

О ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ОТРАЖАЮЩИХ ГРАНИЦ В РАЗРЕЗАХ ПЕЧЕНГСКОГО РАЙОНА

*И. В. Литвиненко, А. Л. Ливанцова, М. Д. Лизинский,
М. Е. Меламуд*

Решение важного вопроса о точности построения сейсмических границ не только в Печенгском, но и в других рудных районах затрудняется сложным характером регистрируемых волновых полей и изменением скоростных разрезов по площади, что объясняется сильной дислоцированностью складчатых структур, сложенных различными комплексами высокоскоростных кристаллических и метаморфизованных пород. Сложное строение криволинейных крутопадающих отражающих границ приводит к появлению частых разрывов и петель на годографах отраженных волн. Наличие в разрезах многочисленных небольших по размерам неоднородностей и неблагоприятные условия возбуждения увеличивают фон различных помех, накладывающихся на полезные волны. В результате этого, несмотря на применение в Печенгском районе систем наблюдений методом отраженных волн (МОВ) с удлиненными годограмами, при взрывах часто регистрируются «штриховые» дискретные волновые поля, в которых наблюдаются многочисленные короткие оси синфазности регулярных отраженных волн и лишь в отдельных случаях выделяются более протяженные волны или их группы с годографами гиперболической формы. Группы волн также состоят из отдельных осей синфазности с близкими значениями кажущейся скорости v^* . Из-за крутых углов наклона волнистых отражающих границ годографы соответствующих волн резко асимметричны относительно пункта взрыва.

Комплекс приемов анализа волновых полей с помощью различных аналоговых устройств (методы суммирования и вычитания), хотя существенно и улучшает корреляцию полезных сигналов, но не устраняет полностью дискретного характера регистрируемых волн. Вычисления эффективной скорости способом взаимных точек, скважинные и наземные детальные наблюдения по профилям, пересекающим известные геологические контакты, показали, что, помимо монотипных продольных отраженных волн, в ряде случаев регистрируются также обменные и поперечные волны. Вопрос о природе выделенных волн имеет важное значение для правильного выбора расчетных скоростей, соответствующих либо монотипным, либо обменным волнам. Не останавливаясь подробно на способах определения типа регистрируемых отраженных волн, отметим, что для опорных — более протяженных — волн этот во-

прос, как будет показано ниже, может быть решен в процессе построения разреза при наличии корреляционно увязанных систем, обеспечивающих двойное прослеживание отражающей границы.

Таким образом, на первом этапе задачу можно свести к построению большого количества отражающих площадок различной протяженности и оценке точности положения в разрезе каждой из них. Обилие отраженных волн требует решения этой задачи только с применением ЭВМ. Относительно слабая дифференциация разрезов по скорости позволяет применять более простые методики построения отражающих элементов с использованием средней скорости. Имеющиеся вариации скоростного разреза в пределах крупных блоков можно достаточно надежно учесть, задавая интервал возможных изменений скорости для конкретных условий данного разреза.

При построении отражающих площадок по коротким годографам неизбежно приходится использовать приемы, основанные на определении кажущейся скорости v^* . Разработка программы для построения отражающего элемента по монотипной волне с использованием скорости v^* соответствующего годографа достаточно проста. Однако, как уже отмечалось, необходимым этапом интерпретации сейсмических разрезов является оценка погрешности построения отражающих площадок. Поскольку в Печенском районе их строят по элементам удлиненного годографа, находящимся на любых удалениях от пункта взрыва, для оценки ошибок построения не могут быть использованы способы, разработанные для наблюдений вблизи пункта взрыва. Поэтому потребовалась и была выработана новая методика оценки ошибок координат x , z и угла наклона φ отражающих площадок, учитывающая погрешности исходных данных: базы наблюдений l , времени регистрации t , средней v и кажущейся v^* скорости отраженной волны. Методика пригодна для оценки ошибок построения площадок по годографам монотипных и обменных волн, для последних предполагаются известными средняя скорость по падающему v_1 и отраженному v_2 лучам.

