

УДК 550.34

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ВСЮ МОЩНОСТЬ СРЕДСТВАМИ РЕЧНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

© 2022 г. А. В. Лисейкин^{1,*}, В. С. Селезнев¹, В. М. Соловьев^{1,2}, А. А. Брыксин¹

Представлено академиком РАН А.Э. Конторовичем 30.09.2021 г.

Поступило 30.09.2021 г.

После доработки 10.10.2021 г.

Принято к публикации 11.10.2021 г.

Показана возможность использования данных речной сейсморазведки на нефть и газ для изучения глубинного строения земной коры. Технология основана на использовании водных пневматических источников и устанавливаемых на берегу автономных сейсмических регистраторов, настроенных на непрерывную сейсмическую запись. Выполнено около 2700 км профилей методом ОГТ-2D на реках Восточной Сибири – Лена, Нижняя Тунгуска, Витим. Изучено строение верхней части земной коры (глубины до нескольких км), в то время как ее глубинная структура остается неизвестной. В работе, на примере 60-км участка профиля, расположенного в нижнем течении р. Лена, показано, что в материалах речных сейсморазведочных работ, выполненных по технологии, разработанной в ФИЦ ЕГС РАН, содержатся данные, позволяющие построить разрезы для земной коры на всю ее мощность вплоть до границы Мохоровичича. Малоамплитудные колебания отраженных волн от глубинных границ выделяются за счет широкого динамического диапазона используемой аппаратуры и многократного суммирования, существенно большего, чем при традиционной сейсморазведке. Высокая кратность достигается за счет уменьшения расстояния между пунктами взрыва, увеличения баз зондирования и площадки бинирования.

Ключевые слова: речная сейсморазведка, глубинное строение, метод ОГТ-2D, р. Лена

DOI: 10.31857/S2686739722020098

ВВЕДЕНИЕ

Специалисты ФИЦ ЕГС РАН начали выполнять морские сейсморазведочные работы начиная с 1983 г., на НИС “Евпатория” водоизмещением 3050 т [1]. В 1994–1995 гг. возникла необходимость проведения сейсморазведочных работ на Телецком озере, где самым большим судном была самоходная баржа водоизмещением 30 т [2, 3]. 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, Нижняя Тунгуска, Обь, Вах) [4]. Технология регистрации данных постоянно совершен-

ствовала 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 из 10 пневматических источников “Малыш”, производства ООО “Пульс” [5]. Суммарный объем группы 15 л, рабочее давление – 140 атм. При интервале между воздействиями 18–23 с расстояние между пунктами взрыва составляло от 10 до 20 м. Используемые пневмоисточники характеризуются широким частотным диапазоном излучателя (практически равномерная амплитудно-частотная характеристика в диапазоне от первых единиц Гц до 200 Гц) и могут работать на глубинах до 0.5–0.7 м. Выполнено около 2700 км профилей по рекам Восточной Сибири (рис. 1). Разработано специализированное программное обеспечение (ПО “SSlicer”), позволяющее строить монтажи сейсмограмм с приведением их к виду, аналогичному получаемым стандартными многоканальными сейсмо-

¹ Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, Новосибирск, Россия

² Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской Академии наук”, Новосибирск, Россия

*E-mail: avl@gs.nsc.ru

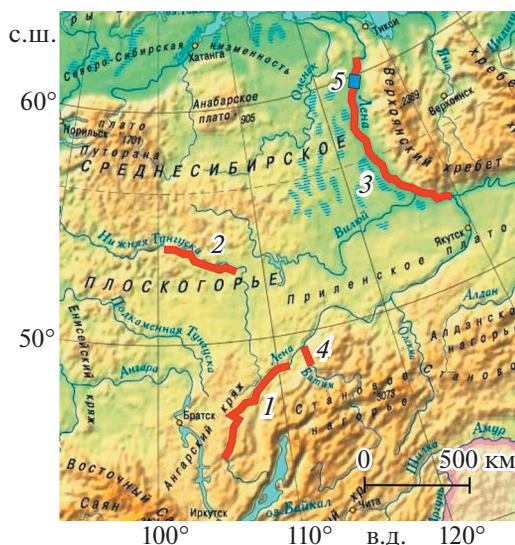


Рис. 1. Схема профилей речной сейсморазведки МОГТ-2D, по которым имеются архивные данные с возможностью переинтерпретации для изучения глубинного строения земной коры. 1–4 – линии профилей, отработанных с 2007 по 2019 г.; 5 – участок профиля, выбранный для анализа.

