

Ганжа О.Ю.¹, Кухмазов С.У.², Ракитов В.А.³, Чернышев Ю.Г.³ (1 — Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2 — АО «Институт Оргэнергострой», 3 — филиал ОАО «ВНИИГеофизика» — Центр ГЕОН)

ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗАПИСЕЙ ВЗРЫВОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОПОРНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОФИЛЯХ ГСЗ И МОВЗ

Представлены основные этапы цифровой обработки данных глубинных сейсмических исследований на опорных и региональных профилях Центра ГЕОН. Рассмотрены особенности препроцессинга сейсмических записей, выделения регулярных волн, математического моделирования земной коры и телесеismicкой томографии. Отмечена лидирующая роль Центра ГЕОН в проведении полевых работ, цифровой обработке и интерпретации данных многоволнового ГСЗ и МОВЗ. Ключевые слова: обработка данных ГСЗ и МОВЗ, сейсмические скорости P и S-волн, моделирование земной коры, телесеismicкая томография.

Ganzha O.Yu.¹, Kukhmazov S.U.², Rakitov V.A.³, Chernyshev Yu.G.³ (1 — Shirshov Oceanology Institute RAS, 2 — Orgenergostroy Institute, 3 — GEON Centre-Branch of VNIIGeofizika)

DIGITAL PROCESSING SPECIFICITY OF THE BIG EXPLOSIONS AND EARTHQUAKES SEISMIC RECORDS ON REGIONAL TRANSECTS USING DSS AND MCWE METHODS

The main stages of digital data processing of deep seismic surveys on reference and regional profiles of the GEON Center are presented. The specificity of preprocessing of seismic records, allocation of regular waves, mathematical modeling of the earth's crust and teleseismic tomography are considered. The leading role of the GEON Center in the field work, digital processing and interpretation of multi-wave DSS and MCWE data is noted. Keywords: DSS-MCWE data processing, seismic velocity P and S-waves, earth crust modeling method, teleseismic tomography.

В период с 1971 по 1995 г. Специальная региональная геофизическая экспедиция (с 1991 г. и далее — Центр ГЕОН) в рамках Государственной программы Министерства геологии СССР по созданию опорной сети геотраверсов выполнила свыше 60 тыс. пог. км многоволновых сейсмических исследований методами ГСЗ и МОВЗ вдоль длинных опорных профилей, направленных как на решение фундаментальных задач строения земной коры и верхней мантии, так и на минерагеническое прогнозирование (рис. 1). Основные результаты региональных исследований опубликованы в работах [1, 8].

После катастрофического Спитакского землетрясения 1988 г. Центром ГЕОН совместно с другими организациями (ООО «Северо-Запад», ООО «Центр ЭМИ», Институт КНИИГиМС) было начато изучение особенностей строения земной коры сейсмоактивных районов России методами обменных волн землетрясений (МОВЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ) вдоль региональных профилей с целью разработки методики прогноза землетрясений. Работы проводились в рамках Постановления Правительства Российской Федерации от 11.05.1993 г. № 444 «О Федеральной системе сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений» и в соответствии с Методическими рекомендациями «Изучение глубинного строения сейсмоопасных зон методами разведочной геофизики» (ВНИИГеофизика, 1988). С 1999 по 2005 г. Центр ГЕОН являлся головной организацией Министерства природных ресурсов России (МПР России) по этому направлению.

Глубинные сейсмические исследования выполнялись по разработанной в Центре ГЕОН принципиально новой методике многоволнового глубинного сейсмического профилирования, основные особенности которой заключались в следующем [1]:

1. Использование при работах ГСЗ помимо базовых источников упругих колебаний химических взрывов мощностью до 4–5 т в тротиловом эквиваленте, размещенных вдоль профиля с интервалом 40–100 км, также и мирных ядерных взрывов (до 1989 г.) с расстоянием между ними 600–900 км. Шаг между пунктами дискретных наблюдений составлял 6–10 км (с 1991 г. — около 3 км). Это позволило создать две системы встречных и нагоняющих годографов — одну с длиной до 250–300 км, другую — до 1500–3500 км, что обеспечило изучение строения земной коры и верхней мантии до глубины 800 км. Начиная с 1974 г. с применением аппаратуры непрерывного действия стали регистрироваться телесеismicкие события с обработкой их записей по технологии МОВЗ и телесеismicкой томографии.

2. В обязательном порядке регистрировались три компоненты смещения почвы (Z-вертикальная и X, Y-горизонтальные, в т.ч. радиальная и тангенциальная) и выполнялась совместная обработка и интерпретация широкого класса волн: продольных (слаборефрагированных и отраженных), поперечных (слаборефрагированных и отраженных), обменных (PS и SP) сейсмических волн. Поскольку соотношение интенсивностей монотипных волн, имеющих одинаковые пути пробега, при ядерных взрывах в полтора-два раза выше, чем у химических, то это повышает надежность их выделения и корреляции, особенно поперечных волн.