Вычисление средних квадратических ошибок построения площадки основано на представлении координат ее центра (x, z) и угла наклона φ в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{l \sin e \cos \alpha}{\sin(e + \alpha)}; \\ z &= \frac{l \sin e \sin \alpha}{\sin(e + \alpha)}; \\ \varphi &= -\frac{\pi}{2} + (i_1 + \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Принятые обозначения показаны на рис. 1; пользуясь ими, нетрудно показать, что углы падения и отражения в точке A равны соответствующим углам в точках O и D и составляют

$$\begin{aligned} i_1 &= \arcsin \frac{l \sin e}{\sqrt{R^2 + l^2 - 2Rl \cos e}}; \\ i_2 &= \arcsin \frac{\gamma l \sin e}{\sqrt{R^2 + l^2 - 2Rl \cos e}}, \end{aligned}$$

где $\gamma = \frac{v_2}{v_1}$ (для монотипных волн $v_2 = v_1$, $\gamma = 1$).

Формулы (1) применяются для построения элементарных плоских участков границы по годографам отраженных волн любых типов (как монотипных, так и обменных) и соответствуют, в частности, выраже-

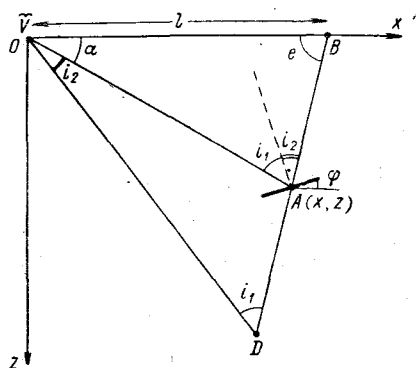


Рис. 1. Схема лучей отраженной волны

O — пункт взрыва (начало координат); $A(x, z)$ — точка отражения элемента границы с углом наклона φ ; B — пункт регистрации отраженной волны, в котором определяются t и v^* ; $OB = l$ — расстояние «взрыв — прибор»; $e = \arccos \frac{v_2}{v^*}$ — угол выхода луча; α — угол между падающим лучом и линией наблюдения; $BD = v_2 t = R$

ниям, приведенным Н. Н. Пузыревым* для монотипной волны. Средние квадратические ошибки m_x , m_z и m_φ функций (1) имеют громоздкий вид и здесь не приводятся. Изменение этих ошибок в зависимости от угла выхода e покажем на частном случае монотипной волны, для этого формулы (1) удобно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{l \sin e \cos (e - 2\varphi)}{\sin 2(e - \varphi)}; \\ z &= \frac{l \sin e \sin (e - 2\varphi)}{\sin 2(e - \varphi)}; \\ \varphi &= \arctg \left[\frac{1}{\sin e} \left(\frac{l}{vt} - \cos e \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1a)$$

В этом случае формулы для m_x , m_φ , m_z имеют вид**

$$\left. \begin{aligned} m_x &= \frac{l \operatorname{ctg} e \cos \varphi}{\sin 2(e - \varphi)} \sqrt{\left[\frac{m_{x^*}}{v^*} \cdot \frac{\sin (e - 2\varphi)}{\sin (e - \varphi)} \right]^2 + \left[2 \frac{m_v}{v} \cos \varphi \right]^2}; \\ m_z &= \frac{l \operatorname{ctg} e}{\sin 2(e - \varphi)} \sqrt{\left[\frac{m_{v^*}}{v^*} \cdot \frac{\sin \varphi \sin (e - 2\varphi)}{\sin (e - \varphi)} \right]^2 + \left[\frac{m_v}{v} (\operatorname{tg} e + \sin 2\varphi) \right]^2}; \\ m_\varphi &= \frac{\cos \varphi}{\sin^2 e} \sqrt{\left[\frac{m_{v^*}}{v^*} \sin (e - \varphi) \cos e \right]^2 + \left[\frac{m_v}{v} \sin (2e - \varphi) \right]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Неопределенность для случая $v^* = \infty$ разрешается путем преобразования выражения

$$\frac{m_{v^*}}{v^*} \cos e = \frac{m_{v^*} v}{(v^*)^2} = kv,$$

где

$$k = \frac{m_t}{\Delta l} \sqrt{\frac{12(n-1)}{n(n+1)}};$$

m_t — средняя квадратическая ошибка времени; Δl — база определения v^* ; n — число точек годографа на базе Δl .

* Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М., Госгиптехиздат, 1959.

** Ошибками координат и угла, которые вызваны погрешностями измерения расстояния и времени регистрации, можно пренебречь как малыми величинами.

Формулы (2) и относительные случайные ошибки координат точки отражения с учетом этого преобразования приобретают вид

$$\begin{aligned}
 m_x &= \frac{l \cos \varphi}{\sin e \sin 2(e - \varphi)} \sqrt{\left[kv \frac{\sin(e - 2\varphi)}{\sin(e - \varphi)} \right]^2 + \left[2 \frac{m_v}{v} \cos \varphi \cos e \right]^2}; \\
 m_z &= \frac{l}{\sin e \sin 2(e - \varphi)} \sqrt{\left[kv \frac{\sin \varphi \sin(e - 2\varphi)}{\sin(e - \varphi)} \right]^2 + \left[\frac{m_v}{v} (\sin e + \sin 2\varphi \cos e) \right]^2}; \\
 m_\varphi &= \frac{\cos \varphi}{\sin^2 e} \sqrt{[\sin(e - \varphi) kv]^2 + \left[\sin(2e - \varphi) \frac{m_v}{v} \right]^2}; \\
 \frac{m_x}{x} &= \frac{\cos \varphi}{\sin^2 e} \sqrt{\left[\frac{\operatorname{tg}(e - 2\varphi)}{\sin(e - \varphi)} kv \right]^2 + \left[\frac{2 \cos \varphi \cos e}{\cos(e - 2\varphi)} \cdot \frac{m_v}{v} \right]^2}; \\
 \frac{m_z}{z} &= \frac{1}{\sin^2 e} \sqrt{\left[\frac{\sin \varphi}{\sin(e - \varphi)} kv \right]^2 + \left[\frac{\sin e + \sin 2\varphi \cos e}{\sin(e - 2\varphi)} \cdot \frac{m_v}{v} \right]^2}.
 \end{aligned} \tag{2a}$$

Погрешности (2a) определения координат и угла наклона отражающего элемента в зависимости от угла выхода e представлены на рис. 2, построенном с учетом того, что угол выхода изменяется в интервале $2\varphi < e < \pi$. Графики построены по параметру φ . Значения угла выхода e в характерных точках годографа для разных углов φ совмещены по вертикали. За характерные точки приняты: выход отражающей границы к дневной поверхности ($e=2\varphi$); минимум годографа ($e=\pi/2$); точка выхода нормального луча — пункт взрыва ($e=\pi/2+\varphi$) и выход отраженного луча от точки границы с координатой $x=0$ ($e=\pi/2+2\varphi$).

Значения ошибок координат нормированы расстоянием l взрыв — прибор, совместное рассмотрение нормированных по l и относительных погрешностей позволяет получить представление об их значениях в особых точках ($l=0, x=0, z=0$). Графики ошибок построены для условий, характеризующих наблюдения в Печенгском районе; для двух значений параметра kv , соответствующих протяженности осей синфазности отраженных волн 0,3 и 0,6 км (при расстояниях между центрами групп сейсмоприемников 25 м).

Как следует из рис. 2, наименьшие относительные погрешности определения глубин отражающей площадки (для углов $\varphi=10 \div 30^\circ$ они равны 2—7%) соответствуют области годографа между его минимумом ($e=\pi/2$) и нормальным лучом ($e=\pi/2+\varphi$), а нормированные по l погрешности глубины для углов падения $30\text{—}45^\circ$, преобладающих в Печенгском районе, практически не изменяются (2—4%) в области годографа между минимумом и точкой выхода ($e=2\varphi$). Погрешности горизонтальной координаты точки отражения, минимальные в той же области, увеличиваются в направлении падения границы и в общем тем больше, чем меньше угол падения. Углы падения $30\text{—}45^\circ$ определяются более точно (с ошибкой, не превышающей $1\text{—}4^\circ$) между минимумом годографа и точкой выхода, погрешности пологих углов больше, чем крутых. При наблюдениях по падению отмечается рост всех рассматриваемых погрешностей. Как следует из выражения (2a), в пределе ($e \rightarrow \pi$) погрешности становятся настолько значительными, что обесценивают построение отражающих границ.

