

Изучение скоростных характеристик земной коры западной части крымско-черноморского региона в рамках экологического мониторинга

В.С. Гобаренко, А.А. Демин, А.Н. Нестеров

Понимание современных геотектонических процессов в сложных по своему строению районах, таких как Крымско-Черноморский регион, невозможно без целостного представления о глубинном строении среды. Наблюдаемые на поверхности различия в строении крупных геологических структур во многом обусловлены процессами, происходящими в коре и мантии до глубин не менее десятков и сотен километров. Поэтому для решения актуальных проблем геодинамики и геотектоники важную роль играют качественные и количественные данные о характере распределения вертикальных и горизонтальных неоднородностей коры и верхней мантии.

В работе [1] западная часть Крымского полуострова и прилегающей части Черного моря представляет собой относительно низкоскоростной блок как по продольным, так и по поперечным объемным волнам, хорошо оконтуривающий Альминскую долину. Известно, что в этой части Крымско-Черноморской сейсмогенной зоны происходят достаточно сильные землетрясения ($M \geq 4.0$), последнее из которых произошло в 1972 г. ($\varphi=44.6^\circ$, $\lambda=32.7^\circ$, $h=15$ км). Поэтому представляется актуальным исследовать более детально строение коры данного региона для изучения процессов подготовки и развития очаговых зон. С точки зрения генерации землетрясений особого внимания заслуживают зоны высокоградиентного сочленения аномалий, а также структуры с высокоплотным ядром, которые считаются областями аккумуляции энергии, областями напряженного состояния – концентраторами напряжений.

Представляемые результаты по изучению строения коры Крымско-Черноморского региона получены по кинематическим и динамическим характеристикам объемных и поверхностных волн землетрясений. В методическом отношении для изучения горизонтальных неоднородностей строения по объемным волнам использовалась методика сейсмотомографии [2], которая позволяет получать сглаженные распределения скоростей по данным о временах пробега продольных и поперечных волн. Изучение поверхностных волн проводилось по методике спектрально-поляризационного анализа (СПАН)[3], который дает возможность получать параметры поляризации исследуемых сейсмических волн в заданных диапазонах частот. Рассмотрим отдельно результаты проведенных исследований по данным поверхностных и объемных волн.

Поверхностные волны. В работе использовались трехкомпонентные записи сейсмических станций Симферополь (SIM), Косов (KOS), Львов (LVV), Ужгород (UZH), Кишинев (KIS) и некоторых станций Европы, оснащенных длиннопериодной аппаратурой. Расположение сети станций и эпицентров землетрясений, которое приведено на рис 1а, позволяет исследовать Карпато-Балканский регион и западную часть бассейна Черного моря, что и представляет для нас интерес. По методике спектрально-поляризационного анализа для каждой записи землетрясений проводилась частотная фильтрация в диапазоне периодов 7.5-35с с помощью набора узкополосных нерекурсивных фильтров, синтезируемых методом "окна"[4]. Затем к каждой отфильтрованной записи применялась процедура поляризационного анализа, по результатам которого проводилась идентификация волн, и вычислялись поляризационные параметры поверхностных волн Лява и Рэлея.

В предположении, что волны Лява поляризованы в направлении, перпендикулярном направлению распространения, а волны Рэлея – в вертикальной плоскости, ориентированной в направлении распространения, вычислялись азимуты подхода волн Лява и Рэлея к станции регистрации. В дальнейшем под нормальным азимутом подхода волны принимается теоретическое направление от станции на эпицентр по дуге большого круга, а азимутальная аномалия определяется как отклонение вычисленного азимута подхода волны от теоретического направления.

Расчеты поляризационных характеристик показали наличие значительных азимутальных аномалий регистрируемых поверхностных волн в регионе. Выявлены также эффекты фокусировки волн в узких азимутальных створах и отсутствие регистрируемых волн в некоторых азимутах. На рис.1б,в приведены азимуты подхода волн Лява и Рэлея к станциям регистрации на периоде $T=12.5$ с. Эти картины наглядно демонстрируют эффекты "непрямого" распространения поверхностных волн, вызванные горизонтальными неоднородностями коры на трассе распространения волны. Конечно, искривление луча происходит не по всей трассе одинаковым

образом, так что форма лучей на достаточном удалении от станций может совершенно не соответствовать действительной. Но вблизи станций лучевая картина будет, по-видимому, достаточно хорошо отражать реальную, так что в области, прилегающей к станциям, можно делать выводы о распределении зон пониженной и повышенной скорости. На основании выявленных эффектов вполне правомерно утверждение о наличии низкоскоростных зон в тех областях, где поверхностные волны не регистрируются и соседних, более высокоскоростных областей с нулевыми азимутальными аномалиями, в которых наблюдается фокусировка волн.

