Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т. 113

УДК 550.834

ИЗУЧЕНИЕ БЛОКОВОГО СТРОЕНИЯ РУДНЫХ РАЙОНОВ СЕЙСМОРАЗВЕДКОЙ

О.В.МИРОШНИКОВА, Б.Г.КОЗЛЕНКО,
А.С.КОСТЮКЕВИЧ, Ю.Г.ШОПИН

Решение геологических задач в рудных районах методами сейсморазведки сводится к выявлению неоднородностей скоростного разреза, с которыми связаны определенные геологические объекты. В волновом поле хорошо проявляются соизмеримые с длиной волны тонкослоистые интервалы скоростного разреза, а также крупные неоднородности – блоки и слои, размер которых значительно больше длин волн. Детальность расчленения разреза зависит не только от частотного состава волнового поля и скоростной дифференциации среды, но и методики наблюдений и способов обработки сейсмических волн разного типа.

В статье рассмотрены возможности изучения блокового строения рудных районов на основе совместной интерпретации различных типов сейсмических волн и гравитационного поля.

Для сложно построенных сред рудных районов область первых вступлений сейсмической записи представлена рефрагированными, преломленно-рефрагированными, дифрагированными и закритическими отраженными волнами. Регистрация этих волн обеспечивается слабыми источниками возбуждения упругих колебаний. Так, например, при сейсморазведочных работах на Малом Кавказе, масса зарядов обычно не превышает 50–100 кг при наблюдениях на удалении до 20–30 км. При относительно слабом энергетическом уровне записи первых вступлений в диапазоне 20–50 Гц осуществляется совместное прослеживание проходящих (преломленно-рефрагированных) и закритических отраженных волн от пологих границ. Отсутствие записи отражений такого рода в докритической области свидетельствует о том, что пологие границы в большинстве случаев являются нерезкими сейсмическими границами, на которых происходит изменение градиента скорости, сопровождающееся лишь небольшим скачком. В рудных районах они обычно соответствуют слабым литофизическим границам [5, 6].

Последующие вступления записи насыщены большим количеством регулярных волн, среди которых преобладают отражения продольного и обменного типа. Наиболее интенсивные и устойчивые из них связаны с тектоническими зонами и тектонизированными контактами [6, 7]. Участкам относительно спокойного моноклинального залегания слоев и слаборазвитой тектоники соответствуют волновые поля, содержащие устойчивые отраженные волны с пологими осями синфазности. На участках интенсивного проявления складчатой и разрывной тектоники в волновом поле преобладают отражения, характеризую-

щиеся низкими отрицательными значениями кажущейся скорости. Они, как правило, более высокочастотны, чем отражения, связанные с литофизическими границами, так как сформированы преимущественно инверсионными пачками тонких слоев, мощность которых соизмерима с длиной волны [5, 6].

Методика сейсмических наблюдений рассчитана на регистрацию протяженных годографов первых и последующих вступлений записи, дающих возможность осветить разрез в целом и глубинные части крутопадающих границ. Выбор параметров наблюдений первых волн определяется степенью скоростной дифференциации среды, ее градиентными свойствами и требуемой детальностью расчленения разреза на блоки и слои. После первого этапа исследований, когда определены преобладающие скоростные неоднородности и их размеры, параметры системы наблюдений могут быть уточнены в сторону повышения плотности размещения источников возбуждения. Так, экспериментальными работами установлено, что в пределах каждого блока должен располагаться как минимум один источник. На Малом Кавказе, при изучении глубин до 3 и 5 км, расстояние между источниками соответственно 1-2 и 3-5 км. Достаточность полученных систем встречных и нагоняющих годографов первых волн для выделения структурных блоков оценивается на заключительном этапе интерпретации.