Графики зависимости погрешностей построения отражающих площадок от угла выхода e показаны для определенных условий ($kv=0,1; 0,04$) и позволяют качественно предсказать, с какой точностью решается эта задача по отдельным участкам годографов. Для

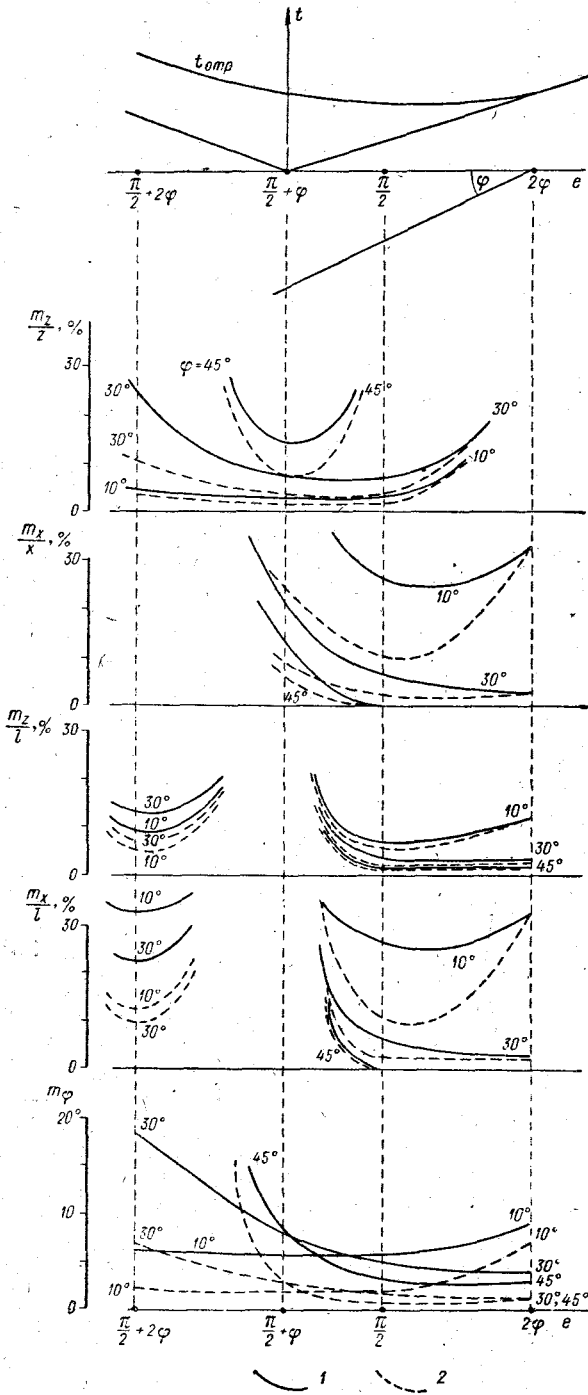


Рис. 2. Схема годографа отраженной волны от границы, падающей под углом φ , и схематические графики погрешностей построения границы в зависимости от угла выхода e применительно к условиям Печенгского района $m_v/v=2\%$, $kv=0,1$ (1) и $kv=0,04$ (2)

строгого определения координат и средних квадратических ошибок следует выполнять расчеты по формулам (1) или (1а), (2а). В связи с очевидной сложностью формул составлена программа для ЭВМ БЭСМ-4, предусматривающая вычисление координат и угла наклона отражающей площадки при различных значениях v в предположении, что зарегистрированная волна может быть монотипной или обменной, а также их средних квадратических ошибок, обусловленных погрешностями определения скорости падающей (v_1) и отраженной (v_2) волны и ее кажущейся скоростью v^* .

Исходными данными для расчета координат отражающей площадки являются (см. рис. 1): координаты пункта взрыва и базы приема отраженной волны; время регистрации t и кажущаяся скорость v^* в точке B приема; значения средних скоростей для падающего и отраженного лучей; средние квадратические ошибки m_v , m_{v^*} исходных данных.

