупности имеющихся данных для выделенного 60-километрового участка профиля в нижнем течении Лены. Штриховой линией отмечено предполагаемое положение границы М. Двойное время пробега меняется от 13.0 до 14.2 с. Тогда в предположении, что средняя скорость продольных волн в земной коре на данном участке составляет около 6.6 км/с, глубина до М достигает 43—47 км. Эти значения не противоречат имеющимся сведениям о мощности земной коры в близлежащих районах и существенно их дополняют, так как на исследуемом участке не проводились работы по изучению глубинного строения земной коры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что используемая современная технология речных сейсморазведочных исследований позволяет изучать строение не только верхней части земной коры, но и по всей ее мощности, включая поверхность Мохоровичича. В ходе исследования определены основные принципы обработки данных для расчетов временных разрезов и сформулированы следующие выводы:

1. Малоамплитудные колебания отраженных волн от глубинных границ выделяются за счет многократного суммирования, существенно большего, чем при традиционной сейсморазведке. Используемая аппаратура имеет достаточный динамический диапазон, а высокая кратность достигается за счет увеличения площадки бинирования.

2. Ветровые помехи, снижающие качество временных разрезов верхней части земной коры, не ухудшают разрез на больших глубинах и этот материал не следует исключать из обработки.

3. Речные сейсморазведочные работы, выполненные по технологии, разработанной в ФИЦ ЕГС РАН, на реках Восточной Сибири в объеме порядка 2700 км, содержат в себе данные, позволяющие построить глубинные разрезы вплоть до границы Мохоровичича и эту работу необходимо проделать.

Авторы статьи признательны К.Н. Каюрову и Д.В. Напрееву, сотрудничеству с которыми позволило выполнить исследования.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) и с использованием данных, полученных при проведении полевых сейсморазведочных работ на р. Лена в 2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год» [Электронное издание]. СПб, ВСЕГЕИ, 2013, 94 с. URL: <http://www.vsegei.com/ru/info/seismic/> (дата обращения: 24.09.2021).

Бадиков А.Н., Гуленко В.И. Источник упругих волн для сейсморазведки на предельном мелководье и в транзитных зонах // Приборы и системы разведочной геофизики, 2009, т. 29, № 3, с. 24—26.

Гинсбург Г.Д., Кремлев А.Н., Григорьев М.Н., Ларкин Г.В., Павленкин А.Д., Салтыкова Н.А. Фильтрогенные газовые гидраты в Черном море (21-й рейс НИС «Евпатория») // Геология и геофизика, 1990 (3), с. 10—20.

Глубинное строение территории СССР / Ред. В.В. Белоусов. М., Наука, 1991, 224 с.

Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудрявцев И.В., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А., Эринчек Ю.М. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // Региональная геология и металлогения, 2018, № 76, с. 9—21.

Селезнев В.С., Николаев В.Г., Буслов М.М., Бабушкин С.М., Ларкин Г.В., Евдокимов А.А. Структура осадочных отложений Телецкого озера по данным непрерывного одноканального сейсмопрофилирования // Геология и геофизика, 1995, т. 35 (10), с. 123—132.

Селезнев В.С., Сысоев А.П., Игнатов А.М., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Бабушкин С.М., Брыксин А.А., Кашун В.Н., Иванов А.И., Варламов С.Н., Евдокимов А.А., Лазутин Д.Г., Захарычев В.В. Детальная высокоразрешающая сейсморазведка при нефтегазовых работах в зонах шельфа, речной и озерной сети в условиях сверхмалых (0.5—1 м) глубин // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа. Пятая научно-практическая конференция. Т. 1, Ханты-Мансийск, Изд-во «Путиведь», 2002, с. 301—309.

Селезнев В.С., Соловьев В.М., Сысоев А.П., Бабушкин С.М., Еманов А.Ф., Брыксин А.А. Сейсмические исследования на акваториях: проблемы, результаты, перспективы // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа. Материалы Седьмой научно-практической конференции. Т. 1, Ханты-Мансийск, Издат. дом «ИздатНаукаСервис», 2004, с. 204—212.

Селезнев В.С., Соловьев В.М., Сысоев А.П., Бабушкин С.М., Брыксин А.А. Детальные сейсмические исследования на акваториях и в транзитных (вода—суша) зонах // Пути повышения эффективности геолого-разведочных работ на нефть и газ в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия). Материалы Всероссийской конференции, Новосибирск, СНИИГГиМС, 2006, с. 212—215.

Селезнев В.С., Соловьев В.М., Сысоев А.П., Бабушкин С.М., Кашун В.Н., Брыксин А.А., Лисейкин А.В. Речная сейсморазведка на востоке России // Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края. Сборник материалов научно-практической конференции. Красноярск, КНИИГГиМС, 2007, с. 143—146.

Сысоев А.П., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Бабушкин С.М., Брыксин А.А. Сейсмические исследования на акваториях и в транзитных зонах: методика, технология и результаты // Сейсмические исследования земной коры. Сборник докладов Международной научной конференции, посвященной 90-летию академика Н.Н. Пузырева. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004, с. 184—189.

Seleznov V.S., Klerkx J., Solovyov V.M., Babushkin S.M., Larkin G.V., Emanov A.F. Structure of sedimentary cover in the Teletskoye Lake: seismic data // Continental rift tectonics and evolution of sedimentary basins. International Workshop INTAS Joint Russian–Belgian Research Project (Novosibirsk, May 22—24). Novosibirsk, 1996, p. 67—70.