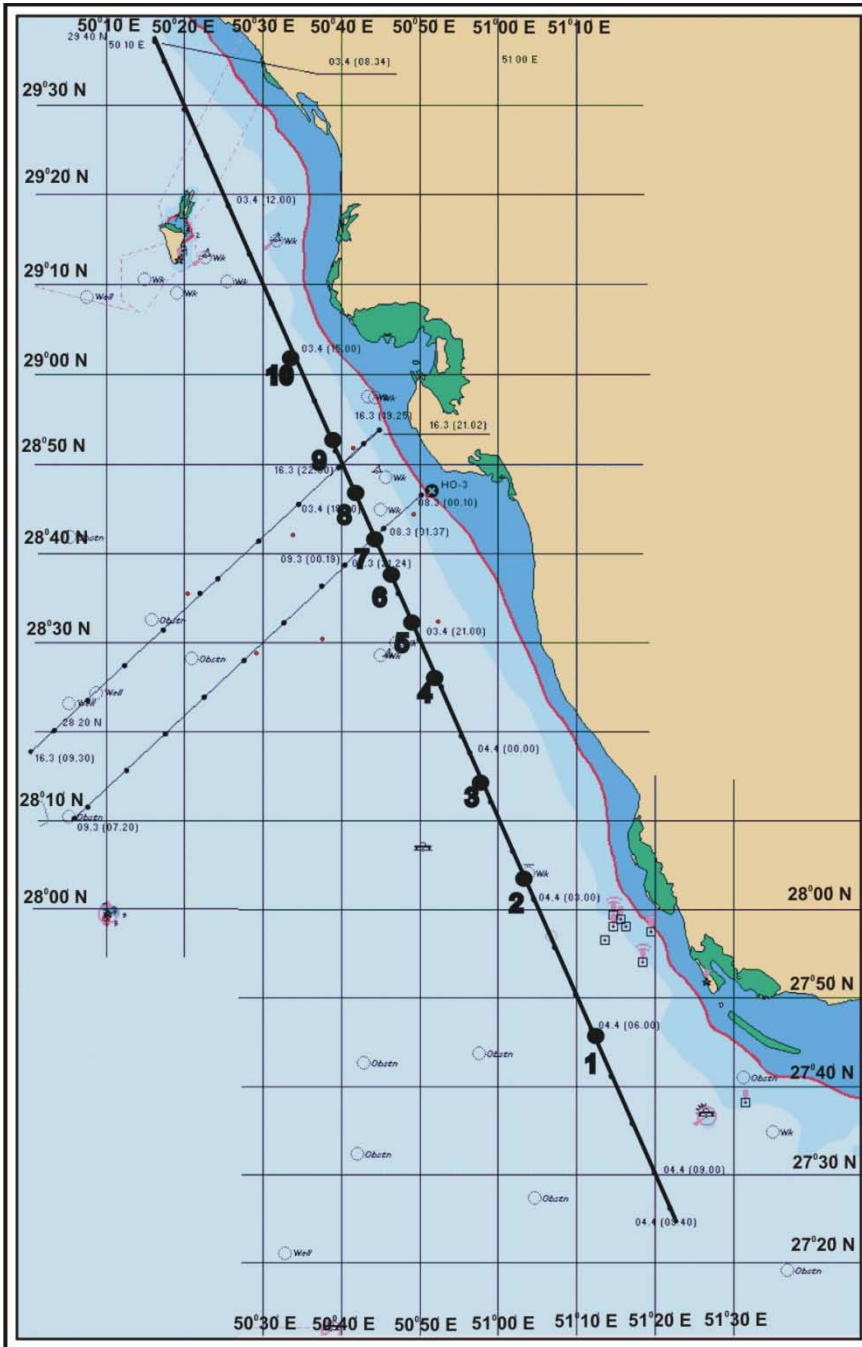


РЕЗУЛЬТАТЫ ДОННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В АКВАТОРИИ ПЕРСИДСКОГО ЗАЛИВА

Ковачев С.А., Крылов А.А., Егоров А.В., Ганжа О.Ю.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-13-01, kovachev@ocean.ru*

Проведение детальных сейсмических и сейсмологических исследований акватории Персидского залива позволило решить три основные задачи: получить данные для построения скоростной модели земной коры района методом ГСЗ, необходимой для локализации очагов местных землетрясений, изучить структуру и физические свойства осадочной толщи под дном залива для обнаружения разломных зон и дислокаций, получить информацию о локальных слабых землетрясениях района. Эти данные были необходимы для выполнения работ по оценке сейсмической опасности для атомной электростанции Бушер в Иране.



Глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ) методом преломленных волн проводилось по трем основным (региональным) и трем дополнительным (прибрежным) профилям. Использовались пневмоизлучатели с большим объемом рабочей камеры и автономные донные сейсмографы (ДС). Основные морские профили дополняли региональные профили на суше, выполненные другими методами. Несмотря на различие в методах и аппаратуре, морские и сухопутные данные оказались хорошо согласованными. Таким образом, была получена генеральная структура земной коры и осадочной толщи как Персидского залива, так и места строительства БАС.

Изучение локальной сейсмичности с помощью высокочувствительных автономных донных сейсмологических станций было необходимо выполнить для определения степени активности неотектонических разломов на дне Персидского залива. Суммарная продолжительность этих наблюдений составила 23 дня, причем использовалось от 6 до 4 донных сейсмических станций. Всего было локализовано 69 очагов землетрясений, причем лишь небольшую их часть (10-15) можно отнести к локальным, происшедшим в непосредственной близости от Бушерской АЭС.