Построение отражающих площадок проводится в декартовой системе координат, совмещенной с плоскостью сейсмических лучей. Блок-схема программы приведена на рис. 3. Арифметические блоки обозначены прямоугольниками, логические, в которых проверяется выполнение тех или иных условий, — кругами. Логические операторы имеют два выхода. Если условие, проверяемое данным оператором, выполнено, то дальнейшие вычисления проводятся по направлению, обозначенному стрелкой с индексом «+», в противном случае вычисления будут проводиться по направлению с индексом «—».

В первой части программы вычисляются координаты (x, z) центра, угол наклона φ отражающей площадки и средние квадратические ошибки этих величин в зависимости от погрешностей определения исходных данных. Во второй части реализуется алгоритм поиска концов отражающего элемента. Если скорости падающего и отраженного лучей равны (случай монотипной волны), то координаты концов отражающей площади определяются как точки пересечения двух прямых: первая проходит через точку мнимого пункта взрыва и начало (или конец) базы приема, вторая — собственно отражающая площадка, для которой определены координаты одной точки и угол наклона. Для случая обменной волны концы отражающей площадки определяются методом подбора угла θ подхода отраженного луча к дневной поверхности. Подбор угла θ продолжается до тех пор, пока абсцисса пункта взрыва, полученная в результате расчета, не совпадет с истинным положением пункта взрыва с точностью, определяемой масштабом сейсмического разреза. Эта часть программы на блок-схеме показана обобщенно.

Расчеты на ЭВМ координат отражающих площадок и средних квадратических ошибок широко используются при построении и интерпретации сейсмических разрезов в Печенгском районе. На разрезе (рис. 4), наряду с отражающими площадками, указывается в виде прямоугольников вероятное положение их центров, стороны прямоугольников соответствуют погрешностям определения горизонтальной и вертикальной координат. При геологической интерпретации разрезов отдельные площадки могут перемещаться на плоскости в пределах своих прямоугольников ошибок до получения закономерной картины, точность проведения горизонтов может быть показана штриховкой, границы которой обусловлены положением этих прямоугольников.

Такой способ построения сейсмических разрезов дает объективное представление о надежности определения каждого из отражающих элементов. Опыт работ показал, что погрешности построения отражаю-

