

Возможность определения глубинного строения земной коры в Восточной Сибири по материалам речного сейсмического профилирования

А. В. Лисейкин^{1}, В. С. Селезнев¹*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Новосибирск, Российская Федерация

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

Аннотация. По результатам анализа сейсмограмм большой длительности (до 23 с) после переработки архивных материалов речного сейсмического профилирования методом ОГТ-2D на 60-километровом участке в нижнем течении р. Лена в 2018 г., а именно материалов непрерывной наземной регистрации сейсмических колебаний автономной аппаратурой «Байкал» от водных пневматических источников «Малыш», показана возможность определения глубинного строения земной коры по малоамплитудным сигналам продольных отраженных волн на временах до 14-15 с за счет широкого динамического диапазона используемой аппаратуры и многократного суммирования до 2500. Высокая кратность при этом достигается за счет уменьшения расстояния между пунктами воздействия, увеличения баз зондирований и площади бинирования. В Восточной Сибири выполнено более 2700 погонных километров профилей по аналогичной технологии, по которым возможно определение строения земной коры территорий, не изученных ранее глубинными сейсмическими методами.

Ключевые слова: речное сейсмическое профилирование, глубинное строение земной коры, метод ОГТ-2D

Possibility of Determining Deep Structure of the Earth's Crust in the Eastern Siberia Based on the Materials of River Seismic Profiling

A. V. Liseikin^{1}, V. S. Seleznev¹*

¹Seismological Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

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

Abstract. The article presents possibility of determining deep structure of the Earth's crust by low-amplitude signals of longitudinal reflected waves at times up to 14-15 s due to wide dynamic range of the using equipment and multiple summation up to 2500. The conclusion is based on the results of long-duration (up to 23 s) seismograms analysis, carried out after reprocessing of the archival materials of river seismic profiling by the CDP-2D method in a 60-kilometer section in the lower part of the Lena river in 2018, exactly it was the materials of continuous ground-based registration of seismic oscillations by "Baikal" equipment from "Malysh" water pneumatic sources. High multiplicity is obtained by reducing the distance between shot points, adding source-receiver distances and increasing bin size. In the Eastern Siberia more than 2700 km of profiles were carried out using similar technologies; it allows to identify structure of the Earth's crust of the areas, which have not been studied by deep seismic methods previously.

Keywords: river seismic profiling, deep structure of the Earth's crust, CDP-2D method

Введение

Специалистами Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН с 2006 г разрабатывается новая технология речных сейсморазведочных исследований методом ОГТ-2D на нефть и газ [1], включающая непрерывную наземную регистрацию сейсмических колебаний (по берегу реки) автономной трех- и четырехканальной аппаратурой серии «Байкал» [2]. Источником сейсмических воздействий является группа из десяти пневмоисточников типа «Малыш», хорошо зарекомендовавших себя при выполнении сейсморазведочных исследований в условиях сверхмалой (до 1.0-0.5 м) глубины водоема [3]. Оработано более 2700 погонных километров профилей по рекам Восточной Сибири: Лена, Нижняя Тунгуска, Витим (рис. 1а). По этим материалам строятся временные разрезы до глубины в первые километры (времена до 6-10 с, рис. 1б), в то время как строение земной коры на глубину до 40-50 км (или до 13-15 с – времена вступлений отраженных волн от поверхности Мохоровичича в Восточной Сибири по данным [4]) на сегодня остается не изученным. В исследовании показывается, как его определить с использованием сейсмограмм увеличенной длительности, получаемых в результате речного сейсмического профилирования методом ОГТ-2D. Безусловно, группа пневматических источников (суммарный объем – 15 л, давление – 140-150 атм.), разработанная для исследования только верхней части земной коры генерирует сигналы с недостаточной энергией для изучения недр Земли на больших глубинах стандартными способами, поэтому особое внимание уделяется поиску подходов к увеличению отношения сигнал/шум.

