

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/268806086>

# Определение параметров сейсмической анизотропии в западной Якутии

Article · January 1986

CITATIONS

0

READS

6

3 authors, including:



**Victor Sergeevich Seleznev**

Геофизическая служба СО РАН, Geophysical Survey SB RAS

275 PUBLICATIONS 254 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



сейсмический мониторинг динамического состояния здания или сооружения [View project](#)



Микросейсмология [View project](#)

В. С. СЕЛЕЗНЕВ, В. М. СОЛОВЬЕВ, А. Б. НИКИТЕНКО

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

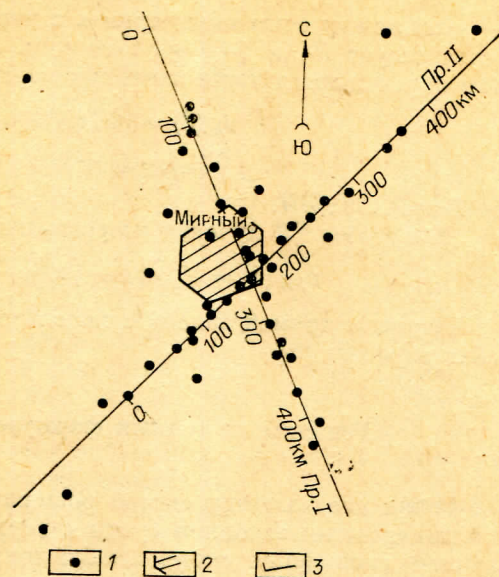
В настоящей работе рассматривается способ определения интегральных эффективных упругих параметров земной коры по имеющейся информации о временах прихода отраженных от границы Мохоровичича продольных и поперечных ( $SV$  и  $SH$ ) волн. Земная кора при этом аппроксимируется моделью однородной поперечно-изотропной среды с вертикальной осью симметрии. Решение ищется методом последовательных приближений. Проверка на тестовых примерах показывает, что ошибки в определении эффективных упругих параметров покрывающей среды и глубины отражающей границы при получении первых приближений в анизотропной модели с коэффициентами анизотропии по  $P$ -,  $SV$ -волнам до 13%, а по  $SH$ -волнам до 20% не превышают 3—4%. Уточнение полученных приближений эффективных упругих параметров и нахождение точного решения достигаются методом минимизации целевой функции. По одному из профилей приведены результаты обработки экспериментального материала по  $P_{отр}^M$ ,  $SV_{отр}^M$ - и  $SH_{отр}^M$ -волнам.

В настоящее время накоплен большой объем сейсмических данных, свидетельствующих о наличии анизотропии в земной коре (в основном в верхней ее части) и верхней мантии [2, 4, 5, 8, 15 и др.]. Выявление и изучение анизотропии пород дают существенный прирост геофизической информации о строении земной коры и верхней мантии и о происходящих в них процессах. Неучет ее неизбежно приводит к потере ценной информации об упругих параметрах сред; полученные в результате интерпретации в рамках изотропной модели эффективные параметры  $h_{эф}$ ,  $V_{эф}$ ,  $V_r$ ,  $\varphi$  будут определяться с погрешностями тем большими, чем более среда отличается от изотропной. Например, при использовании интегральных эффективных скоростей  $SH$ -волн в модели поперечно-изотропной среды с вертикальной осью симметрии погрешность определения истинного положения отражающей границы ( $h_{эф}$  вместо  $h_{ист}$ ) прямо пропорциональна коэффициенту анизотропии [4]:

$$h_{эф}/h_{ист} = K_{SH},$$

где  $h_{эф}$  и  $h_{ист}$  — эффективная и истинная глубины до отражающей границы соответственно;  $K_{SH}$  — коэффициент анизотропии  $SH$ -волн.

Рис. 1. Схема наблюдений в районе Мирнинского кимберлитового поля.  
1 — пункты взрывов; 2 — контур площади расстановки регистрирующих станций, 3 — линии профилей.



Расчеты, проведенные для моделей поперечно-изотропных сред, показывают, что использование интегральных или дифференциальных эффективных скоростей  $P$ - и  $SV$ -волн также приводит к ошибкам в определении истинного положения отражающей границы, которые, как правило, превышают аналогичные ошибки при использовании эффективных скоростей  $SH$ -волн (в моделях с одинаковыми коэффициентами анизотропии по  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волнам) и зависят как от интервала баз, на котором определяется эффективная скорость, так и от относительного удаления от источника  $U/H$ .