Надежность выделения крутопадающих границ обеспечивается системой наблюдений с трех-четырехкратным перекрытием. Областью, благоприятной для регистрации интенсивных волн от наклонных границ, является интервал между нормалью к границе и выходом границы на дневную поверхность в направлении ее восстания [4]. Для непрерывного трассирования таких границ отражения прослеживаются на различных удалениях источник - контакт.

Регистрация отражений от наклонных границ требует получения более высокого энергетического уровня записи по отношению к первым вступлениям. Последнее связано прежде всего с необходимостью регистрации волн в области пониженной их интенсивности, так как основной докритический максимум смещается в направлении восстания границы и исчезает при углах, больших 40°. Особенности формирования волновых пакетов от крутопадающих границ определяются их тонкослоистой структурой и характеризуются более высокочастотным составом по сравнению с другими типами волн. Все это обусловливает необходимость увеличения массы зарядов до 1000 кг и частот до 70-100 Гц при наблюдениях на расстоянии до 20-30 км.

Большую роль при изучении слоисто-блокового строения рудных районов играют данные обработки первых вступлений [3]. Несмотря на сложный характер записи и совместную регистрацию на отдельных интервалах волн разного типа, в первом приближении годографы первых вступлений могут быть аппроксимированы годографами рефрагированных волн для сложной модели с переменным градиентом скорости. Для построения скоростного разреза по такому годографу применяются различные программы, разработанные в ЛГУ, ЛОМИ им.Стеклова, ИФЗ АН СССР, ИГ АН УССР и др. Высокой эффективностью обладает комплекс программ «Сейсмод", позволяющий локализовать скоростные неоднородности разреза за счет одновременного использования лучевых трасс первых волн всей системы наблюдений [1, 2].

Комплекс программ «Сейсмод" основан на решении прямой кинематической задачи сейсмометрии для проходящих волн в лучевом приближении. В комплекс входит также решение обратной линеаризованной сейсмической задачи. Получение данных распределения $V(x,z)$ в разрезе сводится к итерационному циклу решения прямых задач в режиме «Диалог". Обратная задача минимизирует расхождение между расчетными ($t_Р$) и наблюденными ($t_Н$) временами прихода волн по лучам, рассчитанным для получаемого распределения скоростей $V(x,z)$ от всех используемых источников.

Результатом минимизации является матрица $\{\Delta V_{ij}\}$ значений аномальных скоростей, которая формируется при решении системы уравнений, каждому из которых соответствует траектория одного сейсмического луча. Неизвестными являются величины аномальных скоростей ΔV_{ij} в дискретных элементах скоростного разреза, которые пересекаются различными сейсмическими лучами от разных источников, определение аномальных скоростей производится сразу для возможно большего числа лучей, в пределе - для всей системы наблюдений. Количество элементов и их пространственные характеристики определяются опытным путем. Наиболее надежно аномальные скорости определяются в верхних частях разреза, там, где лучи образуют густую сеть, менее надежно - в нижних и боковых частях, где сейсмическая освещенность значительно ниже.

Начальное приближение $V(x,z)$ берется простейшим, часто одномерным. Оно должно удовлетворять самым общим чертам исходных годографов и не содержать особенностей, которые не отображены в наблюденных годографах. Учет априорной информации производится на конечном этапе и не определяет надежности решения. При правильном учете закономерности суммарного распределения $V(x,z) + \Delta V_{ij}$ среднее квадратическое расхождение между $t_Н$ и $t_Р$ уменьшается от итерации к итерации.

Переход к следующей итерации осуществляется введением в разрез изменений, рекомендуемых матрицей аномальных скоростей ΔV_{ij} . Выделяются закономерности распределения значений в матрице аномальных скоростей на фоне предыдущей модели V^{k-1} и оценивается цельность и непротиворечивость структуры разреза. Критерием решения задачи (окончания итерационного процесса) служит отсутствие закономерностей в распределении величин ΔV_{ij} и между $t_Н$ и $t_Р$. Такой итерационный процесс можно рассматривать как подбор наблюденных годографов.