3. С самого начала наблюдений аналоговые записи взрывов и землетрясений преобразовывались в циф-

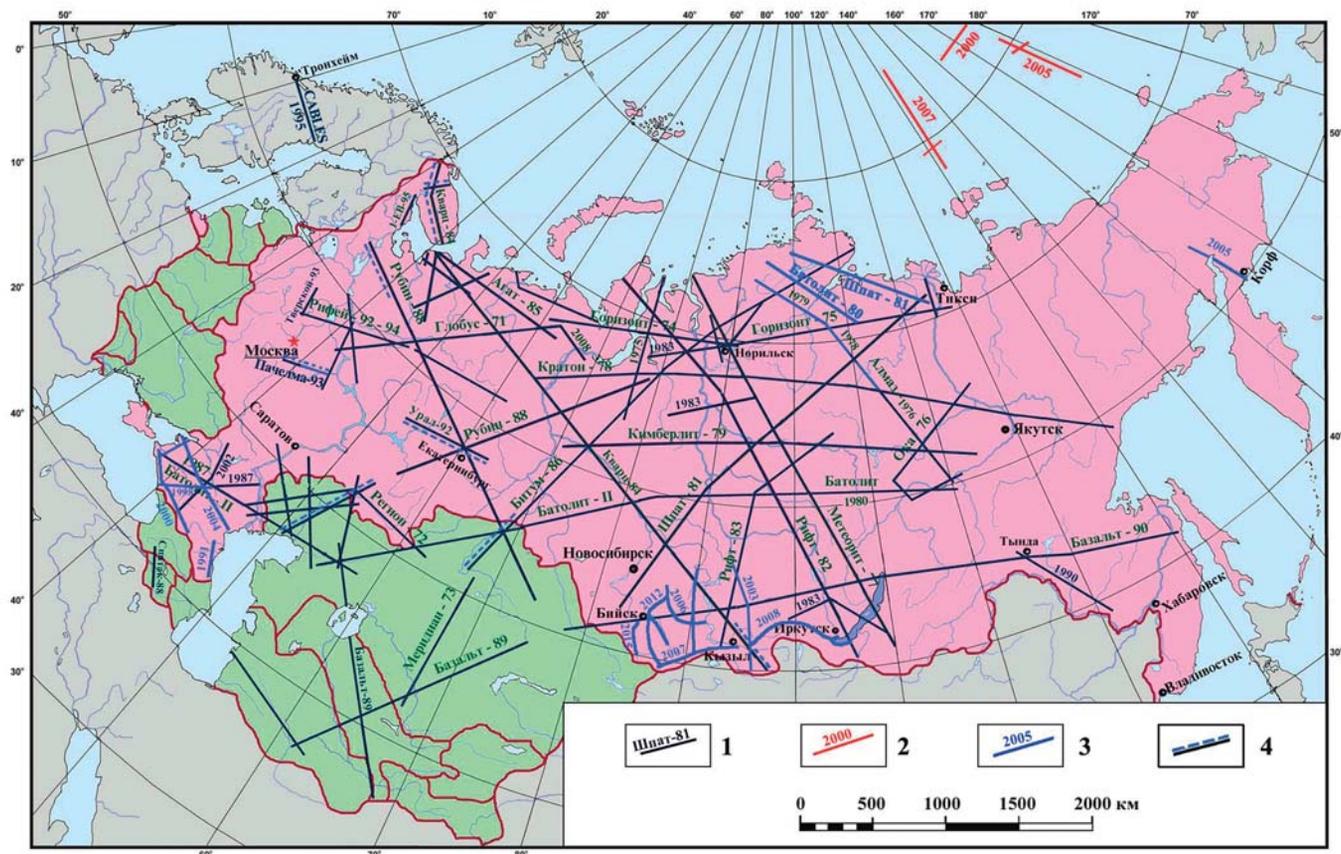


Рис. 1. Размещение на территории России и сопредельных государств опорных и региональных профилей, выполненных Центром ГЕОН в 1971–2015 гг. (цифрами указан год выполнения) [8]: 1–3 — опорные и региональные профили, выполненные методами: 1 — ГСЗ и ГСЗ-МОВЗ (до 1995 г.), 2 — ГСЗ (арктические наледные), 3 — МОВЗ и МОВЗ-МТЗ; 4 — участки телесеismicической томографии

ровой код и формировались в том или ином сейсмическом формате. Это обеспечило широкое внедрение разнообразных процедур машинной обработки сейсмических данных как для выделения регулярных волн с использованием различного вида фильтров и вычисления скоростных параметров среды по совокупности годографов, так и для составления сейсмических разрезов и их уточнения путем решения прямой задачи сейсмологии.

Использование данных многоволновой сейсмологии обеспечивает получение информации о различных параметрах среды, таких как вещественный состав кристаллических пород, поглощение сейсмической энергии, добротность, анизотропия скоростей поперечных волн [1].

Для выполнения полевых наблюдений первоначально использовались до 400 и более автономных сейсмических станций с магнитной записью «Тайга» и «Черепаша» различных модификаций, укомплектованные сейсмоприемниками типа НСП-3 и СК-1П с собственной частотой 1–1,5 Гц. Частотные характеристики сейсмических каналов обеспечивали регистрацию упругих колебаний в диапазоне от 0,5 до 20 Гц.

Начиная с 1993 г. аналоговая аппаратура поэтапно была заменена на отечественные цифровые регистраторы базовой серии «Дельта» совместной разработки Центра ГЕОН с НИИПриборостроения им. В.В. Ти-

хомирова [8]. К их преимуществам относятся: уменьшение уровня шума и искажения сигнала за счет современной элементной базы и увеличения динамического диапазона, повышение точности измерения параметров волнового поля и временной привязки к астрономическому времени, точное позиционирование на профиле с помощью GPS, сниженные весовые и энергопотребляемые характеристики.