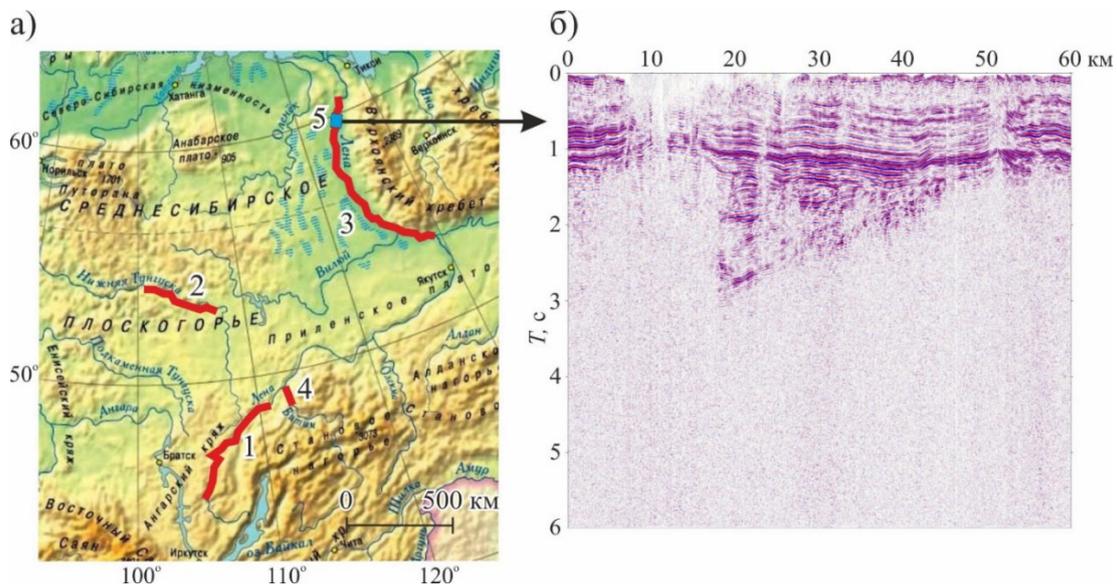


Рис. 1. Схема профилей речной сейсморазведки методом ОГТ-2D, по которым имеются архивные материалы с возможностью переобработки для построения сейсмограмм большой длины (а) и временной разрез по результатам традиционной обработки (б).

1-4 – линии профилей, оработанных на: 1, 3 – р. Лена в 2007-2008 гг. и 2018 г., 2 – р. Нижняя Тунгуска в 2012 г. и 4 – р. Витим в 2019 г.; 5 – участок профиля, выбранный для анализа.

Цель исследования – повышение глубинности исследований строения земной коры по архивным материалам речного сейсмического профилирования методом ОГТ-2D.

Задача исследования состоит в разработке методики формирования сейсмограмм увеличенной длительности за счет переобработки архивных материалов сейсмического профилирования методом ОГТ-2D и их анализу.

Методы и материалы

Экспериментальной базой исследования являются архивные материалы речного сейсмического профилирования методом ОГТ-2D выполненного по р. Лена в 2018 г. по технологии, разработанной специалистами ФИЦ ЕГС РАН. Полевые работы выполняли специалисты ООО НПП ГА «Луч» с привлечением сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН для сбора полевого материала и камеральной обработки. Исходные материалы представляют собой наборы непрерывных сейсмических записей автономных четырехканальных регистраторов «Байкал-7» с сейсмоприемниками «GS-One». Регистрация выполнялась по берегу р. Лена на участке профиля длиной около 60 км, расположенном в нижнем течении (рис. 1). Каждая запись содержит серию из 700-1500 воздействий от пневмоисточников, с интервалом в 23 с. Источники возбуждения – группа из 10-ти пневмоисточников «Малыш», суммарный объем 15 л, давление 140-150 атм. Средний интервал расстояний на этом участке между сейсмоприемниками составлял 50 м, между источниками – 19 м. Максимальные удаления источник-приемник – до 16000 м.