При глубинных сейсмических исследованиях в Западной Якутии (район г. Мирного) в 1982—1984 гг. проводились опытные работы по регистрации волнового поля поперечных волн с использованием трехкомпонентных сейсмографов [11]. Основной объем трехкомпонентных ( $x, y, z$ ) наблюдений ( $\sim 250$  записей для удалений 0—400 км от источников) выполнен в 1983 г. на профиле II; около 100 трехкомпонентных ( $x, y, z$ ) записей для удалений 0—300 км было получено при площадной съемке в 1982 г. (рис. 1). По данным отраженных волн установлен факт наличия анизотропии земной коры (различие времен регистрации  $SV$ - и  $SH$ -волн, отраженных от границы  $M$ , на базах 140—150 км достигает  $\sim 0,8$  с). Выделились участки с различным поведением кинематических характеристик волн разной поляризации ( $SV_{отр}^M$ ,  $SH_{отр}^M$  и  $P_{отр}^M$ ). Была предпринята попытка количественно оценить по данным о временах отраженных от границы  $M$  волн типа  $P$ ,  $SV$  и  $SH$  интегральные для всей толщи земной коры параметры анизотропии. Имеющейся информации пока недостаточно для определения модели среды, поэтому при интерпретации введено упрощающее предположение, что толщина земной коры может быть аппроксимирована моделью однородной поперечно-изотропной среды с вертикальной осью симметрии.

Как известно, поперечно-изотропная среда характеризуется пятью независимыми упругими параметрами  $c_{11}$ ,  $c_{13}$ ,  $c_{33}$ ,  $c_{44}$ ,  $c_{66}$ . Часто при описании распространения объемных волн  $P$ ,  $SV$  и  $SH$  используют эффективные упругие параметры  $V_{\perp P}$ ,  $\kappa_P$ ,  $\kappa_{SH}$ ,  $V_{\perp S}$ ,  $\xi$  и другие, связанные с константами упругости  $c_{ij}$  соотношениями [9]:

$$\begin{aligned} V_{\perp P} &= \sqrt{c_{33}/\rho}, & \kappa_P &= \sqrt{c_{11}/c_{33}}, & \xi &= \sqrt{c_{13}/c_{33}}, \\ V_{\perp S} &= \sqrt{c_{44}/\rho}, & \kappa_{SH} &= \sqrt{c_{66}/c_{44}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Нормальные скорости  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн имеют вид

$$\begin{aligned} V_{SH}(i) &= V_{\perp S} [1 + (\kappa_{SH}^2 - 1) \cdot \sin^2 i]^{1/2}, \\ V_{P,SV}(i) &= V_{\perp P} [1 + \gamma_{\perp}^2 + (\kappa_P^2 - 1) \cdot \sin^2 i \pm F(i)]^{1/2} / \sqrt{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$F(i) = [(\xi^2 + \gamma_{\perp}^2)^2 \sin^2 2i + [\kappa_P^2 - 2\gamma_{\perp}^2 + 1] \cdot \sin^2 i - 1 + \gamma_{\perp}^2]^2]^{1/2},$$

$$\gamma_{\perp} = \frac{V_{\perp S}}{V_{\perp P}},$$

$i$  — угол между осью симметрии  $z$  и нормалью к фронту волны. Знак (+) соответствует  $P$ -, а (-) —  $SV$ -волнам. Лучевые скорости  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн определяются через значения нормальных скоростей:

$$\begin{aligned} v_k(\theta) &= [V_k^2(i_k) + (dV_k/di_k)^2]^{1/2}, \\ \theta(i_k) &= i_k + \text{arctg}(d \ln V_k/di_k), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $k = P, SV, SH$ .

Для волны  $SH$  лучевая скорость записывается в виде

$$v_{SH}(\theta) = V_{\perp S} [1 - (\kappa_{SH}^2 - 1) \cdot \sin^2 \theta / \kappa_{SH}^2]^{-1/2}. \quad (4)$$

Решение прямой задачи с использованием численных методов можно найти в работе [6].