Параметры донных сейсмографов:

3 сейсмических датчика (один вертикальный и два горизонтальных);

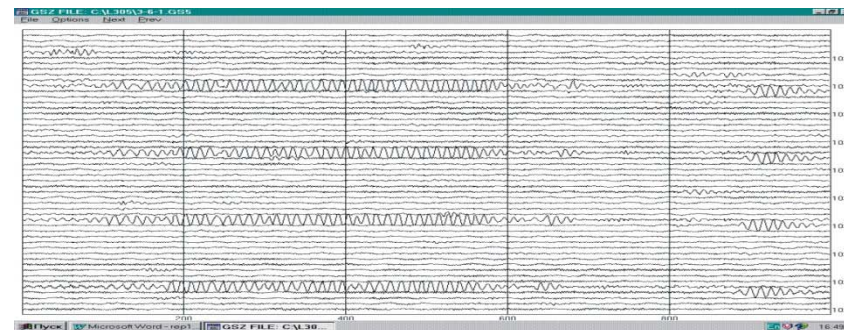
Гидрофон;

Диапазон регистрируемых частот 3-30 Гц;

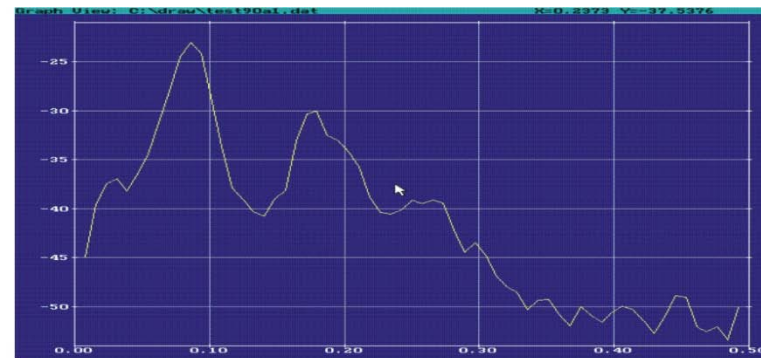
Динамический диапазон – 76 дБ;

Точность синхронизации часов – не хуже 0.05 сек.

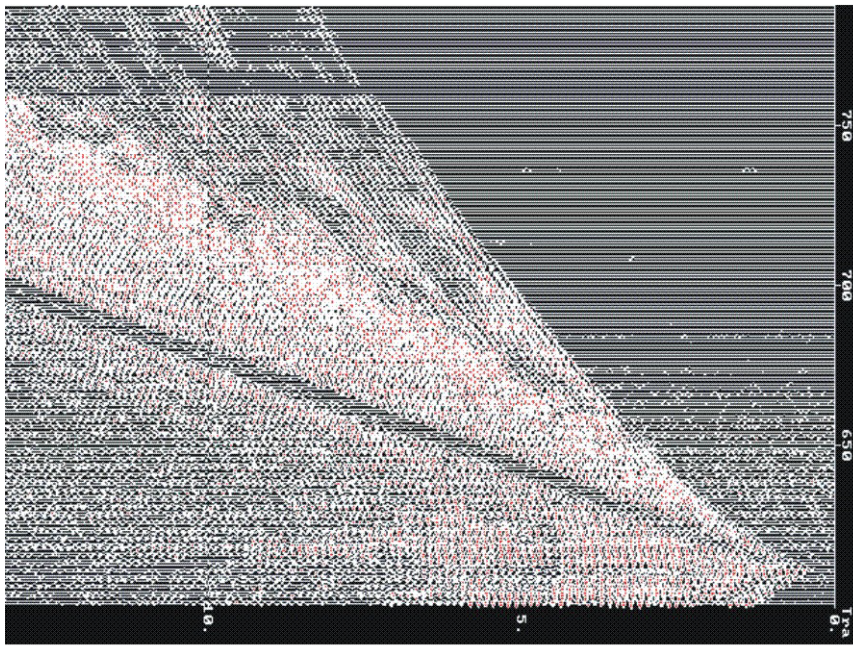
Глубинное сейсмическое зондирование выполнялось с помощью тех же донных сейсмографов. Использовалось 10 ДС и два пневмоисточника ПИ-5 с объемом камер 30 литров и рабочим давлением 150 атмосфер. Прострелка производилась на профилях длиной 100-300 км с интервалом между выстрелами 2 минуты.