разведочными станциями. Длительность записи таких сейсмограмм определялась геологическими заданиями, ориентированными на получение сведений только о верхней части земной коры, и составляла 6–10 с. Глубинная структура земной коры в этих местах остается неисследованной. Как правило, проведение работ методом ОГТ-ГСЗ входит отдельным пунктом в комплекс региональных работ. 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 [6]. Интервал между сейсмическими воздействиями в использованной технологии проведения речных сейсморазведочных работ на нефть и газ больше этой величины, а запись – непрерывная. Предложенная технология позволяет сформировать сейсмограммы с увеличенным временем регистрации до 18–23 с и, соответственно, строить временные разрезы и изучать глубинное строение среды на участках выполненных речных сейсморазведочных профилей на всю земную кору и верхнюю часть мантии, что и показано на примере 60-км участка профиля, расположенного в нижнем течении р. Лена (рис. 1).

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 являлись наборы непрерывных сейсмических записей, полученных автономными регистраторами «Байкал-7» с сейсмоприемниками «GS-One». Расставлялись они на участке профиля длиной около 60 км, расположенном в нижнем течении р. Лена, по ее берегу. Источники возбуждения – группа из 10 пневмоисточников «Малыш». Средний интервал расстояний на этом участке между сейсмоприемниками составлял 50 м, между источниками – 19 м, а временной интервал между воздействиями – 23 с. Максимальные удаления источник–приемник до 16000 м.

Методика построения монтажей сейсмограмм с использованием непрерывных записей регистраторов «Байкал» состояла в следующем. Исходная запись содержит серию из 700–1500 сейсмических импульсов от пневмоисточников с известным временем срабатывания. С использованием разработанного в ФИЦ ЕГС РАН программного обеспечения (ПО «SSlicer») выполнены разделение непрерывных записей на трассы, соответствующие источникам колебаний, и их сборка в сейсмограммы общего пункта приема. Длительность сейсмограмм составила 23 с, что заведомо больше ожидаемого времени двойного пробега отраженных продольных волн от границы Мохоровичича (далее – «граница М»).

Как пример, на рис. 2 представлен фрагмент временного разреза, полученный ранее при интерпретации 6-секундных сейсмограмм с применением традиционных приемов цифровой обработки методом ОГТ-2D. Видно, что разрез освещает лишь самую верхнюю часть земной коры до времен 1–3 с, в то время как глубинная структура остается неизвестной. Таким образом, задача исследования состоит в том, чтобы, используя сейсмограммы увеличенной длительности, построить временной разрез, освещающий строение земной коры на всю ее мощность.

Проведенный анализ сейсмограмм показал, что на больших временах (от 2 до 13–15 с) отраженные волны не видны. Конечно, отраженные волны от глубинных границ фиксируются сейсмической аппаратурой, но амплитуда их значительно ниже фона сейсмического шума, и для их выделения требуется применять многократное суммирование методом ОГТ. Чтобы установить, достаточно ли динамического диапазона использованной сейсмической аппаратуры для выделения слабых сигналов от глубинных границ, проведено сравнение амплитудного спектра микросейсмических колебаний, записанных в полевых условиях и спектра аппаратурного шума. Последний был получен из записи, когда вертикальный сейсмоприемник лежал горизонтально. Установ-