Прямая задача является частью решения обратной сейсмической задачи - определения скоростной модели по годографам проходящих волн. Программа позволяет рассчитывать теоретические годографы не только первых вступлений, но и ветви, соответствующие годографам последующих вступлений. Применяются специальные методы подбора отражающих границ, основанные на решении прямой задачи: рассчитываются лучи, отраженные от заданной площадки, и по расхождению между наблюденным ($t_Н$) и рассчитанным ($t_Р$) временам прихода луча определяется новое положение площадки. Рассчитанный луч используется как направляющий. Если площадка не горизонтальна, то автоматически строится система координат, повернутая на угол ее наклона.

Для учета изменений скорости и кривизны луча используется автоматизированный процесс: для нового пути при заданном распределении скорости определяется время прихода луча и новое положение площадки. Одновременно с решением прямой может решаться обратная кинематическая задача: определяются новые скорости в предположении, что трасса луча (положение отражающей площадки) мало меняется.

Отражающие площадки, подобранные по всей системе лучей, рассчитанных для данного горизонта, могут не сформировать нового горизонта, а рассредоточиться по всему разрезу. Это может быть следствием разных причин: неправильного определения скорости в разрезе, сложности в идентификации или корреляции волн, неучета квазианизотропии и др. В относительно узком интервале может существовать эквивалентность между изменением глубины отражающей площадки и распределением скорости в освещаемой отраженными лучами части разреза. Решение в области эквивалентности выбирается в зависимости от сложности скоростного разреза, системы и качества наблюдений, априорных предпосылок о допустимом диапазоне скоростей и глубин для данного отражающего горизонта.

Важными характеристиками способов решения обратных задач является детальность и надежность. В рассматриваемом подходе уровень детальности качественно оценивается по густоте изолиний скорости и степени их гладкости. Применение этой характеристики позволяет представить решение обратной задачи как обобщенную картину гораздо более сложного объекта, ввести градацию решений по уровню их детальности – степени расчлененности скоростного разреза.

Надежность решений в различных частях сейсмогеологического разреза весьма различна и решение тем надежнее, чем полнее используется исходная сейсмическая информация при фиксированном уровне детальности решения. Оценка надежности выделения скоростных неоднородностей (слоев и блоков), проводится с учетом количества источников и их размещения на профиле, длины годографов и глубины проникновения рефрагированных лучей из разных источников заданной системы наблюдений.

Опробование комплекса программ „Сейсмод" и „Гравмод" было осуществлено на экспериментальных сейсмических и гравиметрических материалах, полученных в различных геологических условиях Малого Кавказа (рис.I и 2). Изучалась слоисто-блоковая скоростная модель магматических пород по профилю, проходящему в меридиональном направлении в восточной части Кафанского поднятия Малого Кавказа. Геологический разрез сложен мощной толщей вулканогенно-осадочных пород юрского и мелового возраста, характеризующейся сложным строением и многообразными формами проявления тектоники и вторичного магматизма.

На профиле длиной 30 км рассматривается система прямых и встречных годографов из пяти пунктов взрыва (ПВ), с максимальным удалением от источника 35 км и шагом сейсмоприемников 25 м. На отдельных участках профиля выполнены детальные сейсмические наблюдения (расстояние между ПВ I-2 км, шаг сейсмоприемников I2,5 м), а также наблюдения на непродольных профилях небольшой (I,5-2 км) протяженности.