Сейсмограмма сигналов от пневмоисточника, полученная с помощью программы GSZPROC

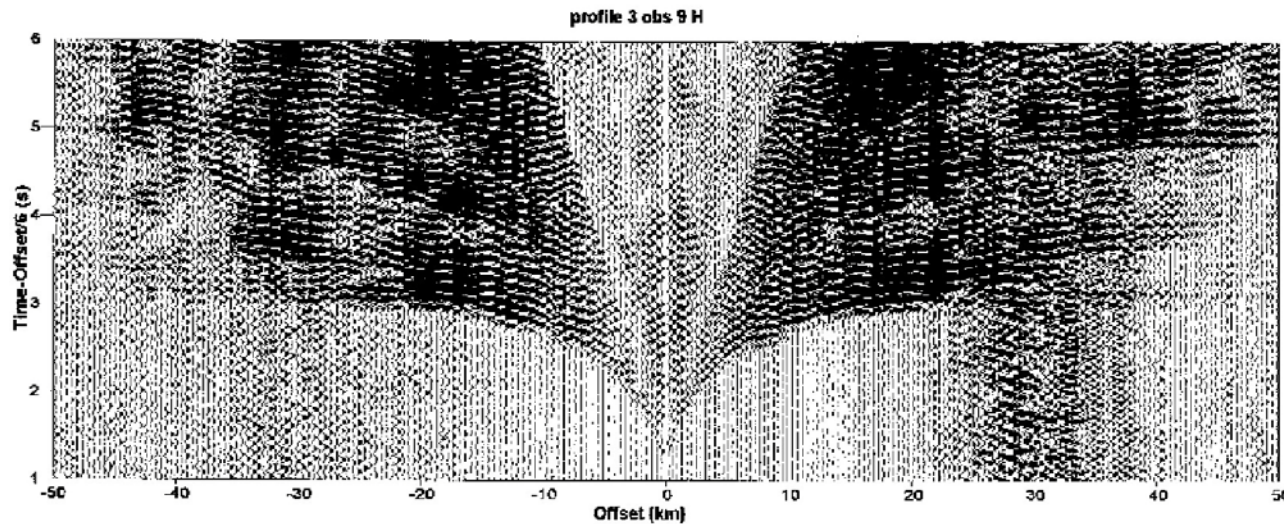


Спектр сигнала пневмоисточника ПИ-5, рассчитанный с помощью программы SPEC и визуализированный с помощью программы DRAW. Ось Y - энергетическая спектральная плотность (dB), ось X - частота в единицах Гц10.

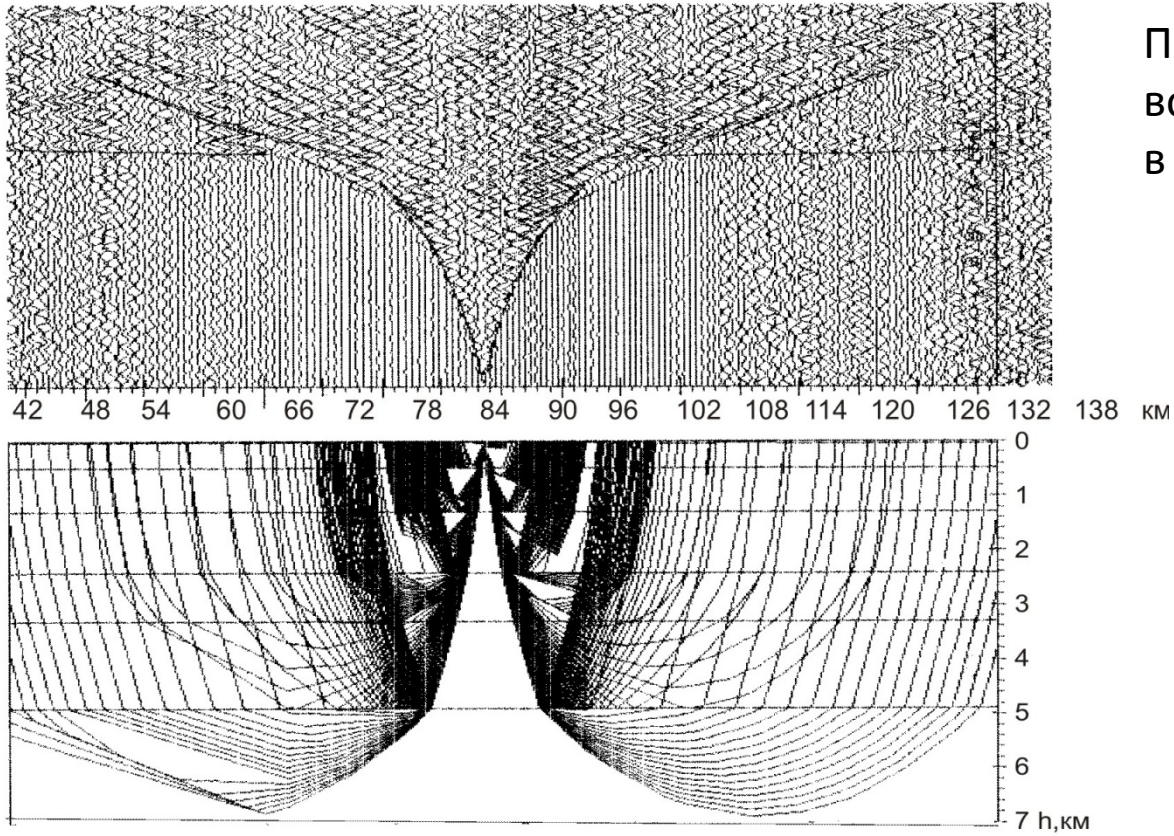


Фрагмент сводной сейсмограммы прострелки третьего профиля для гидрофона в точке 7

Дальность прослеживания сейсмических волн на 3-м профиле по сравнению с 1-м и 2-м профилями несколько увеличилась. В сравнении с записями, полученными на 1-ом и 2-ом профилях записи ДС на 3-ем профиле имеют ряд особенностей. На удалениях 20-30 км от ДС происходит резкое ослабление прослеживаемых волн. При этом наблюдается некоторая корреляция уменьшения дальности прослеживания волн от 30 до 20 км с удалением на профиле к юго-востоку.