Разработанные к началу нового тысячелетия цифровые аппаратно-методические технологии и накопленный опыт послужили основанием для привлечения специалистов Центра ГЕОН к государственной важности работам, проводимых по заказу МПР России на арктических геотраверсах в Северном Ледовитом океане с целью обоснования внешней границы континентального шельфа России. Работы выполнялись в рамках комплексных геолого-геофизических мероприятий силами ГП «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» (ПМГРЭ) и ФГУП «ВНИИ-Океангеология» под научным руководством В.А. Поселова, Г.П. Аветисова и В.Д. Каминского [10]. Полевой отряд Центра ГЕОН под руководством А.В. Маухина принимал участие в совместных со специалистами указанных организаций глубинных исследованиях методом ГСЗ в пределах поднятия Менделеева и хр. Ломоносова в составе экспедиций Арктика-2000, 2005 и 2007 (рис. 2).

отражениям, оценка эффективного поглощения сейсмической энергии.

Начиная с 1981 г. построение скоростных разрезов вдоль профилей стало осуществляться при помощи решения прямой двухмерной кинематической задачи сейсмоки методом лучевого моделирования (методом подбора). В процессе моделирования выполнялись расчеты годографов для различных вариантов моделей с уточнением природы регистрируемых волн. Соответствующая программа была создана в Центре ГЕОН применительно к специфическим особенностям многоволнового ГСЗ и позволяла рассчитывать теоретические годографы отраженных, отраженно-обменных, рефрагированных, обменно-рефрагированных и дифрагированных волн с учетом преломления на границах раздела для сложнопостроенных блоковых двумерных сред с градиентом скорости. На основе этой процедуры в дальнейшем была создана программа решения обратной кинематической задачи сейсмоки [5].

Препроцессинг. Под термином препроцессинг понимается совокупность процедур первичной обработки материала, полученного полевыми станциями и преобразование его к цифровому формату, пригодному для ввода сейсмических данных в обрабатывающие системы. Препроцессинг включал в себя следующие этапы:

1. Оцифровку полевых магнитных лент с шестиканальными сейсмическими записями, поскольку три компонента сейсмических датчиков записывались на двух уровнях усиления для увеличения динамического диапазона.

2. Привязку записей к отметке момента взрыва. Вначале эта процедура производилась по фотовыводам, а в дальнейшем — по оцифрованному и визуализированному каналу времени.

3. Выборку компоненты без перегрузки записи.

4. Преобразование оцифрованной и привязанной записи в соответствующий сейсмический формат.

В начале 1980-х годов в практике сейсморазведки для обработки данных МОВ-ОГТ в СССР применялось 2 стандарта: отечественный СЦС-3 и международный SEG-Y. Оба эти формата работали с многоканальными однокомпонентными данными. Данные ГСЗ, получаемые в СРГЭ, требовали хранения многоканальных и многокомпонентных данных. В этой связи было разработано несколько программ перевода данных между этими форматами и предложен собственный формат хранения данных ГСЗ [11].

Еще одной проблемой, не позволяющей напрямую использовать стандарты МОВ-ОГТ, являлась длительность записи по времени, которая в стандарте ограничивалась несколькими секундами, тогда как в ГСЗ требовалось хранить записи длительностью несколько десятков секунд. К 2000 г. геофизическое сообщество пришло к пониманию необходимости хранения многоканальных многокомпонентных данных, в связи с чем был введен стандарт SEG-Y rev.0, ныне претерпевший две ревизии.

К сожалению, вначале работ по оцифровке данных, в связи с возможностями вычислительной техники того времени было принято решение, что глубинность исследований будет ограничена выявлением границы Мохоровичича и интервал оцифровки составлял только 12 сек., тогда как аналоговая запись длилась до 40 сек. Впоследствии с развитием компьютерных технологий некоторые старые записи удалось переоцифровать и повторно переобработать с включением в интерпретацию рефрагированных и отраженных волн, связанных с границами в верхней мантии.

Цифровая обработка сейсмических данных производилась силами опытно-методической партии № 26, организованной А.П. Чернаковым, который сумел обеспечить связь с ведущими учеными ИФЗ по руководству программистами, организовал вычислительный центр и группу препроцессинга. С появлением цифровых полевых регистраторов препроцессинг упростился, в его состав входят следующие процедуры:

1. Перезапись файлов записи из флеш-карт регистраторов в сформированные директории на компьютере. Затем в заданном интерпретатором временном окне выполняется процедура выборки файлов событий и создаются их монтажи.

2. С помощью визуализаторов (Viewsev.exe и др.) в интерактивном режиме выполняется оценка качества записи того или иного события, осуществляется их сортировка по принадлежности к классу взрывов, локальных, региональных или удаленных землетрясений и создаются соответствующие каталоги. Данные каталогов идентифицируются с событиями, вошедшими в глобальные или региональные сейсмологические бюллетени, получаемые по сети Интернет.

Обработка данных ГСЗ. Как уже упоминалось в Центре ГЕОН осуществлялась многоволновая обработка данных ГСЗ: записи на вертикальной компоненте обрабатывались с целью выделения продольных волн, на горизонтальных компонентах — поперечных и обменных волн.

Выделение и корреляция целевых волн осуществлялась как визуально по сводным сейсмограммам от каждого источника колебаний, так и по монтажам суммотрасс на выходе адаптивного скоростного фильтра [7]. В его основе лежит линейное суммирование записей вдоль совокупностей годографов определенного типа: прямолинейным, где параметром служит кажущаяся скорость и гиперболическим, где параметром является эффективная скорость. Далее строится решающая функция, которой модулируется суммотрасса на выходе линейной системы с учетом отношения оценки энергии сигнала и помехи. Для повышения эффективности этой процедуры дополнительно применяется частотная фильтрация. На заключительном этапе осуществляется сложение суммотрасс на выходе нелинейной системы для заданного диапазона скоростей, что способствует увеличению амплитуд целевых волн на фоне помех и уменьшению вероятности выделения ложных осей синфазности.