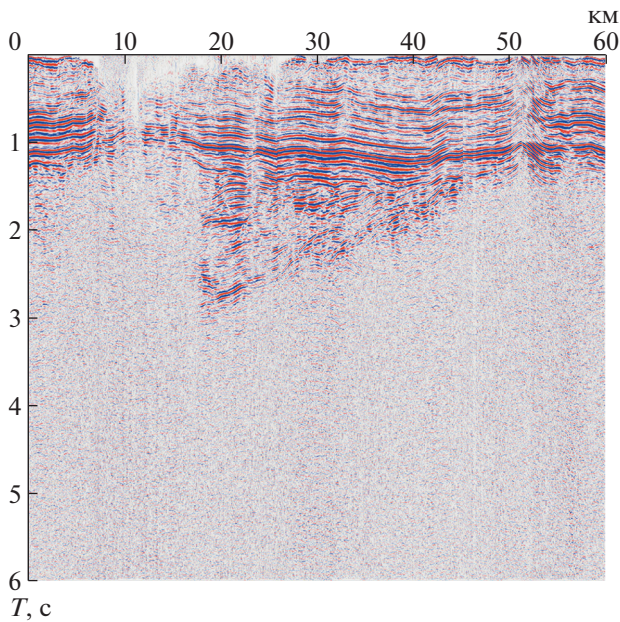


Рис. 2. Фрагмент временного разреза, полученного при региональной речной сейсмозазведке МОГТ-2D на р. Лена в 2018 г.

лено, что амплитуда сейсмического шума в интервале частот 10–20 Гц на два и более порядка выше, чем у аппаратного. Отсюда можно полагать, что есть возможность из цифровой записи выделять слабые сигналы с амплитудой значительно меньше сейсмического шума, как мини-

мум на два порядка, для чего потребуется примерно 10000-кратное суммирование.

Высокую кратность можно получить за счет уменьшения расстояния между пунктами взрыва, увеличения баз зондирований и за счет увеличения размера бина вдоль профиля. Как правило, при интерпретации данных сейсмозазведки он задается равным половине от интервала между пунктами приема или возбуждения. Так, при обработке сейсмозазведочных данных, полученных на р. Лена в 2018 г., он составлял 25 м. Ширина достигала 2500 м из-за существенной криволинейности речного профиля и разброса средних точек (рис. 3а). Кратность суммирования изменялась от 400 до 600 (рис. 3б). Для изучения границ на глубинах в десятки километров устанавливать размер бина в 25 м не имеет смысла. Указанный параметр можно увеличить в разы вдоль профиля, что приведет к росту кратности. Как пример, на рис. 3в показана кратность, получившаяся после бинирования фрагмента профиля площадками размером 200 × 2500 м. Видно, что кратность существенно увеличилась – до 5000. Следует отметить, что увеличение размера бина не только повышает кратность, но и одновременно приводит к уменьшению детальности по длине 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