### Решение по точным формулам (численный способ)

Ниже предлагается способ решения обратной задачи — для однородной поперечно-изотропной среды с вертикальной осью симметрии, учитывающей специфику систем наблюдений при глубинных сейсмических исследованиях. Рассматривается случай горизонтальной отражающей границы или приближенного равенства глубин при симметричных зондированиях. Исходной информацией являются времена вступлений отраженных  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн, снятые с участков годографов или полей времен  $t(x, l)$  указанных типов волн с соответствующими базами зондирования ( $l_1$  и  $l_2$ ). Отличие предлагаемого способа решения от существующих [1, 3, 4] заключается в различии начальных данных. Для реализации решений по способам, описанным в работах [3, 4], необходимы, кроме информации о временах вступлений  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн, данные о значениях скоростей  $P$ - или  $S$ -волн в вертикальном направлении; в работе [1] решение достигается с использованием плотных протяженных годографов  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн начиная с удалений  $l = 0$  от источника. Однако при исследованиях методом ГСЗ регистрация отраженных волн (особенно это относится к  $SV$ - и  $SH$ -волнам) осуществляется по редким системам наблюдений (интервалы между расстановками 10–15 км) и, как правило, в закритической области, что соответствует диапазону углов от 45 до 60° на индикатрисах скоростей  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн. Если в двух точках с базами зондирования  $l_1$  и  $l_2$  получены шесть значений времен  $t_{km}$ , то можно составить систему из семи уравнений:

$$\begin{aligned} t_{km}^2 \cdot \sin^2 \theta_m \cdot v_k^2(\theta_m) &= l_m^2, \\ \text{tg } \theta_2 &= \frac{l_2}{l_1} \text{tg } \theta_1; \quad k = P, SV, SH; \quad m = 1, 2. \end{aligned} \quad (5)$$

В этой системе неизвестными являются  $\theta_1, \theta_2, \kappa_{SH}, V_{\perp S}, \gamma_{\perp}, \kappa_P, \xi$ . Так как  $V_{\text{эф}}$  для волн  $SH$  не зависит от базы зондирования, из двух уравнений, входящих в систему (5), выразим  $t_0$ :

$$t_0^2 = (2H/V_{\perp S})^2 = (l_2^2 \cdot t_{SH_1}^2 - l_1^2 \cdot t_{SH_2}^2) / (l_2^2 - l_1^2) = [l_m / (\text{tg } \theta_m \cdot V_{\perp S})]^2. \quad (6)$$

Здесь  $H$  — глубина до отражающей границы.

Оставшиеся пять уравнений из системы (5) перепишем в виде

$$(t_0/t_{km})^2 = F_{km}^2(\gamma_{\perp}, \xi, \kappa_P, \theta_m), \quad (7)$$

$$\text{tg } \theta_2 = l_2 \cdot \text{tg } \theta_1 / l_1,$$

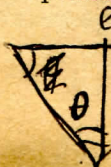
где

$$F_{km}^2 = v_k^2(\theta_m) \cdot \cos^2 \theta_m / V_{\perp S}^2; \quad k = P, SV; \quad m = 1, 2.$$

Будем искать решение системы уравнений (7), используя метод минимизации многомерной целевой функции, предложенный Нелдером и Мидом [14]. Входными данными являются времена  $P, SV$  и  $SH$ -волн для баз  $l_1$  и  $l_2$ .

$$\theta = \arcsin \frac{l}{2H}$$

$$\text{tg } \theta_m =$$



$$\text{tg } \theta = \frac{l}{2H}$$

Минимизируемая функция имеет вид

$$Fun X(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 [(t_0/t_{km})^2 - F_{km}^2]^2, & \text{если } X_i \in A, \\ 100 + |X_i - xx|, & \text{если } X_i \notin A. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь  $xx$  — начальные приближенные значения  $\gamma_{\perp}$ ,  $\xi$ ,  $k_P$ ,  $\theta_1$ ;  $X_i$  —  $i$ -е приближенные значения  $\gamma_{\perp}$ ,  $\xi$ ,  $k_P$ ,  $\theta_1$ ;  $A = (xx + nxx)$  — область изменения параметров  $\gamma_{\perp}$ ,  $\xi$ ,  $k_P$ ,  $\theta_1$ , где ищется решение;  $k = P, SV$ ;  $m = 1, 2$ .