Анализировались лишь те оси синфазности, которые прослеживались на шести и более трассах с амплитудой в два-три раза превышающей фон помех. Надежность корреляции и определения природы волн существенно возрастает за счет совместного анализа всех трех компонент волнового поля, что обеспечивает отбраковку «ложных» волн за счет учета бокового влияния.

Методика обработки преломленных волн основывалась на их корреляционном прослеживании с построением встречных и нагоняющих систем годографов, позволяющих непрерывно прослеживать целевые волны, связанные с границами в осадках, поверхности фундамента и Мохо.

Программный комплекс «Чароит», реализующий эту технологию в интерактивном режиме, включает следующие этапы обработки [3]:

- создание системы редуцированных годографов, отождествление волн по кажущимся скоростям, анализ графиков параллельности;

- составление сводных и разностных годографов, расчет граничных скоростей, преобразование ветвей редуцированных годографов в линии нулевых времен t_0 ;

- построение преломляющих границ методом полей времен.

Для построения преломляющих границ в осадочном чехле и поверхности фундамента использовались скоростные параметры среды по данным МОГТ, КМПВ, ВСП и бурения. Система обеспечивает возможность оперативного построения нескольких вариантов глубинной модели по разным скоростным колонкам.

Отражающие границы строились с использованием годографов отраженных волн, выделение и корреляция которых, как уже упоминалось, осуществлялась по монтажам суммотрасс на выходе адаптивного скоростного фильтра. Для построения сейсмических границ использовались эффективные, граничные скорости и времена прихода, определенные по годографам отраженных и преломленных волн. Пластовые скорости и мощности слоев рассчитывались по парным отражениям от кровли и подошвы слоя по методике А.В. Егоркина. Скоростная модель по данным поперечных волн формировалась с учетом геометрии границ по данным продольных волн.

Дополнительную информацию несут обменные волны, содержащиеся в записях удаленных ядерных взрывов, которые подчеркивают особенности внутрикорковых слоев за счет субвертикального подхода лучей снизу. Для их выделения на начальном этапе использовались алгоритмы оптимального разделения интерферирующих волн Ф.М. Гольцмана и В.Н. Трояна и формирующей (обратной) фильтрации с введением для повышения помехоустойчивости параметра оптимальной регуляризации [6]. В качестве исходного сигнала выбиралась запись в виде непротяженного интенсивного цуга продольной волны с формированием желаемого сигнала на вертикальной компоненте в виде импульса колокольной формы с полосой пропу-

скания амплитудного спектра 0–2 Гц. Выбор участка обработки основывался на сравнении спектров записи продольной волны и записи на радиальной (горизонтальной в направлении источник-приемник) компоненте, содержащей вторичные обменные фазы. Корреляция обменных волн осуществлялась по совокупности монтажей не менее 3–5 стандартизированных волновых форм с каждого пункта наблюдения. Глубина границ обмена рассчитывалась по временам запаздывания обменных волн, скорости V_p и отношения V_p/V_s .

Скоростные разрезы земной коры представлялись в виде набора блоков (доменов) с рассчитанными скоростями продольных и поперечных волн, которые отделяются друг от друга субгоризонтальными, субвертикальными и наклонными границами. На разрезах отображались положение и рельеф не только опорных разделов: фундамента и Мохоровичича, но и границ в осадочном комплексе, в консолидированной части коры и в верхней мантии. Для определения степени силичности геологических образований использовалась эмпирическая формула А.Л. Алейникова, связывающая скорости V_p и V_s и их отношение V_p/V_s с содержанием SiO_2 (в весовых процентах).

Основной критерий достоверности глубинных построений — это лучевое моделирование или метод подбора, который заключается в подборе моделей земной коры, для которых рассчитанные теоретические годографы с заданной точностью совпадают с экспериментальными. Как уже упоминалось, с 1981 по 1992 г. для этой процедуры применялась собственная программа, которая не имела экранного интерфейса. Появление персональных компьютеров продиктовало необходимость ускорить процесс подбора. В этой связи в практику работы была внедрена программа ZELT [15] в компиляции Университета Карлсруэ (Германия). Аппроксимация среды осуществлялась блоками в виде трапеций и произвольным углом наклона верхней и нижней границ, где скорость изменяется линейно от кровли к подошве. Подбор ведется как по глубинам до основных границ, так и по скоростям в каждом блоке последовательно сверху вниз для всех выделенных волн. Трассирование лучей осуществлялось путем численного решения дифференциальных уравнений, описывающих ход лучей в соответствии с законами геометрической сейсмологии, время пробега волны вдоль луча определяется путем численного интегрирования по его траектории.

Основным недостатком этой программы, работающей под операционной системой DOS, было отсутствие современного графического интерфейса для одновременной работы с разрезами, годографами и монтажами на экране. Поэтому, начиная с 2000 г. использовалась интерактивная оболочка Seiswide, разработанная Дэпином Чаном для работы в среде Windows XP и являющаяся оконным интерфейсом к программам решения прямой и обратной кинематических задач сейсмологии. Программа позволяет осуществлять построение лучевых диаграмм и полного набора

теоретических годографов для любой заданной модели среды.

Наряду с кинематической обработкой осуществлялись определения коэффициентов поглощения сейсмической энергии и добротности в земной коре по записям преломленно-рефрагированных и отраженных волн [1]. Расчеты осуществлялись по изменениям амплитудных спектров сейсмических волн с расстоянием. При этом подходе исключается влияние расхождения фронта волны и различного увеличения аппаратуры. Каждое определение выполнялось по записям только одного взрыва на эпицентральных расстояниях, в пределах которых нет смены типа волн с последующим усреднением для исключения случайных отклонений.