Для возможности использования непрерывных записей в обработке (для построения временных разрезов) в ходе камеральных работ производится их разделение на трассы и сборка в единый массив с приведением к стандартному виду (многоканальные сейсмограммы общего пункта приема или взрыва, в формате SEG-Y) с использованием специализированного программного обеспечения (ПО «SSlicer» [5]). Длина записи на результирующей сейсмограмме определяется геологическим заданием исходя из глубинности исследования и составляет 6 с. Кроме этого, геологическим заданием ограничены и максимальные расстояния между источниками и приемниками до 8000 м. Сейсмограммы с описанными ограничениями являются результатом полевых сейсморазведочных работ и именно в таком виде сдаются заказчику. Исходные же непрерывные записи до настоящего времени не используются, однако, сохранены в цифровых архивах. Таким образом, существует техническая возможность переобработать архивные материалы и сформировать сейсмограммы с увеличенными удалением источник-приемник и длительностью, вплоть до интервала между воздействиями, который для данного участка профиля составляет 23 с. Эта величина заведомо больше времени двойного пробега отраженных продольных волн от границы Мохоровичича и дает возможность строить временные разрезы с существенно большей глубинностью по сравнению с разрезами, получаемыми стандартной сейсморазведкой МОГТ-2D.

Анализ одиночных сейсмограмм увеличенной длительности показал, что на больших временах (от 2 с до 13-15 с) отраженные волны не проявляются, что

свидетельствует о том, что их амплитуда значительно ниже уровня сейсмического шума. Вместе с тем характеристики используемой аппаратуры таковы, что амплитуда сейсмического шума (регистрируемого в полевых условиях) на один-два порядка выше, чем аппаратурного (рис. 2). Это позволяет регистрировать малоамплитудные сигналы, выделение которых возможно после повышения отношения сигнал/шум путем многократного суммирования. Так, для выделения сигналов по амплитуде на два порядка ниже уровня шума, необходимо просуммировать порядка 10000 трасс.

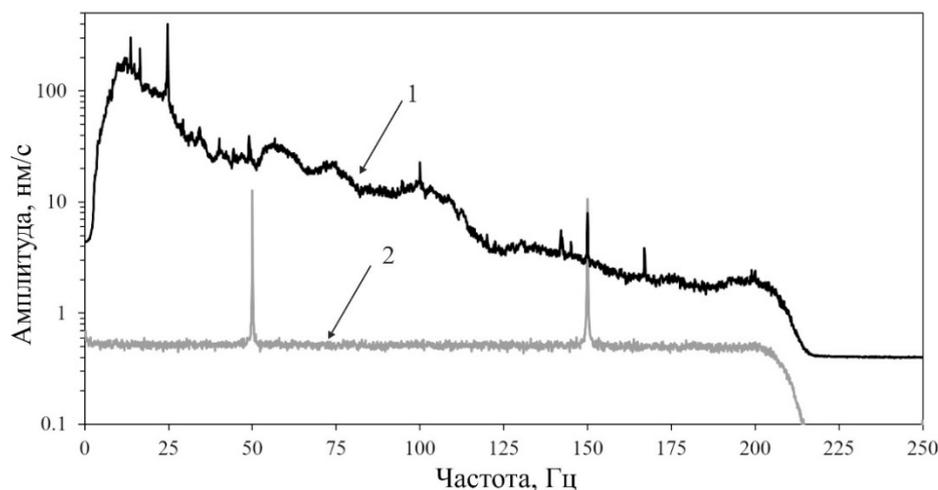


Рис. 2. Графики усредненных амплитудных спектров сейсмического (1) и аппаратурного (2) шумов при регистрации в полевых условиях сейсмостанцией «Байкал-7» с сейсмоприемником GS-One

Высокая кратность в речной сейсморазведке достигается за счет уменьшения расстояния между пунктами взрыва и увеличения баз зондирований [6]. Так, при исследованиях на р. Лена в 2018 г. средняя кратность составляла 500, в то время как по геологическому заданию необходимо обеспечить кратность в 320 (рис. 3б). Существенно (в разы) повысить кратность в соответствии с решаемой задачей (определение строения земной коры на глубинах в десятки километров) можно за счет увеличения размера бина вдоль профиля (dX на схеме бинирования из рис. 3а). Так, при обработке материалов сейсморазведки на верхнюю часть земной коры он составляет 25 м. Для изучения границ на глубинах в десятки километров установка столь малого размера бина нецелесообразна, его можно увеличить в несколько раз, что приведет к соответствующему росту кратности. Как пример, на рис. 3в показана кратность в результате бинирования фрагмента профиля площадками с размером по профилю в 200 м: видно, что она существенно увеличивается – до значений в 5000.