Алгоритм строится следующим образом: задаются приближенные значения лучевого угла  $\theta_1$  и эффективных параметров  $\gamma_{\perp}$ ,  $\xi$ ,  $k_P$ . Из уравнения, связывающего  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , рассчитывается значение угла  $\theta_2$ , и все данные подставляются в систему уравнений (3). Далее находятся значения нормальных углов и лучевых скоростей  $P$  и  $SV$  волн для баз  $l_1$  и  $l_2$ . После этого определяется значение целевой функции  $Fun$ . Минимизируя его, находим уточненные параметры  $\gamma_{\perp}$ ,  $\xi$ ,  $k_P$ ,  $\theta_1$ . Решение ищется в заданной области  $A$ . Это позволяет избавиться от многих локальных минимумов, не являющихся физическим решением.

Проверка алгоритма осуществлялась на большом количестве тестовых примеров. Времена вступлений  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн определялись при решении прямой задачи для модели поперечно-изотропной среды с вертикальной осью симметрии. Коэффициенты анизотропии по  $P$ - и  $SV$ -волнам изменялись до 13%, по  $SH$ -волнам — до 20%. При получении решения количество итераций зависит от задаваемой точности определения искомых параметров и начального приближения. В случае задания начального приближения с точностью  $\pm 3-5\%$  для нахождения эффективных упругих параметров с точностью 0,1–0,2% требуется около 30–50 итераций. В некоторых случаях при минимизации можно попасть в локальный минимум, где  $Fun \neq 0$ . Тогда необходимо в заданной области  $A$  выбрать (по какой-либо сетке) другое начальное приближение и повторять вычисления, пока функция  $Fun$  не станет равна 0. В реализованной программе задана равномерная сетка с двумя значениями по каждому параметру. Глобальный минимум находился обычно после второго — четвертого шага.

Естественно, что при использовании данного алгоритма важно, чтобы начальное приближение было близко к точному решению и область  $A$  была небольшой.

#### Начальное приближение для точного решения (приближенные формулы)

Исследование экспериментального материала показало, что при достаточно больших путях пробега  $SV$ - и  $SH$ -волн в земной коре (110–180 км) отличия во временах относительно небольшие ( $\Delta t = 0,1-0,8$  с). Данное обстоятельство может свидетельствовать в пользу слабой анизотропии земной коры исследуемого региона. Поэтому для получения приближенных значений эффективных упругих параметров и угла можно использовать приближенные формулы для нормальных скоростей  $P$ - и  $SV$ -волн, полученные в виде рядов Фурье [7]:

$$\begin{aligned} \rho V_{SV}^2(i) &= D - C \cdot \cos 4i, \\ \rho V_P^2(i) &= A + B \cdot \cos 2i + C \cdot \cos 4i, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} A &= [3(c_{11} + c_{33}) + 2(c_{13} + 2c_{44})]/8, \\ B &= (c_{33} - c_{11})/2, \\ C &= [c_{11} + c_{33} - 2(c_{13} + 2c_{44})]/8, \\ D &= [c_{11} + c_{33} - 2(c_{13} - 2c_{44})]/8. \end{aligned}$$

Здесь  $\rho$  — плотность, а  $i$  — угол между осью симметрии ( $z$ ) и нормалью

к фронту. Введя параметр  $\kappa_{SV} = \frac{1}{2} \sqrt{(c_{11} + c_{33} - 2c_{13})/4c_{44}} = V_{SV} (i = 45^\circ)/V_{\perp S}$  ( $V_{SV} (i = 45^\circ)$  — нормальная скорость  $SV$ -волны под углом  $45^\circ$  к оси симметрии  $z$ ) и используя формулы связи констант упругости  $c_{ij}$  с эффективными упругими параметрами (1), можно формулы (9) привести к виду

$$\begin{aligned} V_{SV}^2(i) &= V_{\perp S}^2 [1 + (\kappa_{SV}^2 - 1) \sin^2 2i], \\ V_P^2(i) &= V_{\perp P}^2 [1 + (\kappa_P^2 - 1) \cdot \sin^2 i] - V_{\perp S}^2 (\kappa_{SV}^2 - 1) \cdot \sin^2 2i. \end{aligned} \quad (10)$$