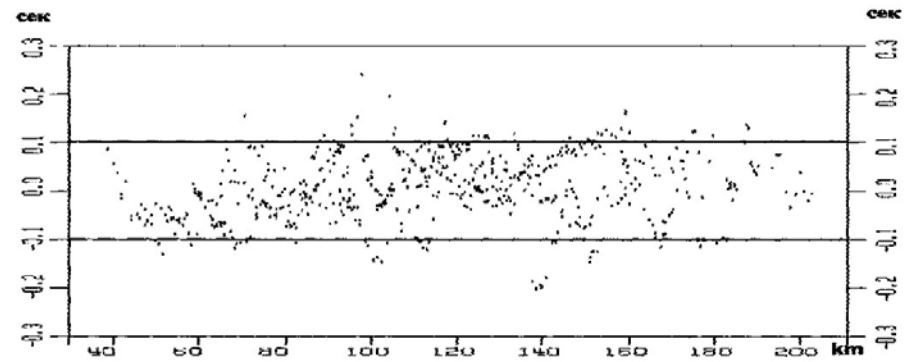
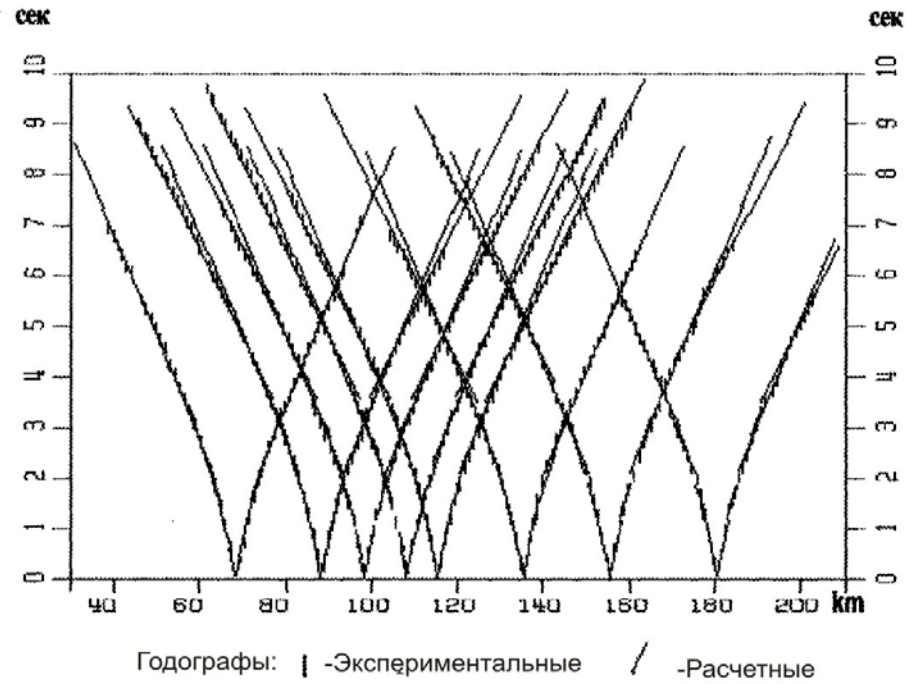
Это, по-видимому, связано с тем, что степень нарушений в осадочной толще под дном Персидского залива возрастает с северо-запада на юго-восток, увеличивая поглощение сейсмических волн.



Пример моделирования
волновой картины на профиле 3
в точке 7.

Рис. 2.28 Пример решения 2D прямой задачи методом подбора (профиль 3, ДС8).

ПРОФИЛЬ 3



Разность между экспериментальными и расчетными годографами

Рис. 2.29 Наблюдаемые и расчетные годографы для профиля 3.
Среднеквадратичные невязки времен (RMS).