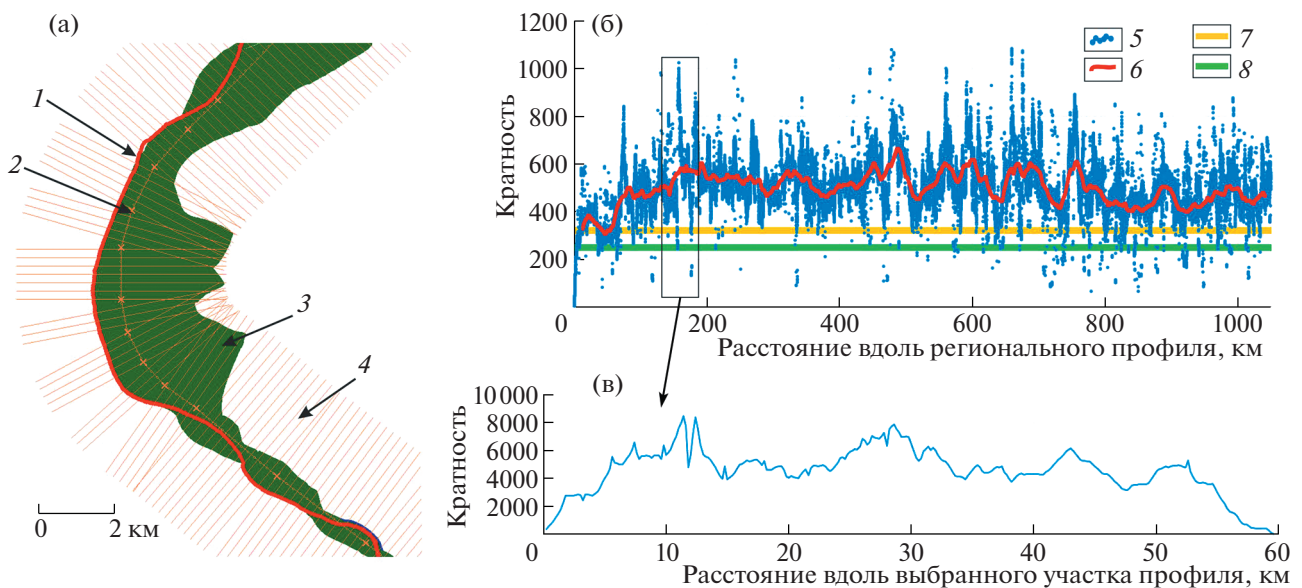


Рис. 3. Схема бинирования фрагмента речного сейсмозазведочного профиля (а) и графики кратности (б, в): (б) – при размере бина 25 × 2500 м и ограничении максимальных удалений до 8000 м, (в) – при размере бина 200 × 2500 м и неограниченных удалениях. 1 – пневмоисточники; 2 – траверс-линия; 3 – множество средних точек; 4 – бины; 5–8 – кратности: 5 – фактическая; 6 – усредненная; 7, 8 – соответственно, требуемая и минимально допустимая согласно геологическому заданию.