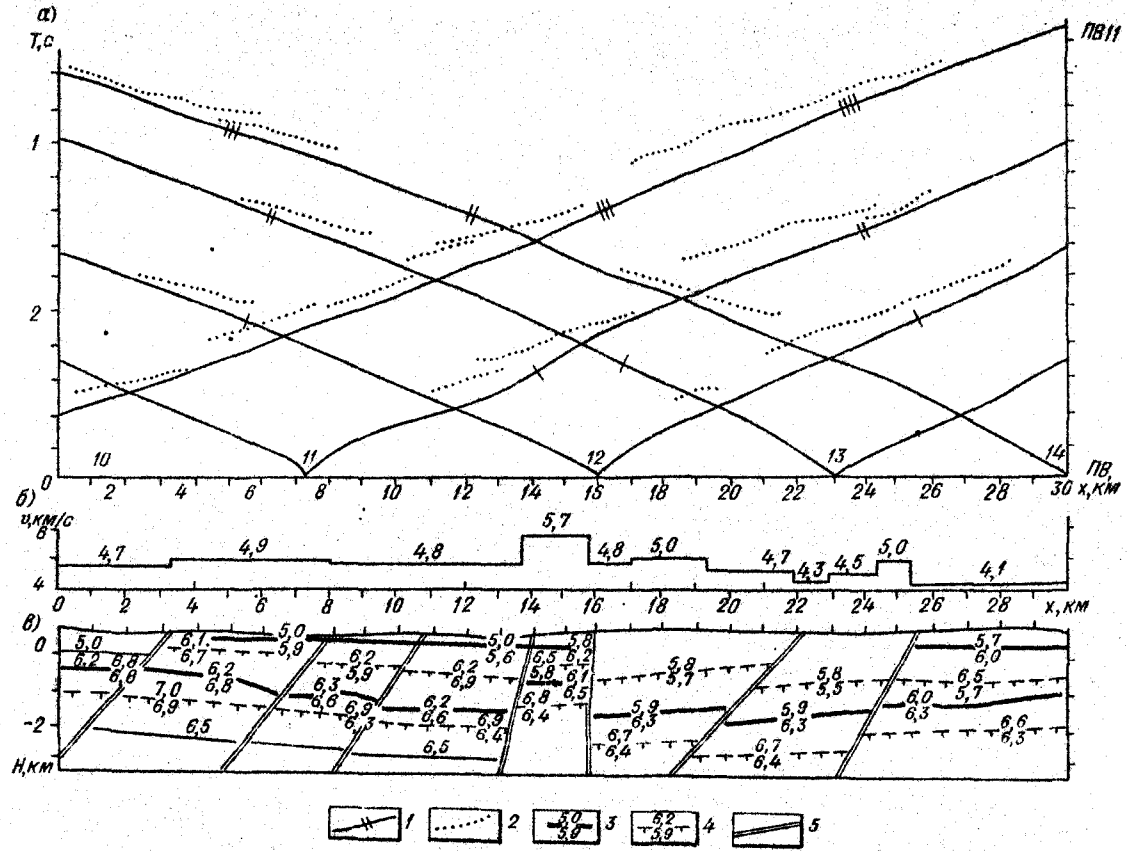


Рис. 1. Построение скоростной модели среды по данным обработки первых волн комплексом программ „Сейсмод":
а – системы годографов первых волн и закритических отражений; б – график начальных значений скорости упругих волн; в – скоростной разрез с основными изолиниями скорости в километрах в секунду
1 – наблюденные (сплошные кривые) и теоретические (пунктирные кривые) годографы первых волн; 2 – годографы закритических отражений; 3 – скоростные границы с положительным перепадом скорости; 4 – инверсионные границы; 5 – границы раздела блоков

В первых вступлениях записи зарегистрированы преломленно-рефрагированные волны, а также закритические отражения от близгоризонтальных границ. В предположении о рефрагированной природе первых волн была проведена обработка системы кинематических годографов по комплексу программ „Сейсмод". В результате шести итераций получено окончательное представление о распределении скорости в разрезе до глубины 3 км. По характеру разрывов и распределению скорости в разрезе можно наметить геометрию слоев и блоков с устойчивыми скоростными характеристиками. Намечены две границы, где происходит резкое изменение скорости: первая ограничивает приповерхностный слой мощностью до 0,8 км, в пределах которого отмечается наибольшее изменение скорости: от 4,1 до 6,8 км/с. В нижележащем слое скорость изменяется в гораздо меньшем диапазоне (5,6-6,2 км/с).