Обработка записей удаленных землетрясений. Метод МОВЗ, разработанный во ВНИИ Геофизике под руководством И.В. Померанцевой и А.Н. Мозженко, позволяет детально исследовать расслоенность земной коры, выявлять в ее структуре неоднородности и разломные нарушения по трехкомпонентным записям удаленных землетрясений. Обработка данных МОВЗ основана на выделении обменных фаз типа P-to-SV, образовавшихся в коде P-волны при расщеплении продольной волны на поперечную на границах раздела внутри земной коры. Для лучшего разделения обменных фаз необходим интенсивный первичный импульс P-волны, который быстро затухает. Диапазон событий эпицентральных расстояний, отобранных по этому критерию событий, не должен выходить за пределы 30–90 градусов.

Обработка полевой информации выполняется в пакете обрабатывающих программ DeltaApps [9], позволяющей получать временные и глубинные разрезы в волновом изображении, как в МОГТ. Алгоритм ориентирован на автоматизированный режим, позволяющий оперативно создавать различные варианты разрезов. В него входят следующие процедуры [12, 14]:

1. Низкочастотная фильтрация с помощью фильтра Баттерворта, выполняемая в полосе пропускания 0.6–2.6 Гц для улучшения соотношения сигнал/помеха.

2. Определение начала обработки с использованием процедуры STA/LTA (отношение сигнала в коротком и длинном окнах).

3. Преобразование посредством поворота исходных ортогональных компонент сейсмоприемника, ориентированных по вертикали и сторонам света (Z, N, E) в лучевую систему координат (P, R, T), оси которой ориентированы таким образом, что главные смещения в продольной волне максимальны на P-компоненте, а разнополяризованные SV и SH – волны подчеркиваются на R и T – компонентах в вертикальной плоскости источник-приемник и перпендикулярной ей плоскости соответственно.

4. Обратная фильтрация (деконволюция). В качестве сигнала, по которому формируется обратный фильтр, берутся смещения P-компоненты на дневной поверхности в предположении, что запись на ней подобна форме продольной волны, падающей под стан-

цией на подошву слоистой структуры из однородной мантии. На R-компоненте после деконволюции создаются волновые формы в виде суперпозиции стандартных одноимпульсных сигналов, связанных с сейсмическими границами. Эта процедура исключает аппаратные различия и особенности записей от разных событий и приводит их к единой временной функции источника. С целью придания одинакового веса преобразованным трассам они нормируются на максимальное значение P-компоненты.

5. Суммирование волновых форм, полученных на пункте наблюдения от не менее десяти разных событий с введением временных сдвигов за разные эпицентральные расстояния относительно некоторого среднего (референтного). Применение этой процедуры ослабляет кратные волны и улучшает выделение слабых обменных волн на фоне помех. Суммарные волновые формы SV-поляризованных обменных волн, которые представляют импульсную реакцию среды (приемника) под станциями профиля, принято называть функциями приемника продольных волн (Receiver function). Начало отсчета в сформированном монтаже приемных функций, т.е. на временном разрезе, соответствует времени прихода продольной волны.

6. Трансформация временного разреза в глубинный по принятому скоростному закону методом послыного наращивания глубины с использованием разницы времен запаздывания волн PS относительно P-волны, сменяющей поляризацию на кровле и подошве слоя. Освещается строение земной коры в основном в интервале глубин 0–60 км, что соответствует разности времен P и PS-волн примерно равной 6–7 сек.

Выбор скоростных параметров среды и привязка границ обмена к опорным горизонтантам производится на базе скоростных колонок, составленных по данным ранее выполненных сейсмических исследований методами МОГТ, КМПВ и ГСЗ. Следует отметить, что скоростные данные МОГТ правомерны лишь для верхней части коры и не содержат сведений о скоростях поперечных волн.

В сейсмоактивных и горнодобывающих районах для составления усредненных скоростных колонок используются сейсмограммы записей местных землетрясений и взрывов из карьеров. С этой целью по составленным монтажам выполняется корреляция первых вступлений P и S-волн и построение годографов для каждого события. Данные по временам пробега волн от разных землетрясений, лучи которых проникают на разную глубину усредняются, что позволяет уменьшить ошибки, связанные с определением времени в очаге и положением гипоцентра. Для совмещения с имеющимися данными ГСЗ и построения сводного годографа полученные данные приводятся к условиям поверхностного источника. Отношение скоростей продольных и поперечных волн рассчитывается по графикам Вадати.

Составление 1-D скоростных разрезов как функции глубины осуществляется путем обращения времен пробега P и S-волн с использованием программы ре-

шения одномерной обратной задачи Inv1, разработанной в ИФЗ РАН [2].

Решение задачи разбивается на следующие этапы:

- разбиение годографов преломленных волн от поверхностного или глубинного источников на ветви, соответствующие преломляющим границам;
- сглаживание годографов выпуклыми кубическими сплайнами;
- построение скоростной кривой по сглаженному годографу;
- решение прямой кинематической задачи по найденной скоростной кривой.

Полученные значения скоростных параметров используются для составленной стартовой блоково-скоростной модели земной коры, которая уточняется решением прямой задачи сейсмоки методом лучевого моделирования. Для этой цели наилучшим образом подходит упомянутая выше программа ZELT с интерактивной оболочкой Seiswide, поддерживающей все опции Windows XP в отношении модулей связи с ОС DOS, для которой написано большинство программ обработки данных МОБЗ. Программа позволяет осуществлять построение лучевых диаграмм и полного набора теоретических времен запаздывания обменных волн (разности прихода волн P и PS) для любой заданной модели среды (рис. 3).