Принимая в качестве первого приближения  $\theta \cong i$  и используя способ решения, описанный ранее, можно составить системы уравнений:

$$(t_0/t_{SV,m})^2 = [1 + (\kappa_{SV}^2 - 1) \cdot \sin^2 2\theta_m] \cdot \cos^2 \theta_m, \quad (11)$$

$$(t_0/t_{P,m})^2 = \{ [1 + (\kappa_P^2 - 1) \cdot \sin^2 \theta_m] / \gamma_{\perp}^2 - (\kappa_{SV}^2 - 1) \cdot \sin^2 2\theta_m \} \cos^2 \theta_m, \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 / \operatorname{tg} \theta_1 = l_2 / l_1, \quad m = 1, 2.$$

Система уравнений (11) сводится к уравнению

$$Ay^3 + By^2 + Cy + D = 0, \quad (13)$$

где

$$A = n(T_1 \cdot n^2 - T_2), \quad B = 3n(T_1 n - T_2) + n(1 - n),$$

$$C = 3n(T_1 - T_2), \quad D = (T_1 - 1) + n(1 - T_2),$$

$$n = (l_1/l_2)^2, \quad T_m = (t_0/t_{SV,m})^2,$$

$$m = 1, 2, \quad y = \operatorname{tg}^2 \theta_2,$$

из которого определяются  $\theta_2$ , затем  $\theta_1$  и из (11) —  $\kappa_{SV}$ . Из (12) определяются  $\kappa_P$ ,  $\gamma_{\perp}$ . Параметры  $V_{\perp S}$  и  $\kappa_{SH}$  находим из уравнений (5) для  $SH$ -волн.

Проверка полученного решения осуществлялась на тестовых примерах, описанных выше. Средние ошибки в определении параметров  $\kappa_P$ ,  $V_{\perp P}$ ,  $\kappa_{SH}$ ,  $\kappa_{SV}$ ,  $V_{\perp S}$  и  $\theta_m$  составляют 1—2%. Наблюдается возрастание ошибок при увеличении коэффициентов  $\kappa_{SV}$  и  $\kappa_P$ . Например, при увеличении параметра  $\kappa_{SV}$  до 1,1—1,12 максимальные ошибки в определении эффективных параметров достигают 3—4%.

Взяв в качестве начального приближения решение системы (11), можно, минимизируя (8), получить точные решения.

#### Уточнение приближенного решения

Из уравнений (10) и (3) получим приближенные значения лучевых скоростей:

$$v_{SV}(\theta) = V_{\perp S} \cdot (A + B_{SV}^2/A)^{1/2}, \quad (14)$$

$$v_P(\theta) = V_{\perp S} (W + (C - B_P)^2/W)^{1/2}$$

и лучевого угла  $P$ - и  $SV$ -волн:

$$\theta = i_{SV} + \operatorname{arctg}(B_{SV}/A), \quad \theta = i_P + \operatorname{arctg}[(C - B_P)/W], \quad (15)$$

где

$$A = 1 + (\kappa_{SV}^2 - 1) \cdot \sin^2 2i_{SV}, \quad B_k = (\kappa_{SV}^2 - 1) \cdot \sin 4i_k,$$

$$C = (\kappa_P^2 - 1) \cdot \sin 2i_P / 2\gamma_{\perp}^2$$

$$W = [1 + (\kappa_P^2 - 1) \sin^2 i_P] / \gamma_{\perp}^2 - (\kappa_{SV}^2 - 1) \cdot \sin^2 2i_P; \quad k = P, SV.$$

Используя полученные значения лучевой скорости  $SV$ -волны, можно составить систему уравнений, аналогичную (7):

$$(t_0/t_{SV,m})^2 = F_{SV,m}^2(\kappa_{SV}, \theta), \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 / \operatorname{tg} \theta_1 = l_2 / l_1.$$

здесь

$$F_{SV,m}^2 = (A + B_{SV}^2/A) \cdot \cos^2 \theta_m, \quad m = 1, 2,$$

а угол  $i_{SV}$  находится из уравнения (15).