Непрерывное прослеживание границ этих слоев нарушается в интервале 16-26 км (пикеты 16-26), где наблюдается наибольшая изменчивость скоростных параметров первого слоя. На всем протяжении профиля прослежена вторая резкая граница на глубинах 0,9-2 км, отделяющая второй слой от третьего. Скорость в нижнем слое меняется в диапазоне 6,3-6,8 км/с. Подошва третьего слоя условно связывается с отражающими площадками на глубинах более 6 км. Наличие резкой скоростной границы раздела на этих глубинах подтверждается данными сейсмологических исследований со станцией „Земля", которыми установлена на значительной территории Кафанского рудного района опорная сейсмическая граница обмена. Особенности скоростной характеристики этой границы позволяет сделать предположение о связи ее с поверхностью доскладчатого фундамента.

При рассмотрении волн первых вступлений как преломленно-рефрагированных система годографов позволяет проследить на большей части профиля первую преломляющую границу, хорошо совпадающую с положением первой резкой границы - изолинии скорости на глубинах до 0,8 км. Кроме того, приближенно оценены глубины второй и третьей границ, соответствующих граничным изолиниям скоростных слоев. Значения граничной скорости в первом преломляющем слое получено способом скользящего среднего по полю времен. График граничной скорости отображает сложную, неоднородную структуру второго слоя. Изменения скорости по горизонтали происходит на небольших интервалах, значительно уступающих размерам блоков, установленных по данным рефрагированных волн. Последнее дает основание считать, что обработка первых волн в предположении об их рефрагированной природе имеет преимущественное значение при выявлении обобщенного слоисто-блокового строения среды.

Правомерность разбиения скоростного разреза на блоки и слои определена с учетом данных других геолого-геофизических методов. Общий подъем изолиний скорости в интервале пикетов 0-6 на скоростном разрезе отражает вторичные изменения вмещающих пород в зоне экзоконтакта Цавской интрузии (рис.2). Детальными сейсмическими исследованиями в этой зоне выявлен приповерхностный слой больших градиентов скорости мощностью 0,3-0,5 км. Выявление этого слоя по детальной системе наблюдений в области экзоконтакта