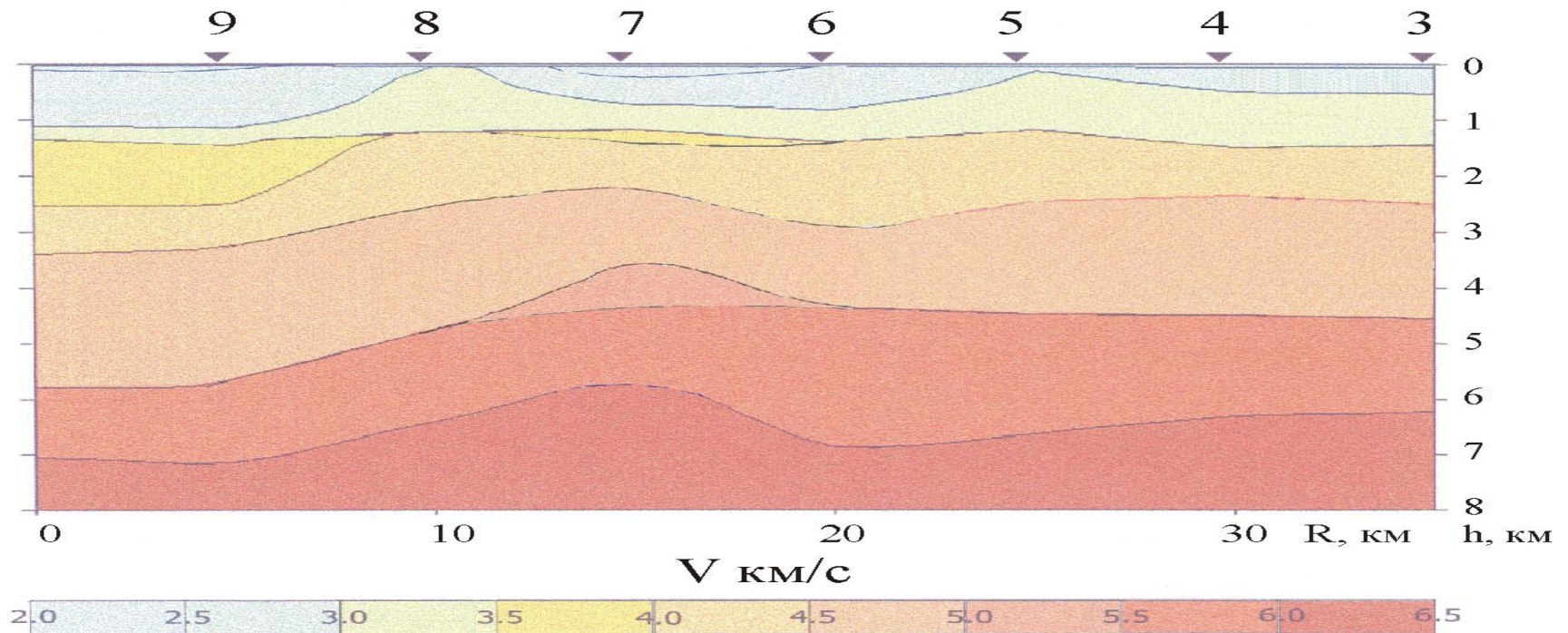
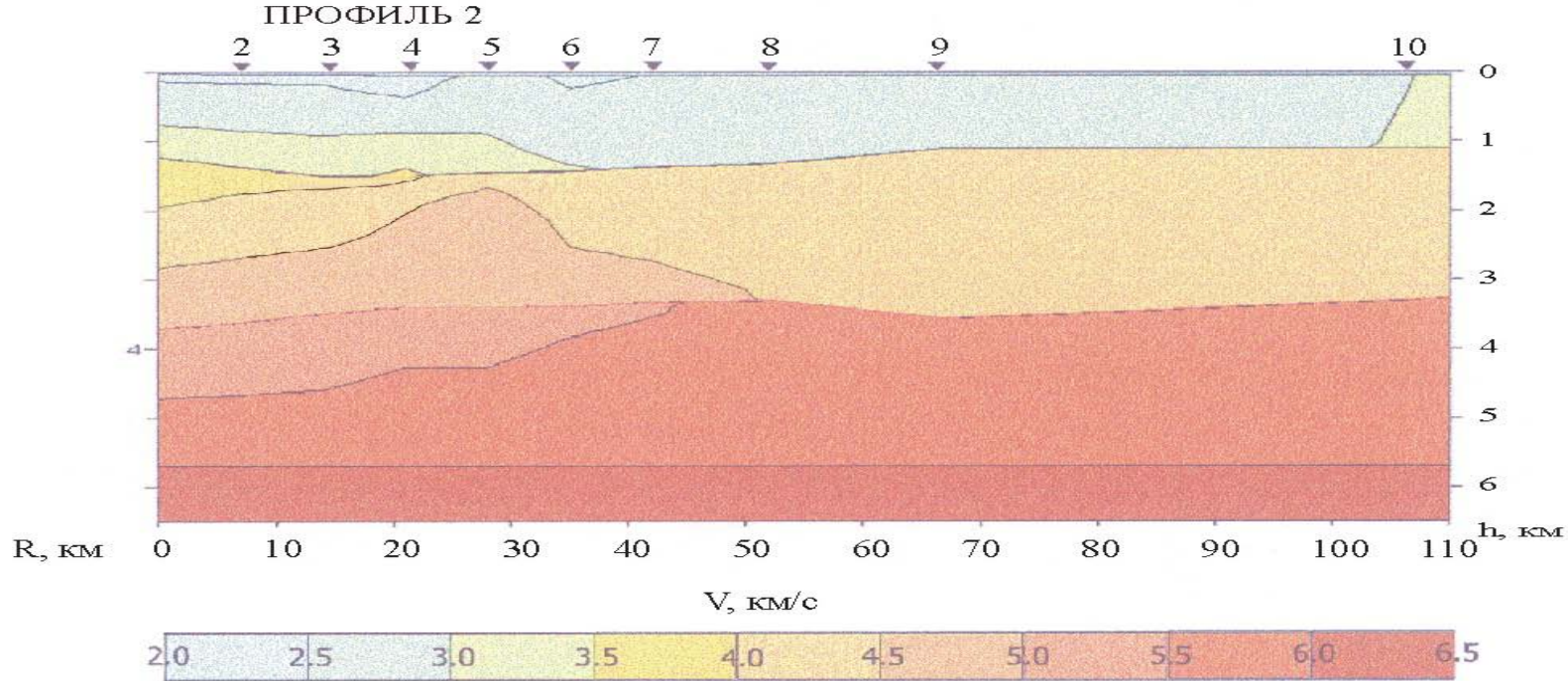


Рис. 2.31 Уточненный скоростной разрез вдоль профиля 1.

Двумерный (2-D) скоростной разрез показывает подъем изолиний скоростей в местах установки ДС5 и ДС6 в 20-30 км от начала профиля. Амплитуды подъема отдельных изолиний (например, " $V=3,5$ км/с") составляют около 0.7 км. Изолиния " $V=6.0$ км/с" проходит на глубине 5-5.6 км. Наблюдаемая волнообразная картина изолиний скоростей с периодом 15 км может свидетельствовать о наличии слабовыраженных складчатых структур в осадочной толще на 1-ом профиле.