Искать корни системы уравнений (16) будем, минимизируя следующую целевую функцию:

$$Fun_1(X_i) = \begin{cases} \sum_{m=1}^2 [(t_0/t_{SV,m})^2 - F_{SV,m}^2(\kappa_{SV}, \theta_m)]^2, & \text{если } X_i \in A, \\ 100 + |X_i - xx|, & \text{если } X_i \notin A, \end{cases} \quad (17)$$

где  $xx$  — начальные приближенные значения  $\kappa_{SV}$  и  $\theta_1$ , полученные из уравнений (11), (13);  $X_i$  —  $i$ -е приближения значений  $\kappa_{SV}$ ,  $\theta_1$ ;  $A = (xx \pm \pm nxx)$  — область изменения параметров  $\kappa_{SV}$ ,  $\theta$ , где ищется решение,  $m = 1, 2$ .

Зная  $\theta_1$ , из двух уравнений системы (5) для  $SH$ -волн найдем  $V_{\perp S}$  и  $\kappa_{SH}$ . Параметры  $\gamma_{\perp}$  и  $\kappa_P$  можно найти, зная  $V_{\perp S}$ ,  $\kappa_{SV}$ ,  $\theta_1$  и решая систему

$$\begin{aligned} (t_0/t_{P,m})^2 &= F_{P,m}^2(\gamma_{\perp}, \kappa_P), \\ \operatorname{tg} \theta_2 / \operatorname{tg} \theta_1 &= l_2/l_1, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$F_{P,m}^2(\gamma_{\perp}, \kappa_P) = [W + (C - B_P)^2/W] \cdot \cos^2 \theta_m; \quad m = 1, 2,$$

угол  $i_P$  находится из уравнения (15).

Целевая функция имеет в этом случае вид

$$Fun_2(X_i) = \begin{cases} \sum_{m=1}^2 [(t_0/t_{P,m})^2 - F_{P,m}^2(\gamma_{\perp}, \kappa_P)]^2, & \text{если } X_i \in A, \\ 100 + |X_i - xx|, & \text{если } x_i \notin A, \end{cases} \quad (19)$$

где  $xx$  — начальные приближенные значения  $\kappa_P$ ,  $\gamma_{\perp}$ , полученные из уравнений (11) — (13);  $x_i$  —  $i$ -е приближения значений  $\kappa_P$ ,  $\gamma_{\perp}$ ;  $A = (xx \pm \pm nxx)$  — область изменения параметров  $\kappa_P$ ,  $\gamma_{\perp}$ , где ищется решение,  $m = 1, 2$ .

Полученные таким способом приближения более точны по сравнению с приближенными эффективными параметрами, найденными по формулам (11) — (13), что позволяет сузить границы поиска корней при получении точного решения путем минимизации функции (8). Кроме того, минимизация в два этапа по два уравнения резко сокращает время счета, что весьма важно при обработке большого количества экспериментальных данных.

Таким образом, имея информацию о временах прихода  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн, можно в модели однородной поперечно-изотропной среды с вертикальной осью симметрии и горизонтальной отражающей границей, осуществляя операции последовательных приближений, определить с заданной точностью эффективные упругие параметры среды.

Вопросы устойчивости полученных решений в зависимости от погрешностей в определении времен вступлений регистрируемых  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн, баз зондирования, а также при неточном равенстве глубин для баз  $l_1$  и  $l_2$  при симметричных зондированиях (случай наклонного залегания отражающей границы) будут освещены в последующих работах. Можно только отметить, что возможности для повышения устойчивости значительные, поскольку в полученных выше решениях использовалась информация всего лишь из двух точек на годографах  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн. Следовательно, достижение необходимой устойчивости будет определяться числом дополнительных уравнений, входящих в систему (5).