Наибольшие по величине азимутальные аномалии наблюдаются на станции Симферополь. Отклонения азимутов подхода волн Лява от эпицентров юго-западного направления составляют величины порядка 60° и связаны с огибанием трасс западной части Черного моря. Большие значения азимутальных аномалий на станции Симферополь получены и для периодов поверхностных волн $T=20-30$ с. Эффективная глубина проникновения поверхностных волн для таких периодов составляет 50-60км, что означает, что низкоскоростная аномалия захватывает и верхи мантии.

Объемные волны. Область исследования заключена в пределах: $\varphi=43.7-45.5^\circ$, $\lambda=32.2-34.0^\circ$. Расположение сети сейсмических станций и землетрясений представлено на рис. 2. В качестве исходных данных для изучения строения коры данного региона использованы времена пробега прямых P и S волн, зарегистрированные Крымской сетью сейсмических станций («Донузлав»–ДНЗ, «Симферополь»–СМФ, «Севастополь»–СВС, «Ялта»–ЯЛТ) от землетрясений ближней эпицентральной зоны ($10 \leq \Delta \leq 100$ км) с глубинами очагов от 0 до 50 км. Данные о параметрах землетрясений и временах вступлений волн опубликованы в сейсмологических бюллетенях [5,6]. В обработку были включены данные по 95 землетрясениям с $K>6.5$ с общим числом трасс равным 200 по P волнам и 222 по S волнам. Для расчетов невязок времен пробега была использована скоростная модель, приведенная в таблице. В качестве исходной информации для подбора параметров скоростной модели служили данные работ [1,7].