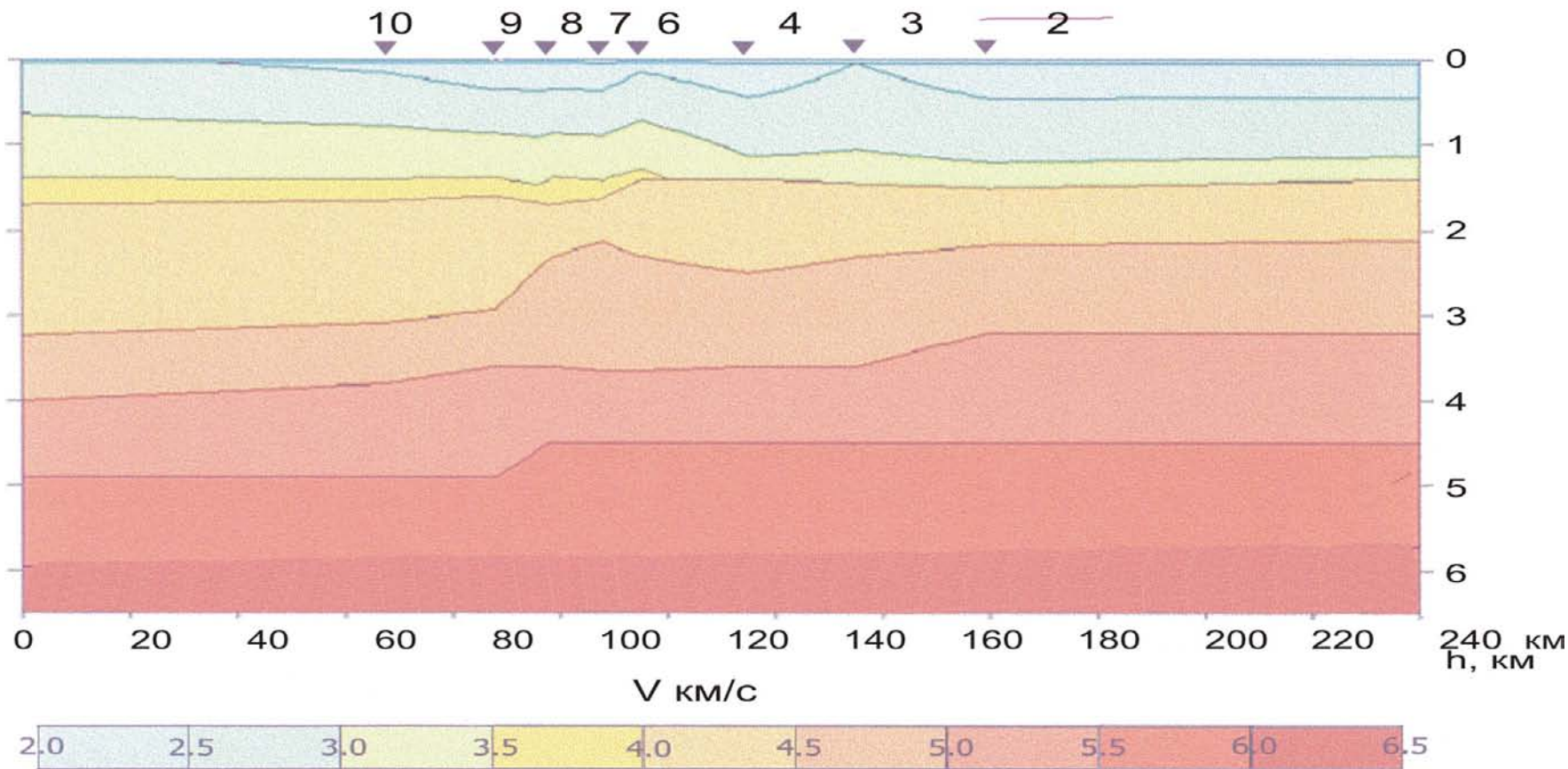
На скоростном разрезе показаны две границы, определенные методом t_0 и полей времен. Граница с граничной скоростью $V_{\text{гран}}=4,6-4,8$ км/с расположена на глубине около 2 км и разделяет два слоя осадков с пластовыми скоростями $V_{\text{пл}}=2,9$ км/с и $V_{\text{пл}}=4,0$ км/с. Вторая граница ($V_{\text{гр}}=5,7-6,0$ км/с) обнаружена на глубине 4,4 -4,7 км и имеет слабый наклон в сторону берега.



Двумерный скоростной разрез, полученный решением 2-D обратной кинематической задачи (метод однородных функций), построен до глубины 6 км. Как видно из рисунка, неоднородности в поведении изолиний наиболее выражены в районах установки ДС5 - ДС7. Здесь наблюдается подъем изолиний скоростей "4,0 км/с" "4,5 км/с" и "5,0 км/с" на 0,5-1,0 км. В верхней части разреза изолиния скорости "3,0 км/с" имеет волнистую форму с периодом 15-20 км.

С помощью методов " t_0 " и полей времен на разрезе вдоль профиля 2 выделена граница с граничной скоростью $V_{гр} = 5,7 - 5,8 \text{ км/с}$. Выше этой границы средняя скорость равна 4,0 км/с.

На предварительном разрезе вдоль профиля 2, построенного решением одномерной обратной кинематической задачи, подъем изолинии скорости "6,5 км/с" наблюдается в районе установки ДС5.



Дальность прослеживания сейсмических волн по сравнению с 1-м и 2-м профилями здесь несколько увеличилась. В сравнении с записями, полученными на 1-ом и 2-ом профилях записи ДС на 3-ем профиле имеют ряд особенностей. На удалениях 20-30 км от ДС происходит резкое ослабление прослеживаемых волн. При этом наблюдается некоторая корреляция уменьшения дальности прослеживания волн от 30 до 20 км с удалением на профиле к юго-востоку.

Это, по-видимому, связано с тем, что степень нарушений в осадочной толще под дном Персидского залива возрастает с северо-запада на юго-восток, увеличивая поглощение сейсмических волн.

Сопоставление скоростных разрезов по всем трем профилям показывает, что наиболее сложное строение имеют места пересечения 1-го и 2-го профилей с профилем 3. На 3-ем профиле эта зона со сложным строением расположена на интервале расстояний 90-180 км. Профиль 2 пересекает эту зону на 96 км, профиль 1 - на 110 км. Здесь наблюдается корреляция куполообразных структур в точках 6,7,8- профиля 1, 3,4,5- профиля 2 и 6,7,8- профиля 3. Обнаруженная на профилях 1,2,3 структура, возможно, является брахи антиклиналью, имеющей изометричную куполообразную форму, что соответствует складчатости платформенного типа в областях соляно-купольной тектоники. Типичные размеры этой структуры составляют 10×20 км и подобны размерам Бушерской антиклинали.