В связи с использованием источников колебаний, находящихся вне модели, должны выполняться два условия: параллельность лучей, подходящих снизу к подошве слоистой структуры и соответствие кажущейся скорости P-волны ее значению по стандартному годографу для скоростной модели Земли IASP91. Процесс моделирования заключается в послойном сверху вниз подборе таких параметров разреза, которые позволяют методом итераций в процессе лучевого трас-

сирования наилучшим образом (не более 0,1 с) совместить экспериментальные и расчетные величины времен запаздывания обменных волн, связанных с конкретной границей раздела.

Томографические исследования начались с проведения в 1992 г. совместного российско-французского эксперимента по изучению скоростной структуры коры и верхней мантии Среднего Урала, и прилегающих территорий вдоль 600-километрового профиля ГСЗ-МОВЗ «Уральский» [13]. В дальнейшем они были продолжены и в других регионах вдоль участков опорных профилей ГСЗ-МОВЗ, пересекающих преимущественно зоны сочленения крупных геотектонических структур (рис. 1). Использовалась технология телесеismicкой томографии, основанная на обращении временных задержек (невязок) времен пробега продольных волн удаленных землетрясений относительно стандартного годографа с представлением глубинного разреза в виде изолиний скоростных аномалий в процентах от нормальных значений согласно скоростной модели Земли IASP91.

Новизна проведенных исследований состоит в следующем:

- высокая плотность системы наблюдений с шагом 10 км позволяет выполнить уверенную корреляцию первых вступлений продольных волн по их выразительным фазам и считать их времена с точностью до сотых долей секунды;
- обеспечивается введение в невязки помимо стандартных поправок за эллиптичность Земли и вариаций высоты местности также и учета мощности слоя осадков по данным ГСЗ, отличающегося от подстилающих пород консолидированной коры пониженной скоростью распространения волн.

Поскольку источники возбуждения колебаний располагаются вне профиля, то в соответствии с методикой

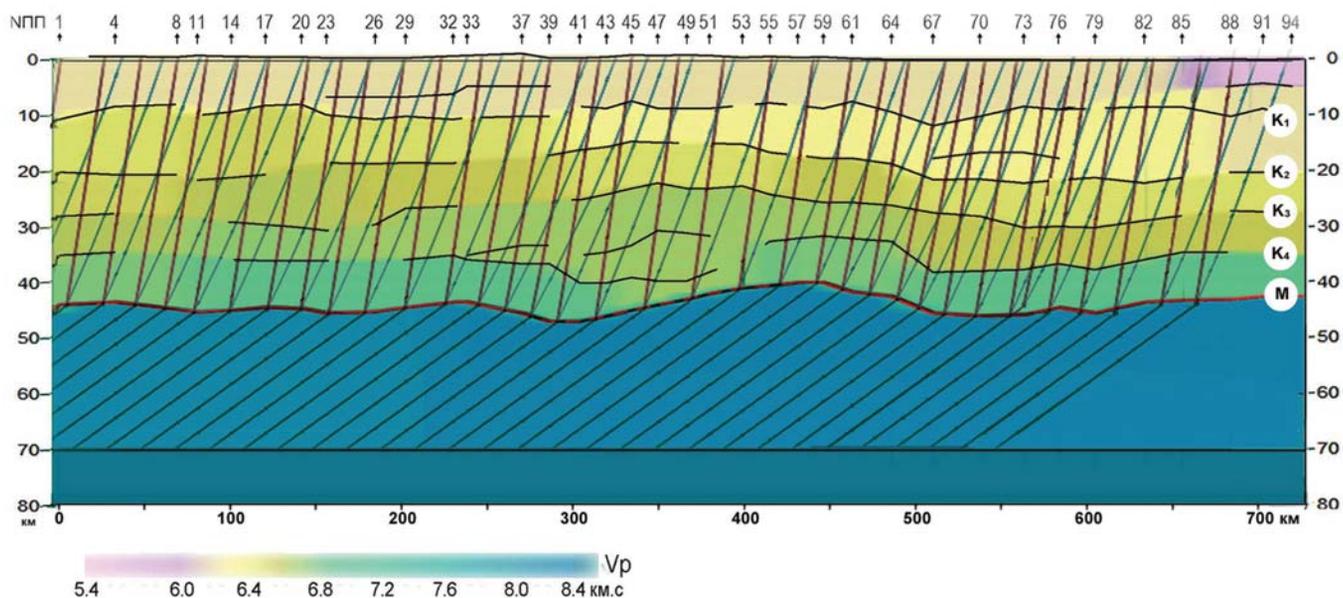


Рис. 3. Лучевое моделирование разреза земной коры по продольным и проходящим обменным волнам удаленных землетрясений: K₁-K₄ — сейсмические границы в коре, M — поверхность Мохо. Цветовая шкала пропорциональна скорости продольных волн. По горизонтали: внизу — шкала расстояний (км), вверху — номера пунктов наблюдения