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 в ПО «RadexPro» [7]. Для определения параметров

графа цифровой обработки проводится ряд тестов на теоретических и экспериментальных материалах.

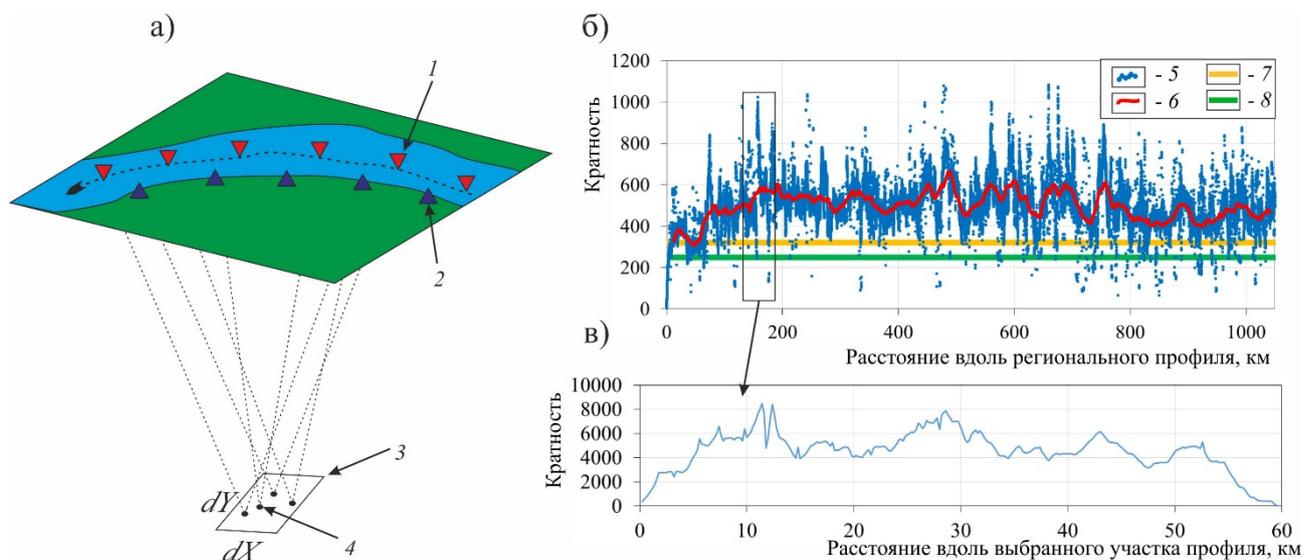


Рис. 3. Схема бинирования речного сейсмозазведочного профиля (а) и графики кратности (б, в): (б) – при размере бина $dX=25$ м и ограничении максимальных удалений до 8000 м, (в) – при $dX=200$ м и неограниченных удалениях:
 1 – пневмоисточники; 2 – пункты приема; 3 – бин; 4 – средние точки; 5 – кратности: 5 – фактическая, 6 – усредненная, 7 – требуемая и 8 – минимально допустимая по геологическому заданию

Теоретические тесты включают расчет синтетических сейсмограмм отраженных продольных волн от поверхности Мохоровичича и их анализ. Из-за отсутствия точных сведений о скоростном строении среды в исследуемом районе используется приближенная одномерная двухслойная модель. Выполнить уточняющий скоростной анализ средствами использованного ПО не удастся: с одной стороны, по причине экстремально низкого соотношения сигнал/шум, и из-за малых удалений источник-приемник по сравнению с глубиной до отражающих границ, с другой. По опубликованным сведениям [8, 9] на окружающих исследуемый участок профиля территориях глубина до границы Мохоровичича составляет 42-46 км; средняя скорость продольных волн в земной коре – 6.5-6.6 км/с. В такой модели время вступления отраженных продольных волн (на нулевых удалениях) составляет 12.9-13.9 с.