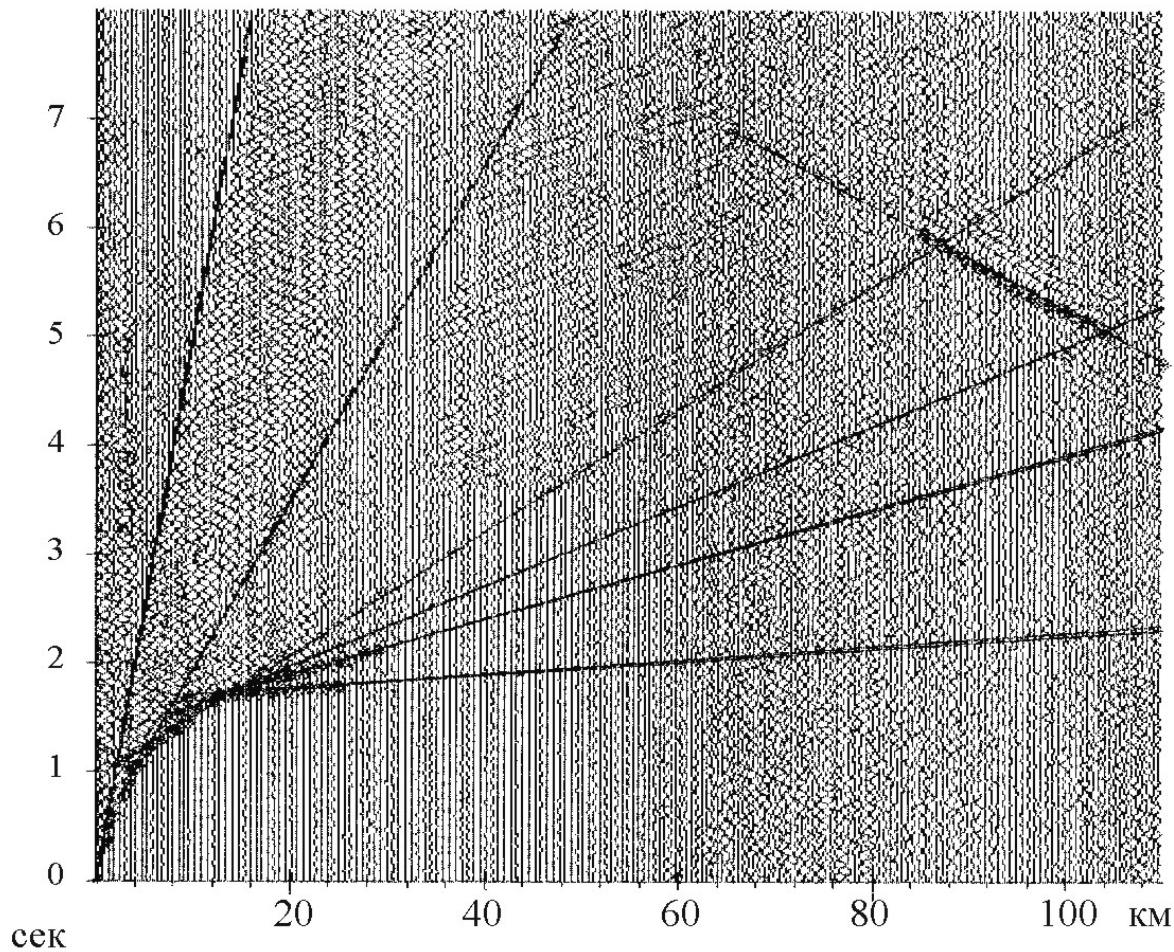


Рис.2.38 Обратное моделирование волны, закритически отраженной от границы Моховичича, а также других волн.

Здесь приведена сводная сейсмограмма, построенная по записям ДС-9 на профиле 3 в редукции скорости $V=8$ км/с. На сейсмограмме на расстояниях 85-105 км выделяется закритически отраженная волна от поверхности Мохо. Прямое и обратное моделирование дают значение глубины поверхности Мохо 37-41 км с наклоном к началу профиля 3 (северо-запад). Положение границы Мохо показано на следующем слайде. При этом в моделировании методом подбора средняя скорость до границы была принята 6.1-6.2 км/с .