#### Определение эффективных упругих параметров поперечных волн по приближенным формулам

При глубинных исследованиях основной упор, как правило, делается на регистрацию продольных волн; система же наблюдений для регистрации волнового поля поперечных волн малодетальна. Например, на 300-

километровом профиле II (см. рис. 1) находилось 46 станций с вертикально ориентированными приборами и лишь 12 станций с трехкомпонентными установками. Это ограничивает возможности применения полученных выше способов решения обратной задачи и получения интегральных эффективных параметров среды, поскольку не всегда удается подобрать достаточно представительный набор симметричных зондирований с трехкомпонентными установками. Тем не менее можно получить некоторую информацию о распределении интегральных эффективных упругих параметров поперечных волн вдоль профиля. Мы имеем достаточно плотную систему наблюдений для баз 80—160 км по продольным отраженным волнам и соответственно надежное определение эффективной скорости  $P$ -волн в этом интервале баз. Эффективные скорости  $P$ -волн, рассчитанные для осредненной изотропной модели земной коры данного региона [12, 13], в диапазоне 80—160 км отличаются от лучевых незначительно. Учитывая, что отличие эффективных и лучевых скоростей  $P$ -волн в моделях со слабой анизотропией также будет незначительным, можно использовать в решении эффективную скорость  $P$ -волн вместо лучевой. Тогда, используя эффективную скорость, полученную из поля времен  $t^2(x, l^2)$  волны  $P_{отр}^M$  в точках  $x$  и  $x + (l_2 - l_1)/2$ , из уравнений  $t_{P,m} = (4H_{эф,m}^2 + l_m^2)^{1/2} / V_{эф,m}$ ,  $m = 1, 2$ , находим  $H_{эф,m}$ . Принимая во внимание, что  $\theta_{эф,m} = f(H_{эф,m})$ , находим  $\theta_{эф,m}$ . Преобразовывая уравнения 1, 2 системы (5) при  $k = SV, SH$ ,  $m = 1, 2$  после подстановки в них значений лучевых скоростей  $SH$ - и  $SV$ -волн (из (4) для  $SH$ -волны и из (10) для  $SV$ -волны при грубом приближении  $\theta \approx i$ ) получим систему линейных уравнений вида

$$A_m x_1 + B_m x_2 + C_m x_3 = f_m, \quad m = 1, 2, 3, 4, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= t_{SV,2}^2 \cdot \sin^2 \theta_1 \cdot \cos^2 2\theta_1, & A_2 &= t_{SH,1}^2 \cdot \sin^2 \theta_1, \\ A_3 &= t_{SV,1}^2 \cdot \sin^2 \theta_2 \cdot \cos^2 2\theta_1, & A_4 &= t_{SH,2}^2 \cdot \sin^2 \theta_2, \\ B_1 &= t_{SV,1}^2 \cdot \sin^2 \theta_1 \cdot \sin^2 2\theta_1, & B_2 &= 0, \\ B_3 &= t_{SV,2}^2 \cdot \sin^2 \theta_2 \cdot \sin^2 2\theta_2, & B_4 &= 0, \\ C_1 &= 0, & C_2 &= -l_1^2 \cdot \sin^2 \theta_1, & C_3 &= 0, & C_4 &= -l_2^2 \cdot \sin^2 \theta_2, \\ f_1 &= l_1^2, & f_2 &= l_1^2 \cdot \cos^2 \theta_1, & f_3 &= l_2^2, & f_4 &= l_2^2 \cdot \cos^2 \theta_2, \\ x_1 &= V_{\perp S}^2, & x_2 &= V_{SV}^2 (\theta = 45^\circ), & x_3 &= 1/k_{SH}^2, & \theta_m &= \theta_{эф,m}. \end{aligned}$$

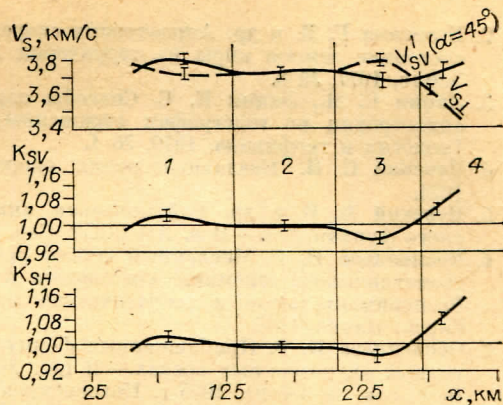
Решение системы (20) найдем, используя метод наименьших квадратов.

Исследование полученных решений для различного класса моделей, описанных выше, показывает, что ошибки в определении эффективных упругих параметров в среднем составляют 0—2% (максимальные — 3,5—4%) и главным образом зависят от коэффициентов  $k_{SV}$ ,  $k_P$  по  $SV$ - и  $P$ -волнам. Различие в глубинах в точках с базами  $x$  и  $x + (l_2 - l_1)/2$  на получаемые решения практически не влияет.