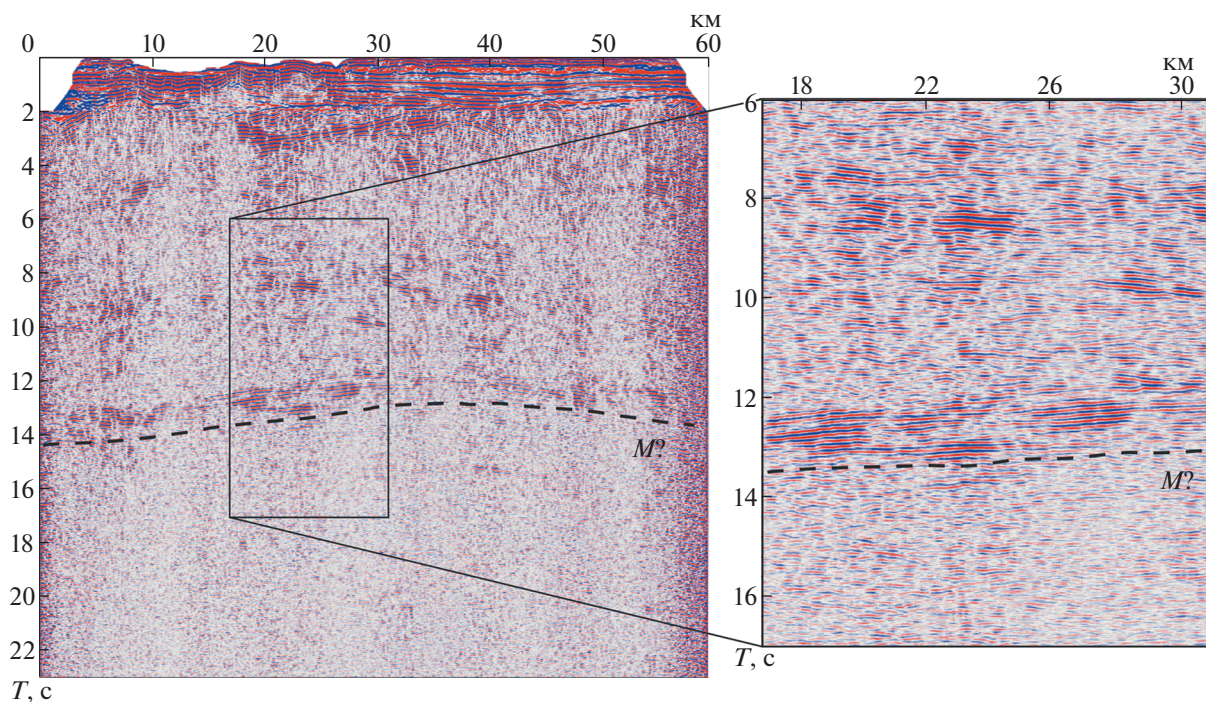


Рис. 4. Временной разрез, построенный для исследуемого участка речного сейсморазведочного профиля.

поправок, суммирование с построением временных разрезов, выполнялись в ПО “RadexPro” (разработчик – ООО “Деко-геофизика СК”).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось выше, в зарегистрированном при речной сейсморазведке первичном волновом поле на больших временах визуально не наблюдается отраженных волн от глубинных границ. Чтобы определить граф цифровой обработки, был проведен ряд тестов на теоретических и экспериментальных данных. Теоретические тесты включали расчет синтетических сейсмограмм отраженных продольных волн от подошвы земной коры. Ввиду отсутствия точных сведений о скоростном строении среды в исследуемом районе была выбрана приближенная одномерная двухслойная модель среды. Необходимо отметить, что нам не удалось провести уточняющий скоростной анализ средствами использованного ПО, вероятно, по причине экстремально низкого соотношения сигнал/шум. Использовались опубликованные сведения, охватывающие исследования ближайших районов [7, 8]. Глубина до границы М варьировалась в интервале 42–46 км. Средняя скорость продольных волн в земной коре – 6.5–6.6 км/с. По результатам расчетов ожидаемые времена двойного пробега отраженных от границы М продольных волн для выбранного участка профиля составляют 12.9–13.9 с. Для имеющейся системы наблюдений, когда расстояния источник-прием-

ник в разы меньше глубины до отражающих границ, эффективную скорость для расчета кинематических поправок можно взять равной средней скорости для региона. Это подтвердилось в дальнейших расчетах с использованием экспериментальных данных. Так, разрезы на временах в 13–14 с, где ожидается проявление границы М, рассчитанные при разных эффективных скоростях от 6.0 до 7.0 км/с, практически не отличались друг от друга.

Экспериментальные тесты включали в себя оценки частотного диапазона полезного сигнала, оптимальных параметров бинирования и влияние сейсмических помех.

Частотный диапазон определялся путем перебора различных полосовых фильтров в применении к исходным данным. Результаты показали, что наиболее подходящим является диапазон фильтра 5–10 Гц, а видимая частота полезного сигнала составляет 7–8 Гц.

Параметры бинирования определялись путем расчета временных разрезов с различными размерами отражающей площадки вдоль профиля и их сравнения. Для расчетов использовались бины размером 50, 100, 200, 400 и 800 м. Оптимальным оказалось бинирование с площадками 100 × 2500 м, при котором средняя кратность на исследуемом фрагменте профиля составила 2500. Отметим, что размер бина в 100 м представляется малым, если сравнивать его с длиной волны: при скорости 6.5 км/с и частоте сигнала 8 Гц она составляет

около 800 м. Однако расчеты показали, что для использованных данных увеличение размера бина больше 100 м не приводит к появлению дополнительной информации, а при достижении 400 и 800 м — наблюдается ухудшение детальности разреза по горизонтали.

Оценивая влияние помех, основным источником которых являлся ветер, анализировались спектры помех и показано, что их частоты составляли от 20 Гц и выше. Это существенно выше частоты полезного сигнала, с которым мы имеем дело при изучении глубинных границ, значит, такие помехи не должны влиять на качество получаемых разрезов. Для проверки этого предположения произведены расчеты фрагментов временных разрезов по выборкам данных, имеющим разный уровень помех. Результаты подтвердили, что ветровые помехи, ухудшающие качество временных разрезов верхней части земной коры, не ухудшают качество разреза на больших глубинах, и этот материал не следует исключать из обработки.