Экспериментальные тесты включают в себя оценки таких параметров как: частотный диапазон полезного сигнала, оптимальные параметры бинирования и влияние сейсмических помех.

Частотный диапазон определяется путем перебора различных полосовых фильтров в применении к исходным данным. Результаты показывают, что наиболее подходящим является диапазон фильтра 5-10 Гц, при этом видимая частота полезного сигнала составляет 7-8 Гц.

Параметры бинирования определяются путем расчета временных разрезов с различными размерами отражающей площадки и их сравнения: оптимальный

размер бина вдоль профиля (dX) равен 100 м, при котором средняя кратность составляет 2500.

Спектральный анализ записей помех, основным источником которых является ветер, показывает, что их частоты составляют больше 20 Гц. Это существенно выше частоты полезного сигнала (7-8 Гц), поэтому такие помехи не влияют на качество получаемых разрезов. Для подтверждения этого произведены расчеты фрагментов временных разрезов по выборкам данных, имеющим разный уровень помех. Результаты показывают, 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.

Результаты

Временной разрез, построенный по описанным выше материалам и методике обработки для 60-километрового участка профиля в нижнем течении р. Лена, представлен на рис. 4. Пунктирной линией отмечено предполагаемое положение границы Мохоровичича: видно, что двойное время пробега меняется от 13.0 с до 14.2 с. Это соответствует глубине до подошвы земной коры в 43-47 км при средней скорости продольных волн в земной коре в 6.6 км/с (значение с ближайшего профиля ГСЗ по данным [8]). Кроме этого, на временах порядка 7-10 с выделяются внутрикоровые границы, что позволяет определять структуру средней части земной коры.

Обсуждение

В ходе исследования разработана методика, позволяющая из материалов речного сейсмического профилирования методом ОГТ-2D на нефть и газ получать сейсмограммы с длительностью регистрации до 23 с, и по ним строить временные разрезы до поверхности Мохоровичича, выделяя малоамплитудные колебания отраженных волн от глубинных границ. Этому способствует: широкий динамический диапазон используемой аппаратуры, уменьшенные расстояния между пунктами взрыва и увеличенные базы зондирований, что при использовании бина размером 100 м вдоль профиля повышает кратность суммирования до 2500. Временной разрез, рассчитанный для 60-километрового участка профиля в нижнем течении р. Лена не противоречит опубликованным данным о глубинном строении земной коры на окружающих территориях и дополняет их. Безусловно, результаты настоящих исследований проигрывают по достоверности по сравнению с данными метода ОГТ-ГСЗ в основном из-за малой мощности используемых сейсмических источников и малых баз зондирований по сравнению с глубиной до отражающих границ. Последнее обстоятельство не дает возможности определять значения скорости отраженных волн, даже при достаточно высоком отношении сигнал/шум. Однако, учитывая, что исследования методом ОГТ-ГСЗ являются дорогостоящими и, как правило, входят отдельным пунктом в комплекс региональных работ, то представленная методика служит относительно малозатратным инструментом для получения новых сведений о глубинном строении земной коры не изученных ранее территорий.