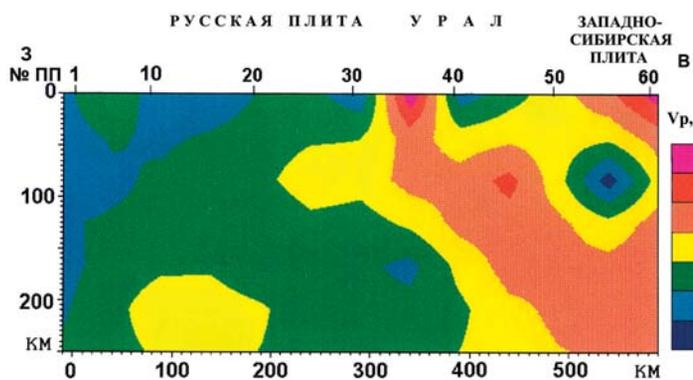


Рис. 4. Томографический разрез литосферы вдоль профиля «Уральский» [4]. Цветовая шкала скоростных аномалий дана в процентах от нормальных значений. Синему тону соответствуют повышенные скорости, красному — пониженные. По горизонтали: внизу — шкала расстояний (км), вверху — номера пунктов наблюдения

телесеismicической томографии с целью исключения ошибок в определении времени в очаге и положения гипоцентра вычисляются, так называемые, центрированные (средневзвешенные) невязки, представляющие собой отклонения невязок от их среднего значения для всех станций профиля.

Суть метода обращения средневзвешенных невязок в скоростные неоднородности состоит в том, что среда, пересекаемая лучами, разбивается на систему слоев и блоков с постоянной скоростью, увеличивающейся с глубиной от слоя к слою в соответствии со стандартной моделью IASP91, где поправки к исходному разрезу, постоянные в каждом блоке, рассчитываются по невязкам времен пробега. Как следует из опыта сейсмотомографии и модельных расчетов, скоростные разрезы верхней мантии существенно различаются лишь для первых двух-трех сотен километров, следовательно, невязки формируются в основном за счет существующих здесь скоростных неоднородностей среды.

Для сейсмотомографического моделирования вдоль профиля «Уральский» было выбрано 25 телесеismicических событий с четкими вступлениями первых волн, одновременно регистрирующихся на максимально длинной базе большинством станций приблизительно в створе профиля. Их эпицентры располагались в противоположных азимутах от его направления с целью наибольшей полноты покрытия вертикального разреза изучаемой среды скрещивающимися лучами. Обработка первичного материала производилась в рамках согласованного проекта как французскими исследователями под руководством Ж. Пупине (Обсерватория, г. Гренобль) [13], так и специалистами Центра ГЕОН совместно с сотрудниками ИФЗ РАН под руководством А.В. Егоркина и Л.П. Винника [4]. Обращение невязок в томографический разрез осуществлялось с использованием программы АСН-2D, разработанной в ИФЗ РАН на основе решения обратной задачи в линеаризованной постановке согласно алгоритма К. Аки, когда невязки времен пробега сейсмических волн связаны со скоростными аномалиями

среды линейными соотношениями. В процессе решения обратной задачи рассматривалось несколько моделей с различным числом слоев и блоков и в конечном итоге выбиралась та, которая давала устойчивый результат с наилучшими характеристиками качества решения в параметрах матрицы стандартных ошибок, разрешения и процента объясненной невязки. Томографический разрез литосферы вдоль профиля «Уральский», составленный российскими специалистами по вышеуказанной технологии, представлен на рис. 4.

Достоверность полученных результатов подтверждена международным сравнением томографических разрезов литосферы вдоль профиля «Уральский», полученных разными авторскими коллективами и показавших их принципиальное соответствие друг другу. Главная особенность

полученного решения состоит в повышенной по отношению к Уралу скорости продольных волн в прилегающей части литосферы Восточно-Европейской платформы. Граница между этими блоками погружается в восточном направлении, что может объясняться продвижением Западно-Сибирской литосферной плиты на Восточно-Европейскую платформу.

Заключение

До середины 1990-х годов, вплоть до резкого снижения объемов глубинных сейсмических исследований на опорных профилях, Центр ГЕОН занимал лидирующее положение по методике проведения широкомасштабных региональных работ, цифровой обработке и интерпретации полученных данных.

Разработанный программно-методический комплекс обеспечил цифровую обработку данных многоволновой сейсмологии, начиная от препроцессинга сейсмических записей, выделения на основе адаптивной скоростной фильтрации монотипных волн, расчета пластовых скоростей по парным отражениям, составления временных разрезов обменных волн методом приемных функций и до лучевого моделирования разрезов земной коры путем решения прямой двухмерной задачи сейсмологии.

На основе геолого-геофизической интерпретации данных многоволнового ГСЗ и МОВЗ были созданы сейсмические разрезы, карты, схемы и атласы глубинного строения крупных геологических и минерально-сырьевых провинций России, позволившие существенно дополнить и уточнить имеющиеся представления о строении земной коры и верхней мантии и показать значимость разработанных глубинных критериев для прогноза нефтегазоносности и рудоносности.