На рис. 2 показаны результаты интерпретации экспериментальных данных  $SV$ - и  $SH$ -волн по профилю II по приближенным формулам (20). Эффективная скорость  $P$ -волн по полю времен вдоль профиля практически не менялась и составляла при расчетах 6,5 км/с. Здесь же на рис. 2 показаны выделенные ранее путем качественного анализа участки профиля с различающимися кинематическими характеристиками  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн от границы М. Количественные оценки интегральных эффективных параметров земной коры ( $V_{\perp S}$ ,  $k_{SH}$ ,  $k_{SV}$ ,  $V_{SV} (\theta = 45^\circ)$ ) находятся в согласии с выводами этого анализа. Изотропный участок, где  $V_{SV} (\theta = 45^\circ) = V_{\perp S}$  и  $k_{SV} \approx k_{SH} \approx 1$ , находится вблизи от кимберлитового поля. Эффективная скорость  $SV_{отр}^M$ , определенная в месте пересечения центрального участка профилем I (1981 г.), составляла 3,73 км/с [10]. Участ-

Рис. 2. Распределение осредненных параметров анизотропии земной коры по профилю II в Западной Якутии.

Земная кора аппроксимируется поперечно-изотропной моделью с вертикальной осью симметрии. 1—4 — участки профиля II с различающимися кинематическими характеристиками  $P$ ,  $SV$  и  $SH$ -волн от границы М. Вертикальные отрезки показывают среднеквадратическую погрешность построения каждой кривой.



ки 1, 3 немного отличаются от центрального участка эффективными упругими параметрами  $k_{SH}$ ,  $k_{SV}$ ,  $V_{\perp s}$ . Более сильное отличие эффективных параметров наблюдается для северо-восточного участка профиля ( $k_{SV}$ ,  $k_{SH} \approx 1,08-1,12$ ).

Полученные данные отражают в грубых чертах изменения интегральных (относящихся к большому участку) эффективных параметров анизотропии в силу того, что получены по приближенным формулам, справедливым в модели однородной поперечно-изотропной среды. Реальная среда гораздо сложнее. При дальнейших исследованиях планируется провести уточнение полученных эффективных параметров по точным формулам для отдельных симметричных зондирований, расположенных на участках профиля с горизонтальным залеганием отражающей границы М. Кроме того, необходимо привлечение коровых отраженных волн на участках 1, 3, 4 для локализации слоев, которые бы объяснили наблюдаемую анизотропию по  $P$ - и  $SV$ -волнам.

### Выводы

При глубинных исследованиях в Западной Якутии по данным  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн установлен факт анизотропии земной коры.

Определение параметров анизотропии проводилось в рамках модели поперечно-изотропной среды с вертикальной осью симметрии. Построены алгоритмы решения обратной задачи для наблюдений по методике точечных дифференциальных зондирований. Они состоят в том, что по временам прихода отраженных  $P$ -,  $SV$ - и  $SH$ -волн в двух точках (или по временам вступлений  $SV$ - и  $SH$ -волн в двух точках с базами  $l_1$  и  $l_2$  и поля времен  $P$ -волны) определяются интегральные для всей толщи земной коры параметры анизотропии, а также мощность коры.

Проверка на тестовых примерах с коэффициентами анизотропии по  $P$ - и  $SV$ -волнам до 13%, а по  $SH$ -волнам до 20% показала, что при получении первых приближений ошибки в эффективных параметрах за счет неточного задания скоростей  $P$ - и  $SV$ -волн (вместо лучевых берутся приближенные формулы для нормальных скоростей) не превышают 3—4%. Средние ошибки составляют 0—2%. Используя метод минимизации, можно улучшить уже полученные приближения эффективных упругих параметров и в результате получить точные решения, справедливые в рамках выбранной модели.

На профиле II одним из приближенных способов обработаны экспериментальные данные  $P_{отр}^M$ ,  $SV_{отр}^M$  и  $SH_{отр}^M$ -волн. Показано изменение интегральных эффективных параметров анизотропии вдоль профиля.

Авторы выражают признательность С. В. Крылову и И. Р. Оболенцевой за консультации и полезные замечания по данной работе.