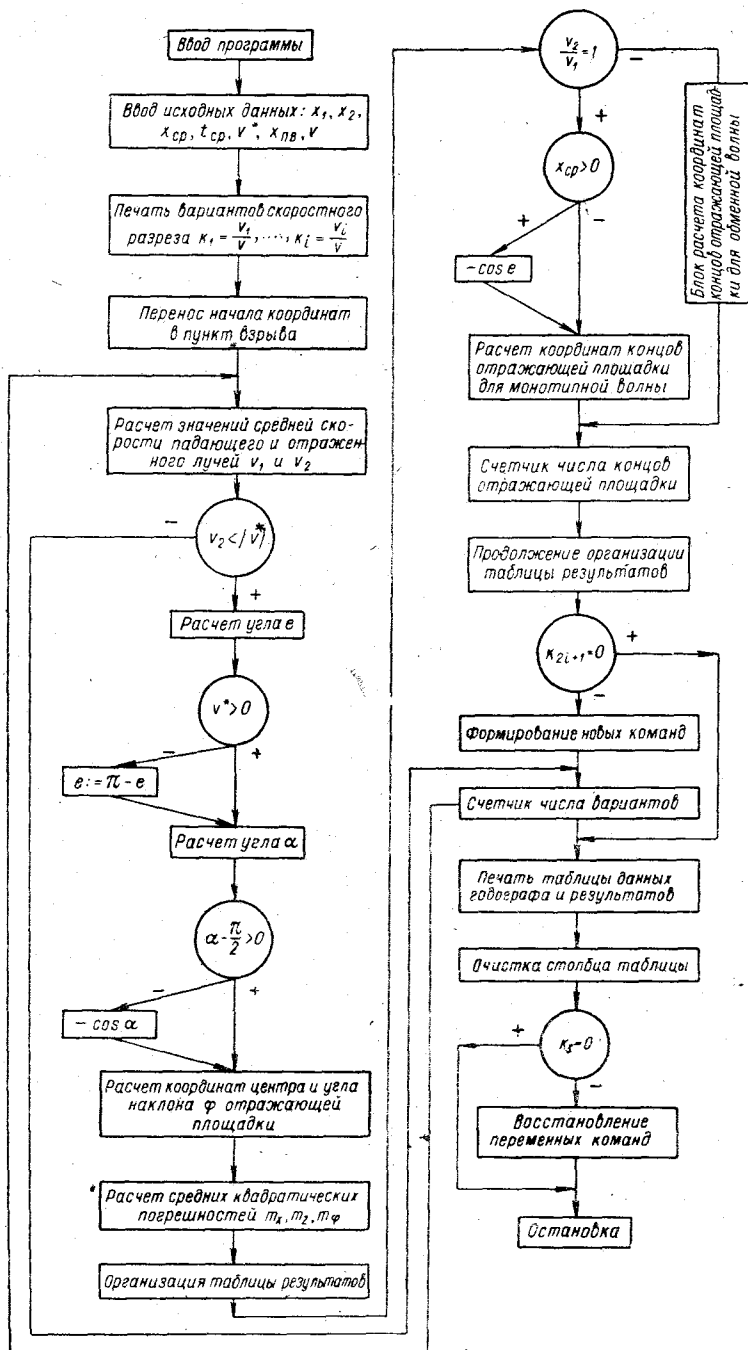


Рис. 3. Блок-схема программы «Построение площадок по годографам монотипных и обменных отраженных волн»

щих площадок изменяются в широких пределах. При определении глубинных структур, естественно, предпочтение оказывается тем площадкам, которые построены с меньшими погрешностями.

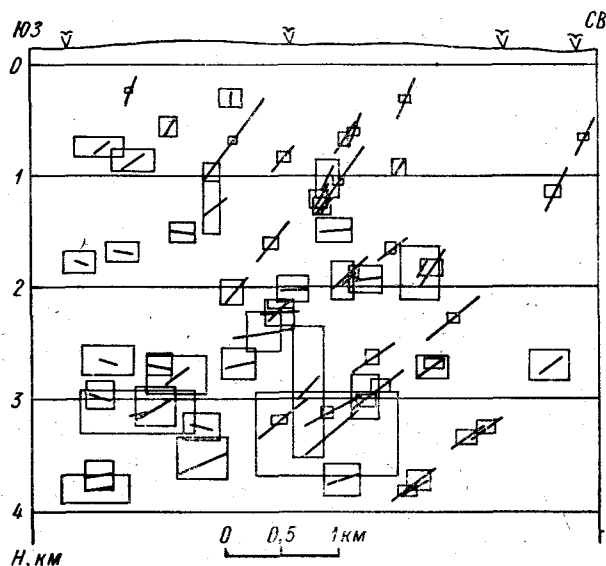


Рис. 4. Сейсмический разрез западной части Печенгской структуры.

Прямоугольниками показана область вероятного положения центров отражающих площадок

Совместное рассмотрение сейсмических разрезов, построенных для каждого пункта взрыва в отдельности, дает новые сведения для повышения надежности определения отражающих границ. Положение отражающих элементов, полученных для корреляционно увязанных волн, должно совпадать в пределах вычисленных погрешностей. При этом попутно можно проверить правильность определения природы этих волн и выбора расчетной скорости.

В дальнейшем целесообразно развить предложенную методику определения надежности сейсмических построений путем разработки способов аппроксимации отдельных групп отражающих элементов сейсмической границей, соответствующей группе волн.

Выводы

1. Для произвольной системы профильных сейсмических наблюдений предложены формулы для вычисления координат и угла наклона отражающей площадки, а также их средних квадратических погрешностей, дающие решение как для монотипных, так и для обменных волн.

2. На примере решения задачи для монотипных отраженных волн показано изменение погрешностей координат и угла падения площадки в зависимости от угла выхода луча, определены области годографа, по которым построение отражений проводится с большей точностью.

3. Описано действие и приведена блок-схема программы для ЭВМ БЭСМ-4, используемой для обработки данных сейсморазведки МОВ в Печенгском районе.