По данным сейсмогеоэлектрических исследований, выполненных методами МОВЗ и МТЗ в сейсмоопасных районах Северного Кавказа, Алтая и Саян, была создана глубинная основа для сейсмотектонического районирования, установлено положение региональных, в том числе сейсмоактивных разломов, и сформулированы относительно устойчивые критерии для выявления возможных очаговых зон землетрясений (ВОЗ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Булин, Н.К. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям / Н.К. Булин, А.В. Егоркин. — М.: МПР России, ВСЕГЕИ, Центр ГЕОН, 2000. — 194 с.
2. Бурмин, В.Ю. Обращение годографов сейсмических волн, распространяющихся в вертикально неоднородных средах / В.Ю. Бурмин // Технологии сейсморазведки. — 2011. — № 3. — С. 5–16.
3. Ведринцев, А.Г. Система ввода, хранения и обработки данных ГСЗ и МОВЗ «Чароит» / А.Г. Ведринцев, К.Э. Пополитов // Разведка и охрана недр. — 1994. — № 10. — С. 35–37.
4. Винник, Л.П. Томографический разрез литосферы Урала / Л.П. Винник, Е.Е. Золотов, Г.Л. Косарев, В.А. Ракитов, А.В. Треусов // Докл. РАН. — 1996. — № 346 (5). — С. 668–671.
5. Ганжа, О.Ю. Решение обратной кинематической задачи сейсморазведки методом оптимизации / О.Ю. Ганжа // Применение численных методов в исследованиях литосферы / Под ред. А.С. Алексева. — Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982. — С. 66–74.
6. Егоркин, А.В. Методика разделения интерферирующих сигналов на записях обменных проходящих волн / А.В. Егоркин, Т.И. Данилова, М.Г. Рыбалов // Прикладная геофизика. — М.: Недр, 1981. — Вып. 99. — С. 15–31.
7. Кац, С.А. Нелинейный интерференционный анализ сейсмических материалов региональных исследований земной коры и верхней мантии / С.А. Кац, Т.Н. Ершова, Н.Г. Михайлова, А.В. Егоркин, В.И. Утешев // Физика Земли. — 1977. — № 6. — С. 45–58.
8. Костюченко, С.Л. К 50-летию юбилею деятельности Центра ГЕОН / С.Л. Костюченко, А.В. Маухин, И.Н. Кадурин, В.А. Ракитов // Разведка и охрана недр. — 2018. — № 2. — С. 28–37.

9. Кухмазов, С.У. Пакет программ DeltaApps для обработки данных, получаемых на РСС типа «Дельта» / С.У. Кухмазов. — М.: ВНИИГеофизика, 2009. — 42 с.
10. Российские арктические геотраверсы / Научн. ред. В.А. Поселов, Г.П. Аветисов, В.Д. Каминский. — С-Пб.: ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», 2011. — 172 с.
11. Ganzha, O.Yu. Deep seismic sounding data processing on IBM PC/AT / O.Yu. Ganzha // The proceedings of XX Gen. Ass. of EGS. — Hamburg. 1995.
12. Langston, C.A. Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves / C.A. Langston // Bull. of the Seismological Soc. of America. — 1977. — 67(3). — PP. 713–724.
13. Poupinet, G. Teleseismic tomography across the middle Urals: lithospheric trace of an ancient continental collision / G. Poupinet, F. Thouvenot, E.E. Zolotov, Ph. Matte, A.V. Egorкин, V.A. Rakitov // Tectonophys. — 1997. — 276. — PP. 19–33.
14. Vinnik, L.P. Detection of waves converted from P to SV in the mantle / L.P. Vinnik // Phys. Earth and Planet. Inter. — 1977. — V.15 (1). — PP. 39–45.
15. Zelt, C.A. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure / C.A. Zelt, R.B. Smith // Geophys. J. Int. — 1992. — V.108. — PP. 16–34.

© Коллектив авторов, 2019

Ганжа Олег Юрьевич // ganzhaoy@mail.ru
Кухмазов Сергей Улубекович // sergei.kukhmazov@mail.ru
Ракитов Владимир Александрович // rakitov47@mail.ru
Чернышев Юрий Геннадьевич // yuchern@mail.ru

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК (696.6+628.9 622.143) (075.8)

Лимитовский А.М., Башкуров А.Ю. (МГРИ-РГГРУ)

ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД КАК АЛЬТЕРНАТИВА КОГЕНЕРАЦИОННОГО ЭНЕРГО-ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

*В работе рассмотрены электростанции собственных нужд, применяемые для оптимизации энергообеспечения объектов минерально-сырьевого комплекса, такие как газотурбинные установки и дизельные электростанции. Целью работы является поиск альтернативы когенерационного энергообеспечения объектов минерально-сырьевого комплекса. **Ключевые слова:** газотурбинные установки, энергообеспечение объектов.*

Limitovskiy A.M., Bashkurov A.Yu. (MGRI-RGGRU)
AUXILIARY POWER PLANTS AS AN ALTERNATIVE ENERGY COGENERATION FACILITIES MINERAL COMPLEX

*The paper discusses the captive power stations used for the optimization of energy supply of objects of the mineral complex, such as gas turbines and diesel power plants. The aim of this work is the search for alternative cogeneration energy objects mineral complex. **Keywords:** gas turbine, energy supply facilities.*

Предприятия по освоению объектов минерально-сырьевого комплекса, включающие в себя геологоразведочные и горные работы, несмотря на большое многообразие условий их производства и технического оснащения, имеют целый ряд специфических общих особенностей, присущих именно этому направлению, без учета которых не может быть представлена эффективная система энергообеспечения горно-геологического предприятия.

К числу таких особенностей относятся:

- удаленность, как правило, объектов от централизованных энергосистем и потребность их как в электрической, так и тепловой энергии;
- высокая энергоемкость проводимых работ, на которых доля энергетических затрат достигает 40 % от общего вложения средств;
- передвижной характер работ, ограниченные сроки их проведения и увязка энергообеспечения с предполагаемыми перспективами развития предприятия;
- влияние горно-геологических, технологических, климатических факторов на выбор энергетического оборудования и основания категоричности системы энергоснабжения.

На предприятиях горно-геологического профиля используются различные виды энергии (электрическая, тепловая, пневматическая), но базовой является электроэнергия, обладающая такими важнейшими свойствами, как возможность преобразования ее в любой другой вид энергии, передачи на любые расстояния, преобразование параметров применительно к потребностям по-