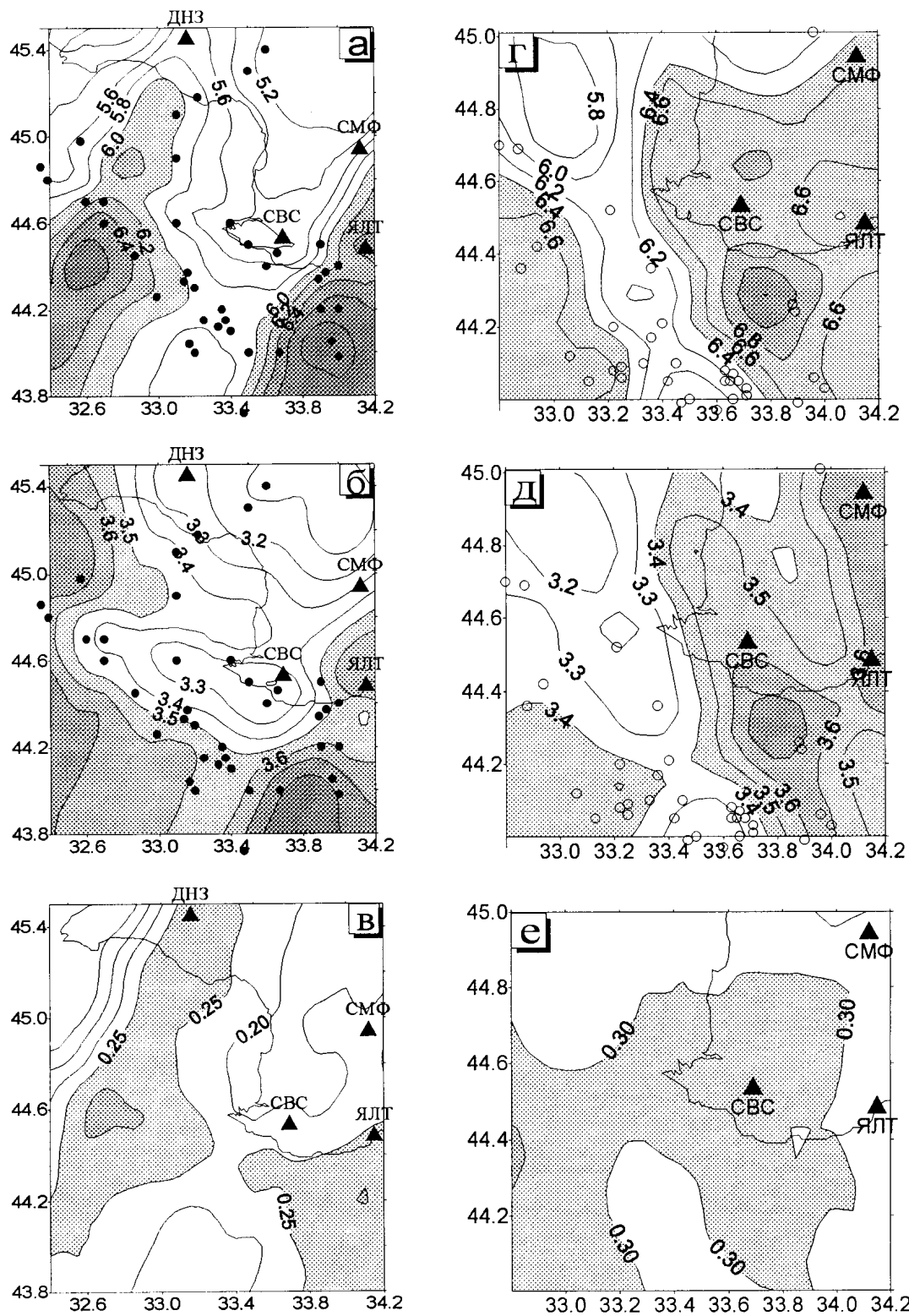


Рис.1. Схематическое изображение трасс поверхностных волн, используемых в работе.

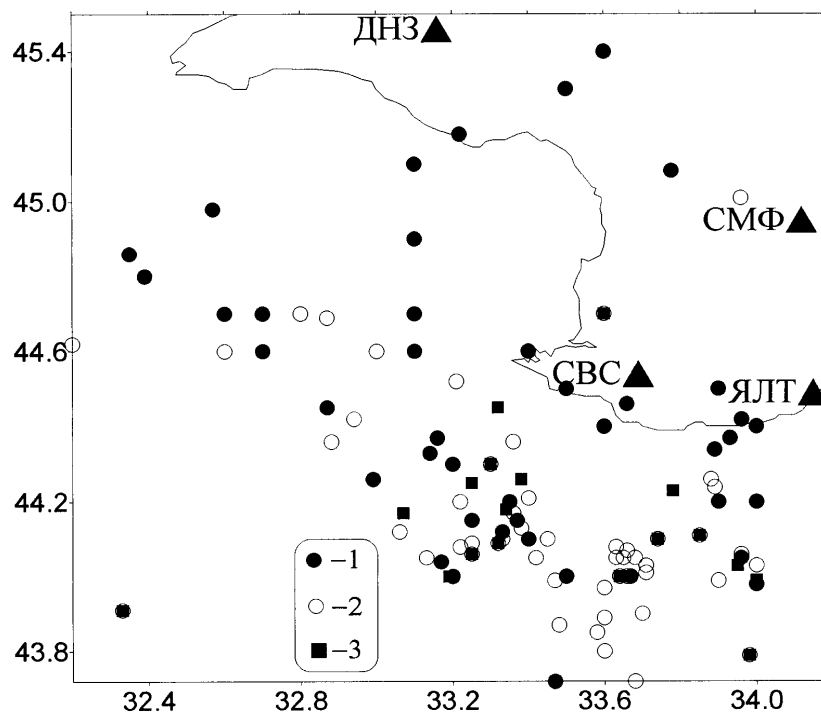


Рис.2. Схематическая карта эпицентров землетрясений, данные по которым использованы в работе. 1 – землетрясения с глубиной очага $h=0-20$ км; 2 – $h=20-35$ км; 3 – $h=35-50$ км.