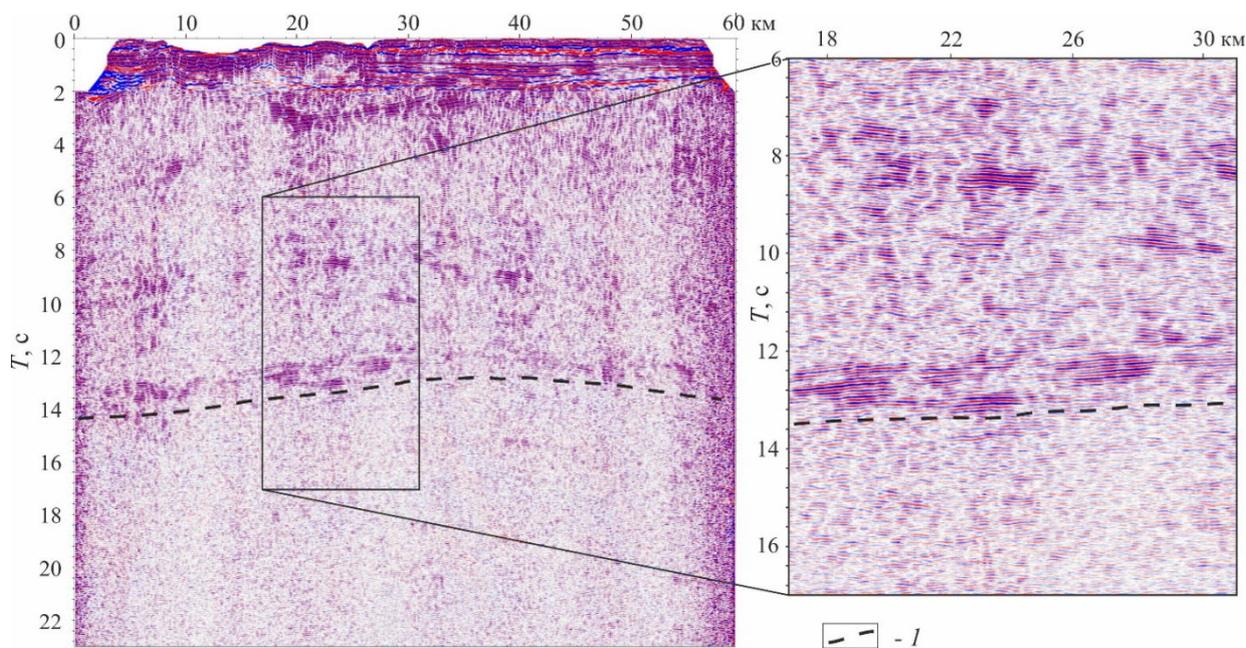


Рис. 4. Временной разрез, построенный для исследуемого участка речного сейсмозазведочного профиля:

1 – предполагаемая граница Мохоровичича

Заключение

Показано, что используемая современная технология речных сейсмозазведочных исследований методом ОГТ-2D позволяет изучать строение не только верхней части земной коры, но и на всю ее мощность. В ходе исследования определены основные принципы подготовки материалов, необходимых 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 сейсмозазведке методом ОГТ-2D. Используемая аппаратура имеет достаточный динамический диапазон, а высокая кратность достигается за счет увеличения площадки бинирования.

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

3. Речные сейсмозазведочные работы, выполненные по технологии, разработанной в ФИЦ ЕГС РАН, на реках Восточной Сибири в объеме порядка 2700 погонных километров, содержат в себе данные, позволяющие строить временные разрезы до границы Мохоровичича и эту работу необходимо проделать.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием материалов сейсмического профилирования методом ОГТ-2D, полученных при полевых работах на р. Лена в 2018 г.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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, СНИИГГиМС, Новосибирск, 2006. – С. 212-215.
2. Рыбушкин А.Ю., Терешкин Д.О. Современные сейсмические станции серии «Байкал» // В книге: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. Обнинск, 2021. – С. 76.
3. 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.
4. Глубинное строение территории СССР. М.: Наука, 1991. – 224 с.
5. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. SSlicer // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613238, 12.03.2022. Заявка № 2022613181 от 11.03.2022.
6. Seleznev, V., Liseikin, A., Bryksin, A., Babushkin, S., Sysoev, A., Mosyagin, E., Krechetov, D. Features of the technology of river seismic exploration // Marine Technologies 2019, Gelendzhik 2019. – P. 51-61.
7. Буряк С.В., Певзнер Р.Л., Полубояринов М.А., Гофман П.А., Токарев М.Ю. Система обработки сейсмических и георадиолокационных данных RadExPro Plus // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612028, 14.06.2006. Заявка № 2006611856 от 07.06.2006.
8. 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: 12.04.2022).
9. 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.

© А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, 2022