На рис. 4 представлен временной разрез, построенный по всей совокупности имеющихся данных для выделенного 60-км участка профиля в нижнем течении р. Лена. Пунктирной линией отмечено предполагаемое положение границы М. Двойное время пробега меняется от 13.0 до 14.2 с, что при средней скорости продольных волн в земной коре на данном участке около 6.6 км/с, дает глубину до границы М в 43–47 км. Эти значения не противоречат имеющимся сведениям о мощности земной коры в близлежащих районах и существенно их дополняют [7, 8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования удалось разработать методику, позволяющую из материалов речных сейсморазведочных работ получать сейсмограммы с длительностью регистрации до 18–23 с, и по ним строить временные разрезы до поверхности Мохоровичича и глубже, выделяя малоамплитудные колебания отраженных волн от глубинных границ. Этому способствовало: широкий динамический диапазон используемой аппаратуры, уменьшенные расстояния между пунктами взрыва и увеличенные базы зондирования, что при использовании бина размером 100 × 2500 м повысило кратность наблюдений до 2500. Кратность наблюдений была повышена также за счет вовлечения в процесс обработки сейсмограмм с ветровыми помехами, которые не использовались при стандартной обработке.

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.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных при проведении полевых сейсморазведочных работ на р. Лена в 2018 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Seleznev V.S., Nikolaev V.G., Buslov M.M., Babushkin S.M., Larkin G.V., Evdokimov A.A. The Structure of Sedimentary Deposits of Lake Teletskoe According to the Data of Continuous One-channel Seismic Profiling // Russian Geology and Geophysics. 1995. 36 (3). P. 113–121.
3. Seleznyov 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. 1996. P. 67–70.
4. 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: КНИИГиМС, 2007. С. 143–146.
5. 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.
6. Глубинное строение территории СССР. М.: Наука, 1991, 224 с.
7. Атлас “Опорные геолого-геофизические профили России”. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 г. // СПб.: ВСЕГЕИ, 2013, 94 с. <http://www.vsegei.com/ru/info/seismic/>
8. Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудряцев 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.

AN APPROACH FOR STUDYING OF THE EARTH'S CRUST STRUCTURE AT FULL THICKNESS BY MEANS OF RIVER SEISMIC EXPLORATION

A. V. Lisekin^{a,#}, V. S. Seleznev^a, V. M. Soloviev^{a,b}, and A. A. Bryksin^a

^a *Seismological Department of the Universal Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^b *Altay-Sayan Department, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[#] *E-mail: avl@gs.nsc.ru*

Presented by Academician of the RAS A.E. Kontorovich September 30, 2021

The possibility of using river seismic data for oil and gas exploration to study the deep structure of the earth's crust is shown. The technology is based on the use of water pneumatic sources and bank-mounted autonomous seismic recorders set up for continuous seismic recording. About 2.700 km of profiles by the CDP-2D method were completed on the rivers of Eastern Siberia—Lena, Nizhnyaya Tunguska, Vitim. The structure of the upper part of the earth's crust (depths up to several km) has been studied, while its deep structure remains unknown. In this work, on the example of a 60-km section of the profile located in the lower reaches of the Lena River, it is shown that the materials of river seismic surveys carried out using the technology developed in the GS RAS contain data which allow us to construct cross sections for the Earth's crust throughout its thickness up to the Moho boundary. Low-amplitude fluctuations of reflected waves from deep boundaries are highlighted due to the wide dynamic range of the instrumentation used and the multiple summation, significantly higher than in traditional seismic surveys. High multiplicity is achieved by reducing the distance between blast points, increasing the sounding bases and the binning area.

Keywords: river seismic survey, depth structure, CDP-2D method, Lena River