зарегистрированные Крымской сетью сейсмических станций («Донузлав»–ДНЗ, «Симферополь»–СМФ, «Севастополь»–СВС, «Ялта»–ЯЛТ) от землетрясений ближней эпицентральной зоны ($10 \leq \Delta \leq 100$ км) с глубинами очагов от 0 до 50 км. Данные о параметрах землетрясений и временах вступлений волн опубликованы в сейсмологических бюллетенях [5,6]. В обработку были включены данные по 95 землетрясениям с $K>6.5$ с общим числом трасс равным 200 по P волнам и 222 по S волнам. Для расчетов невязок времен пробега была использована скоростная модель, приведенная в таблице. В качестве исходной информации для подбора параметров скоростной модели служили данные работ [1,7].

Таблица1. Скоростные разрезы для P и S волн

H , км	V_P , км/с	V_S , км/с
0	5.4	3.2
20	5.8	3.4
35	6.6	3.8
35	7.8	4.57
70	7.9	4.60

Было проведено исследование характера поведения невязок времен пробега P и S волн и построены графики распределения δt от азимута и от глубины землетрясений на каждой из станций. На рис.3 приведены графики $\delta t(Az)$ и $\delta t(h)$ на сейсмических станциях «Севастополь» и «Ялта». Анализ полученных распределений невязок времен пробега позволяет указать следующие особенности:

1. Область изменения δt_p и δt_s находится в пределах $-4.0 \div 4.0$ с, данные с $|\delta t| > 4.0$ с для расчетов не принимались.

2. Для землетрясений с глубиной очага до 20км положительные невязки наблюдаются на с.ст. ЯЛТ в азимутальном створе $240-290^\circ$, а на с.ст. СВС в интервале азимутов $190-260^\circ$. Это означает, что среда в западном, юго-западном секторе исследуемой зоны относительно низкоскоростная. Отрицательные невязки на указанных глубинах наблюдаются в основном в Az

$\Delta t = 190\text{--}240^\circ$ на с.ст. ЯЛТ и $Az = 90\text{--}170^\circ$ на с.ст. СВС. Таким образом, юго-восточный сектор исследуемой области характеризуется относительно высокими скоростями по P и S волнам.

3. Для землетрясений с глубиной очага в интервале $h=20\text{--}35\text{ км}$ невязки времен пробега незначительно понижены (до -2.0 с) в интервале азимутов $200\text{--}240^\circ$ и повышены для азимутов больших 250° на с.ст. ЯЛТ, на с.ст. СВС Δt отрицательны для $Az=160\text{--}210^\circ$.

4. Для P и S волн наблюдается смещение невязок в сторону увеличения, начиная с глубины $h=35\text{ км}$, причем это явление отмечается на всех станциях. Это свидетельствует о том, что, либо выбранный скоростной разрез на указанных глубинах не соответствует исходным данным, либо необходимо переопределить параметры очагов землетрясений и в первую очередь глубину. Этот вопрос в данной работе не рассматривается, а данные, соответствующие глубинам $h>35\text{ км}$ в расчетах не участвуют.

Таким образом, характер распределения невязок времен пробега на выбранных сейсмических станциях иллюстрирует существенное отличие скоростного строения в разных частях исследуемой области.

Результаты расчетов поля скоростей P и S волн. Нахождение трехмерного распределения скоростей объемных волн выполнено с использованием алгоритма и программы решения сейсмотомаграфической задачи методом Бэйкуса-Гильберта [2]. Исходя из распределения эпицентров землетрясений (рис.2), расчеты скоростных параметров для всего