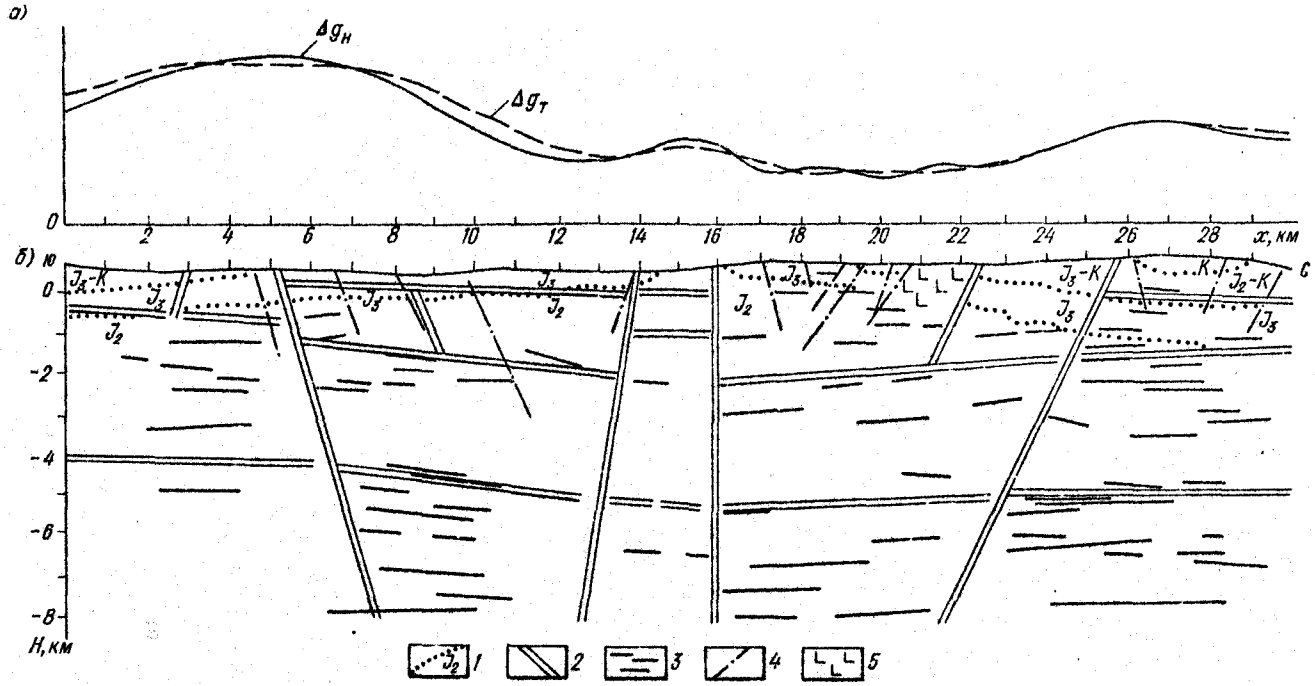


Рис.2. Построение сейсмоплотностной модели среды комплексом программ „Сейсмод" и „Гравмод": а – наблюденная ($\Delta g_н$) и теоретическая ($\Delta g_т$) кривые гравитационного поля; б – слоисто-блоковая модель, построенная по сейсмическим и гравиметрическим данным

1 – геологические индексы и границы; 2 – границы слоев и блоков; 3 – отражающие границы; 4 – разломы по данным сейсморазведки; 5 – экструзивные образования

Давской интрузии позволило уверенно определить размеры и строение блока изменённых пород и дать ему геолого-геофизическую характеристику.

Область южного погружения Кафанской структуры (пикеты 5-I4) выражена единым блоком, состоящим из четырех слоев. Их наклон, установленный по морфологии изолиний скорости и отражающим площадкам, противоположен наклону литологических границ. Аналогичная ситуация отмечается в присводовой части северного погружения пород юрского возраста (пикеты I6-26), где по небольшому смещению скоростных границ выделено два подобных блока, состоящих из трех субгоризонтальных слоев. Приповерхностный скоростной слой, прослеживаемый по границе с перепадом скорости 5-5,6 км/с, в этой части отсутствует из-за интенсивного проявления тектоники и вторичного магматизма.

Центральная часть структуры представлена небольшим по размерам вертикальным блоком (пикеты I4-I6) аномально повышенных значений скорости. Погружение скоростных слоев к центру структуры и согласованное с ним встречное падение разломов в сочетании с центральным блоком аномально высоких значений скорости являются типичными структурными признаками наложенной вулканической постройки центрального типа.

Крайний северный блок (пикеты 26-30), расположенный в области развития меловых отложений, характеризуется наибольшей расслоенностью по вертикали. Ввиду ослабления влияния наложенных тектономагматических процессов здесь, на периферии Кафанского поднятия, сейсмические границы оказываются связанными не только с разломной тектоникой, но и с литологическими контактами. Этот блок, отличающийся рядом особенностей скоростного строения, следует отнести к другой геологической среде, ограничивающей с севера Кафанскую вулканоструктуру.

Общий структурный план скоростного разреза – погружение скоростных слоев к центру и разделение на блоки – подтверждается поведением отражающих элементов во всем диапазоне глубин. Наиболее четко отражающими площадками подтверждается подошва второго слоя высоких значений скорости, ниже которой располагается инверсионная зона. Можно предположить, что подошва второго слоя является нижней границей рудоактивного (продуктивного) интервала разреза, содержащего эффузивные и экструзивные образования юрского возраста Кафанской вулканической постройки.