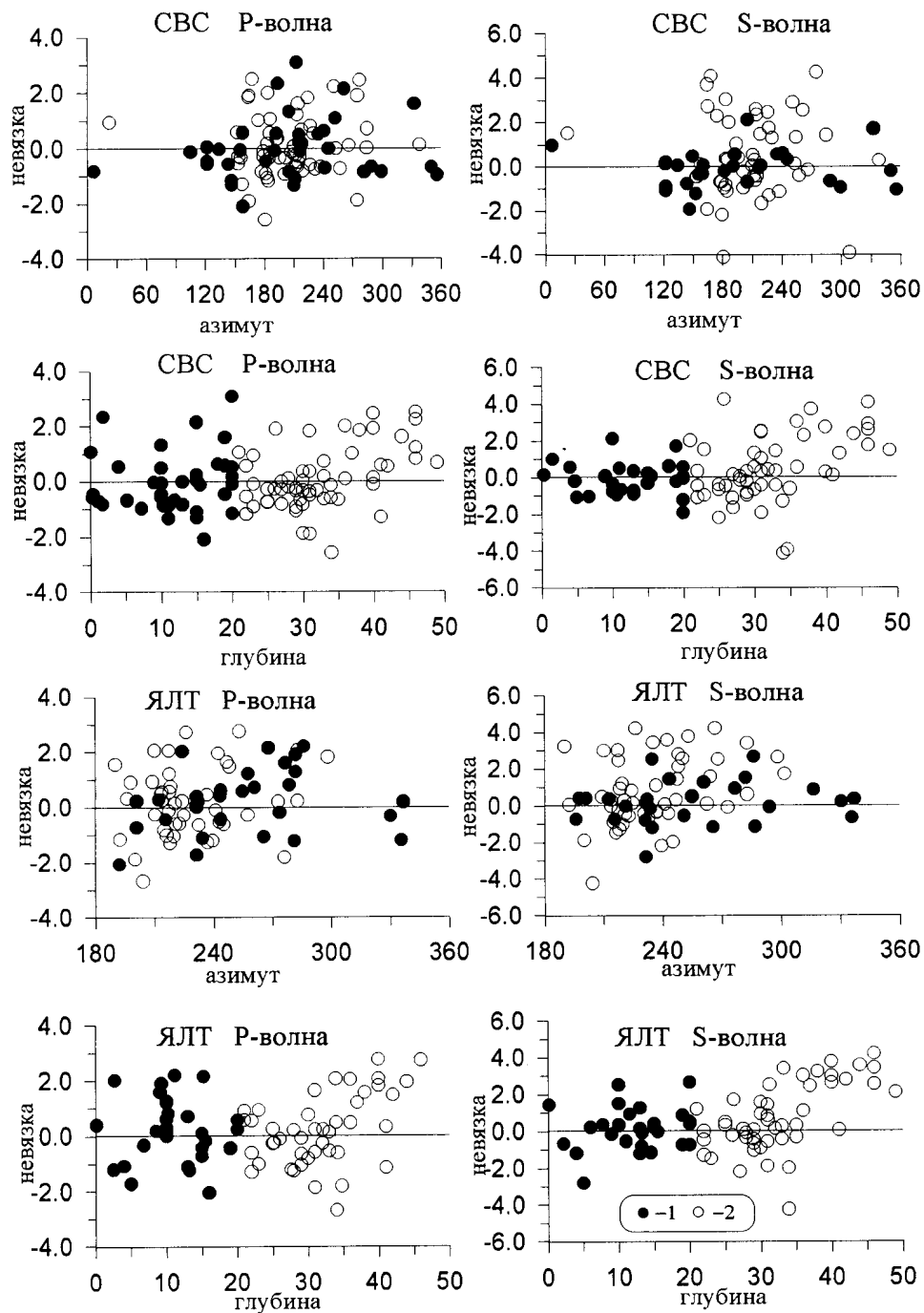


Рис.3. Зависимости невязок времен пробега P и S волн от азимута и глубины на сейсмических станциях “Севастополь”(СВС), “Ялта”(ЯЛТ). 1–интервал глубин землетрясений $h=0-20$ км; 2– $h=20-50$ км.

указанного региона были выполнены для глубин меньших 20км. На рис.4 а-в показаны распределения скоростей P и S волн и коэффициента Пуассона на глубине $h=15$ км. Севастопольская зона вырисовывается как низкоскоростная и по P и по S скоростям. Наименьшие скорости определяются на Тарханкутском полуострове в районе с.ст ДНЗ. Это хорошо согласуется с данными термики [8], т.к. Тарханкутский полуостров – это зона аномально высоких

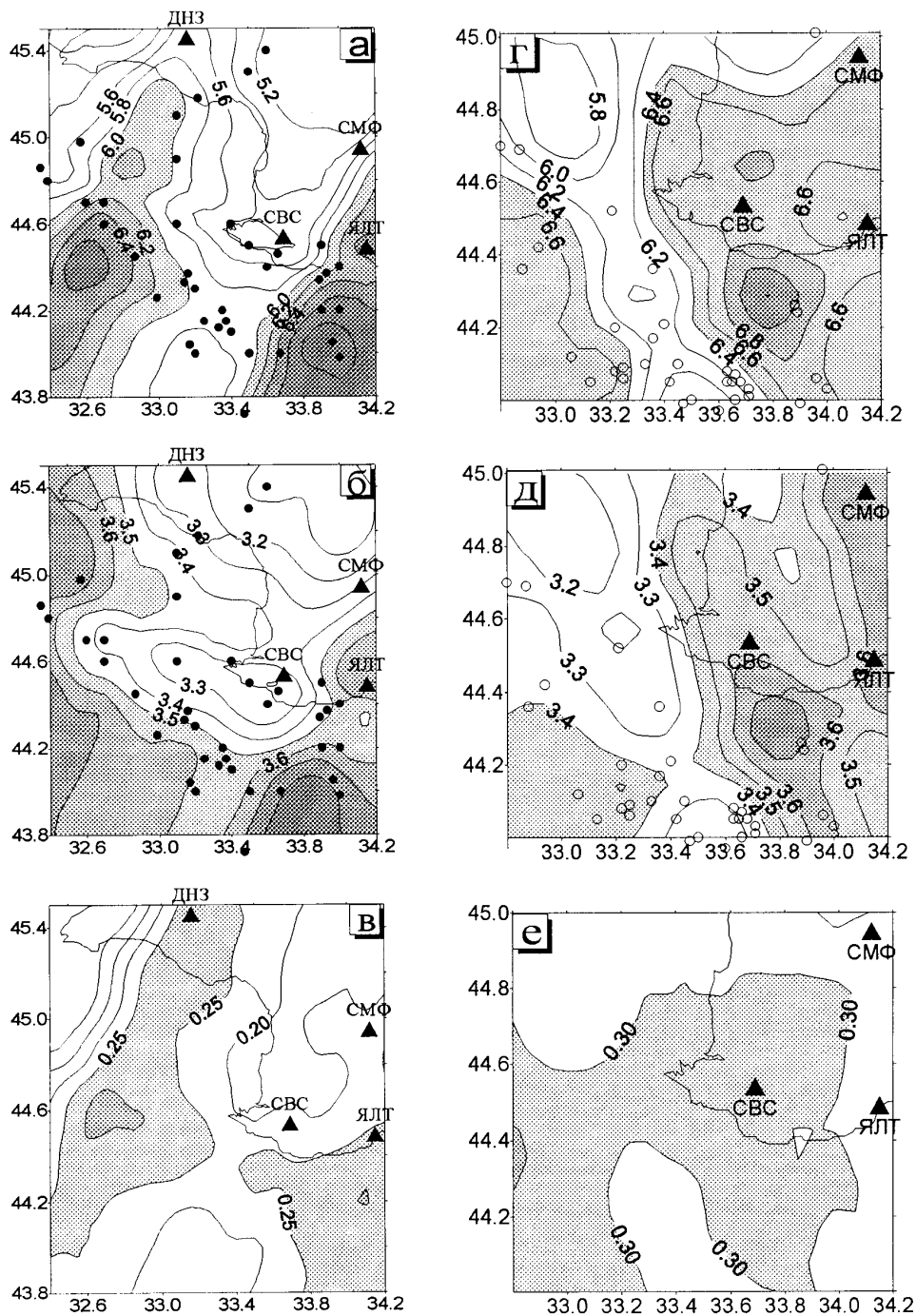


Рис. 4. Распределение скоростей V_p (a,c), V_s (б,d) и коэффициента Пуассона σ (в,e) на глубине $h=15$ км и $h=25$ км соответственно. Темные кружки- эпицентры землетрясений с глубиной очага $h=0-20$ км, светлые кружки – с $h=20-35$ км.

В юго-восточной и юго-западной части исследуемого региона наблюдаются повышенные скорости. В первой из них высокоскоростная аномалия определяется достаточно уверенно и хорошо оконтуривается и по другой выборке данных [9], в то время как по поводу другой высокоскоростной зоны можно сказать только, что мы наблюдаем тенденцию к увеличению скоростей, т.к. недостаточно исходных данных для ее уверенного определения. Более уверенно определяется высокоскоростной выступ, тянущийся к с.ст. ДНЗ в меридиональном направлении, к тому же повышение скоростей в этой зоне было определено по другой методике в [1].