Для подтверждения выявленной слоисто-блоковой модели среды была применена методика совместного построения сейсмоплотностного разреза, основанная на принципе итеративного подбора по комплексу программ „ Сейсмод" и „Гравмод" [I, 2]. Преобразование скоростной модели в плотностную базируется на предположении о линейной зависимости между скоростью v и плотностью σ: $\sigma = a + b\sigma$. Коэффициенты a и b надежно определяются в тех случаях, когда над блоком с единой, статистически достоверной зависимостью скорости от плотности наблюдается четко выраженные аномалии $\Delta g_н$.

От полученного плотностного разреза $\sigma(x,z)$ рассчитывается поле $\Delta g_т$ и проводится регрессивный анализ, позволяющий выделить блоки с отличными от принятых скоростно-плотностными зависимостями. Для выделенных блоков

решается обратная линейная задача гравиметрии и определяются поправки к принятым зависимостям. Так как поправки не устраняют всех значительных расхождений между $t_н$ и $t_т$, то в пределах эквивалентности скоростного разреза изменяется положение гравиактивных междублоковых границ, вводятся дополнительные детализирующие блоки или уточняется положение скоростных границ.

Окончательный вариант слоисто-блоковой модели среды учитывает результаты совместной обработки сейсмического и гравиметрического полей (рис.2). Построение сейсмоплотностного разреза внесло изменение главным образом в положение блоков и слоев, расположенных в южной части разреза. Последнее касается изменения положения наклонных границ раздела блоков и уточнения глубины четвертого слоя. Полученные упругие характеристики позволили с большей достоверностью установить геологическую природу отдельных блоков и слоев.

В заключение отметим, что совместная обработка сейсмических и гравиметрических данных по комплексу программ „Сейсмод" и „Гравмод" повышает надежность выявления слоисто-блокового строения пород рудных районов. Согласованность независимой информации сужает области эквивалентности решения обратной задачи. С наибольшей достоверностью сейсмоплотностной разрез строится по данным обработки проходящих волн и гравитационному полю, несущих информацию о вещественном составе пород. Комплексирование гравиразведки с данными обработки отраженных волн не всегда дают однозначный вариант строения среды, так как отражающие границы соответствуют не только контактам толстых слоев, но и тонкослоистым интервалам разреза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козленко В.Г., Костюкевич А.С. Формальное итерационное моделирование как основа совместной интерпретации волнового и гравитационного полей. – Док. АН СССР, Сер. Б, 1982, № 5, с. 12-15.

2. Козленко В.Г., Костюкевич А.С., Мирошникова О.В. Методика „Сейсмод" при изучении рудных районов. – Геофизический журнал, 1985, т.8, № 6, с. 32-42.

3. Литвиненко И.В., Лизинский М.Д., Мирошникова О.В. и др. Использование сейсмических волн разных типов при построении скоростных и структурных моделей рудных районов. – В кн.: Многоволновая сейсморазведка. Новосибирск, изд. ИГиГ СО АН СССР, 1985, с. 44-45.

4. Мирошникова О.В., Шопин Ю.Г., Маринковская Н.Г. Кинематические и динамические характеристики волн, отраженных от наклонных границ, для некоторых моделей неоднородных сред. – В кн.: Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. 11. Л., Наука, 1971, с. 136-146.

5. Мирошникова О.В., Шопин Ю.Г. Связь волновых полей с некоторыми структурными особенностями комплекса магматических пород. – В кн.: Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. 20. Л., Наука, 1981, с. 129-134.

6. Мирошникова О.В., Шопин Ю.Г. Волновые поля, соответствующие зонам тектонических нарушений в рудных районах. – Зап. ЛГИ, 1984, т. 101, с. 24-28.

7. Шопин Ю.Г., Мирошникова О.В. Методика составления скоростных моделей магматических пород рудных районов. – Зап. ЛГИ, 1982, т. 92, с. 51-57.