Коэффициент Пуассона принимает значения $\sigma = 0.2 - 0.25$ и не испытывает существенных колебаний в исследуемой области.

На рис.3а,б нанесены эпицентры землетрясений с глубиной очага в интервале $h=0-20$ км. В основном эпицентры землетрясений находятся в области перехода от низкоскоростной зоны к высокоскоростным, что особенно хорошо видно на картине распределения скоростей поперечных волн.

Поскольку в южной части исследуемой области происходят землетрясения с глубинами очагов в нижней коре, имеется возможность рассчитать распределение скоростей для этой части на глубинах больших 15 км. В интервале $\varphi=44.0-45.0^\circ$, $\lambda=32.8-34.0^\circ$ получены распределения скоростей для глубин $h=20-30$ км. Для примера на рис.3г-е приведено распределение скоростей P и S волн и коэффициента Пуассона на глубине $h=25$ км. Можно отметить следующие особенности полученных распределений:

1. Область пониженных скоростей смещается к северо-западу от с.ст. СВС и вытянута в северо-западном направлении, причем значения скоростей поперечных волн еще более понижены, чем на глубине 15 км.

2. На месте высокоскоростного блока по продольным волнам отмечается низкоскоростная область, следовательно, высокоскоростной блок в северо-западной части расположен только в верхних этажах коры и с глубиной подстилается более низкоскоростными породами, т.е. в этой зоне выявляется волновод на глубинах $h=20-30$ км. Коэффициент Пуассона на указанной глубине остается постоянным.

3. На рис.3г,д землетрясения в основном заполняют область высокоградиентного перехода скоростей от одного блока к другому, землетрясений в низкоскоростном блоке практически нет.

Заключение. Таким образом, интерпретация сейсмологического материала с применением методов томографии дает возможность экологически чистым и экономически выгодным путем получать региональные модели среды, в том числе очаговых зон, выявлять закономерности, связывающие сейсмичность с особенностями строения среды. В западной части Крымской сейсмогенной зоны выявлены две области высоких скоростей, потенциально способные накапливать упругие напряжения. Одна из них расположена на северо-западе от Севастополя и находится в верхней коре. Землетрясения в этой части сейсмогенной зоны происходят на небольших глубинах и приурочены в основном к краевым частям высокоскоростного тела. Вторая область расположена на юго-западе исследуемой зоны и выявляется на всех глубинах в коре, но поскольку разрешение в ней незначительное из-за малого числа трасс, скоростные параметры в ней определены ненадежно. Параметры высокоскоростной зоны, расположенной к югу между Севастополем и Ялтой получены более надежно на глубинах $h=15-30$ км в [9].

Литература

1. Антонова Л.М., Гобаренко В.С. Неоднородности структуры коры южной части Крымского полуострова и прилегающих районов Черного моря по данным времен пробега P и S волн // Физика Земли. – 1997. – № 8. – С.57–64.
2. Гобаренко В.С., Яновская Т.Б. Исследование горизонтальных неоднородностей строения верхней мантии в Саяно-Алтайской зоне // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1983. – № 4. – С.15–23.
3. Нестеров А.Н. Спектрально-поляризационный анализ сейсмических сигналов // Геофиз. журн. 1985. Т.7. №1. – С. 63-72
4. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов // М.: Мир, 1978. 428с.
5. Сейсмологический бюллетень западной территориальной зоны ЕССН (Крым-Карпаты). – Киев: Наук. думка, 1970–1990.
6. Сейсмологический бюллетень Украины. – Симферополь. – 1991–1999.
7. Строение западной части Черноморской впадины. – М.: Наука.–1972. –243 с.
8. Кутас Р.И., Цвященко В.А. Геотермический режим сейсмических и асейсмических зон Крымского региона // Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон Украины. –Киев: Наук. думка, 1993. –С. 18–30.
9. Гобаренко В.С. Пространственно-временные особенности поля скоростей в центральной части Крымской сейсмогенной зоны. – Сейсмологический бюллетень Украины. – Симферополь. – 1999.