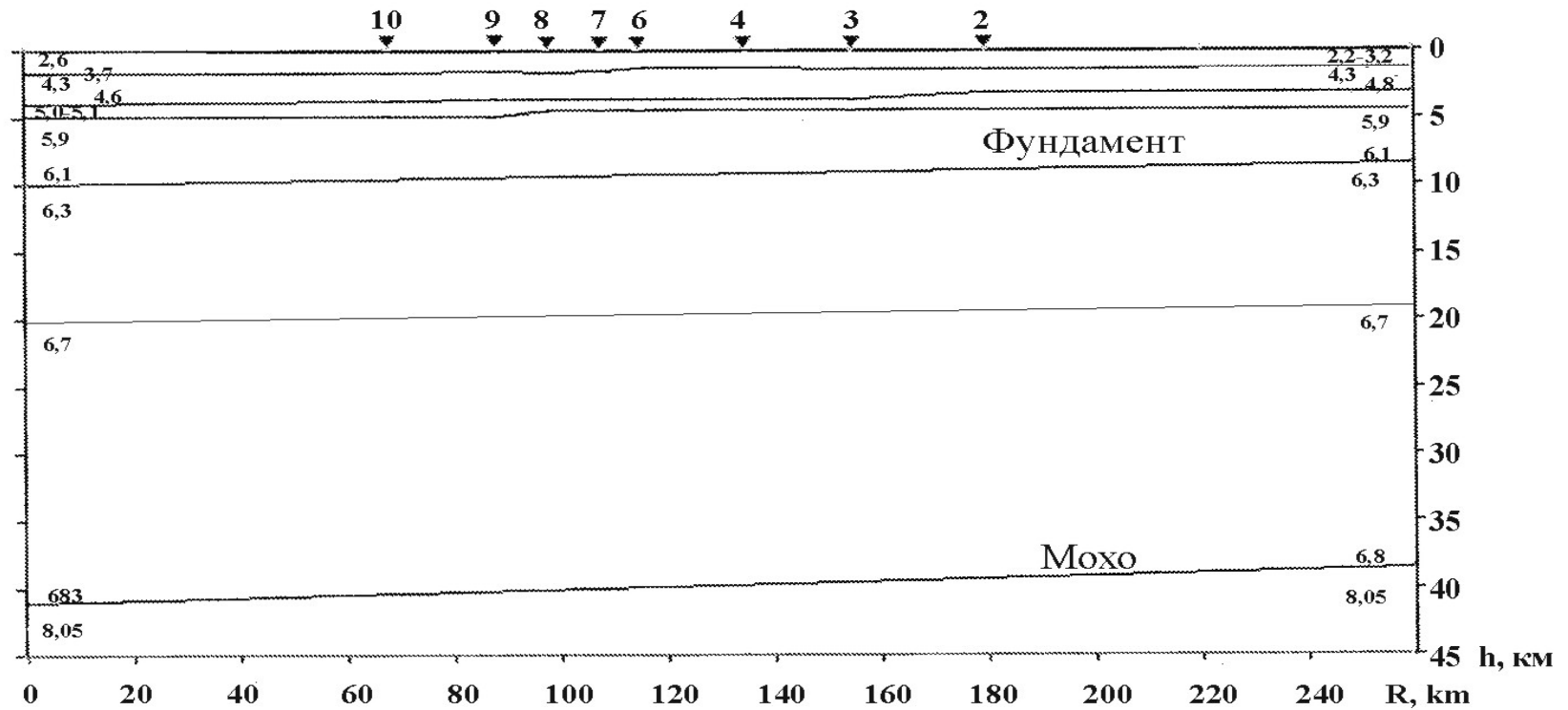
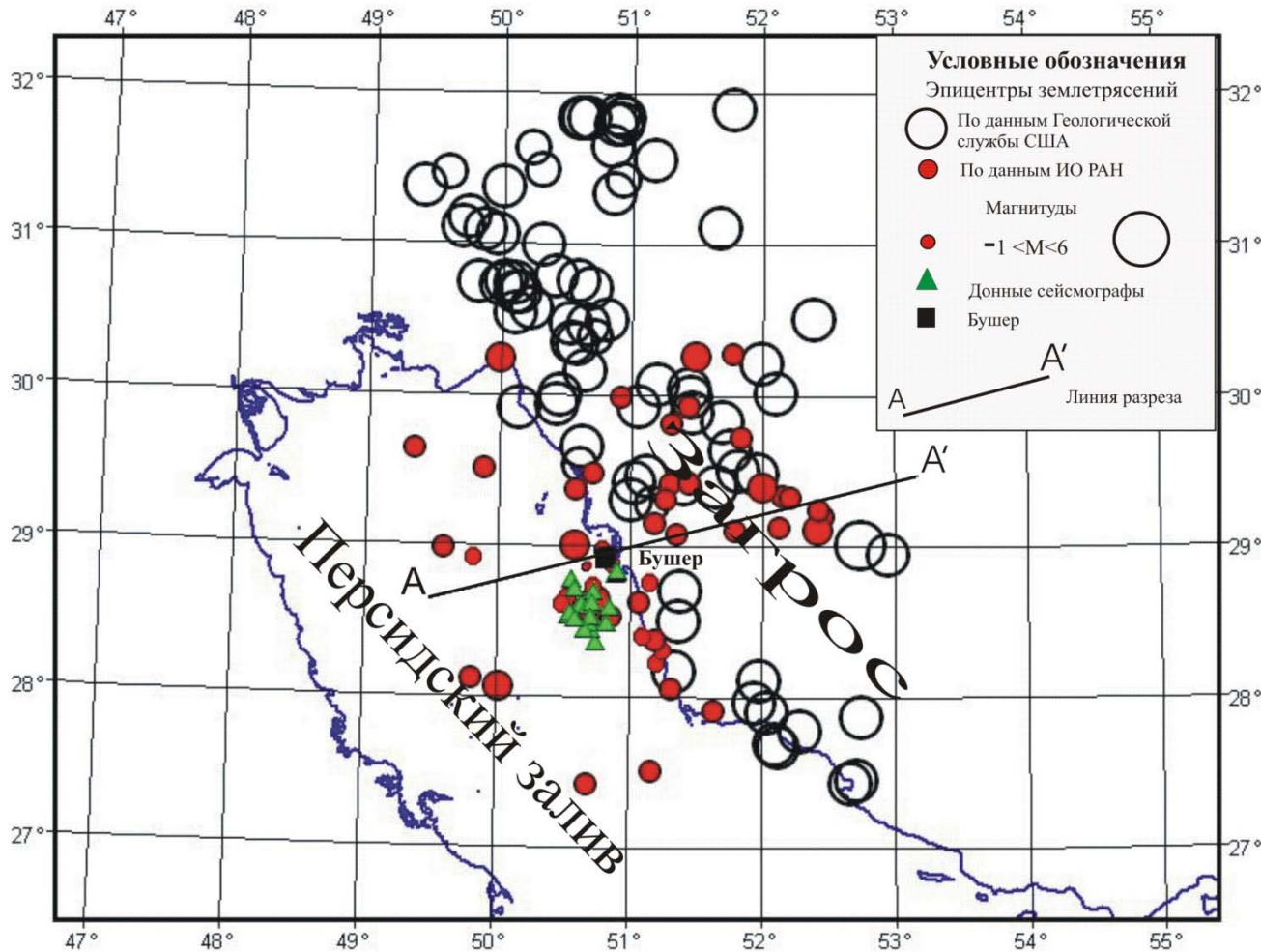


Рис. 2.39 Глубинная скоростная модель, полученная вдоль профиля 3...

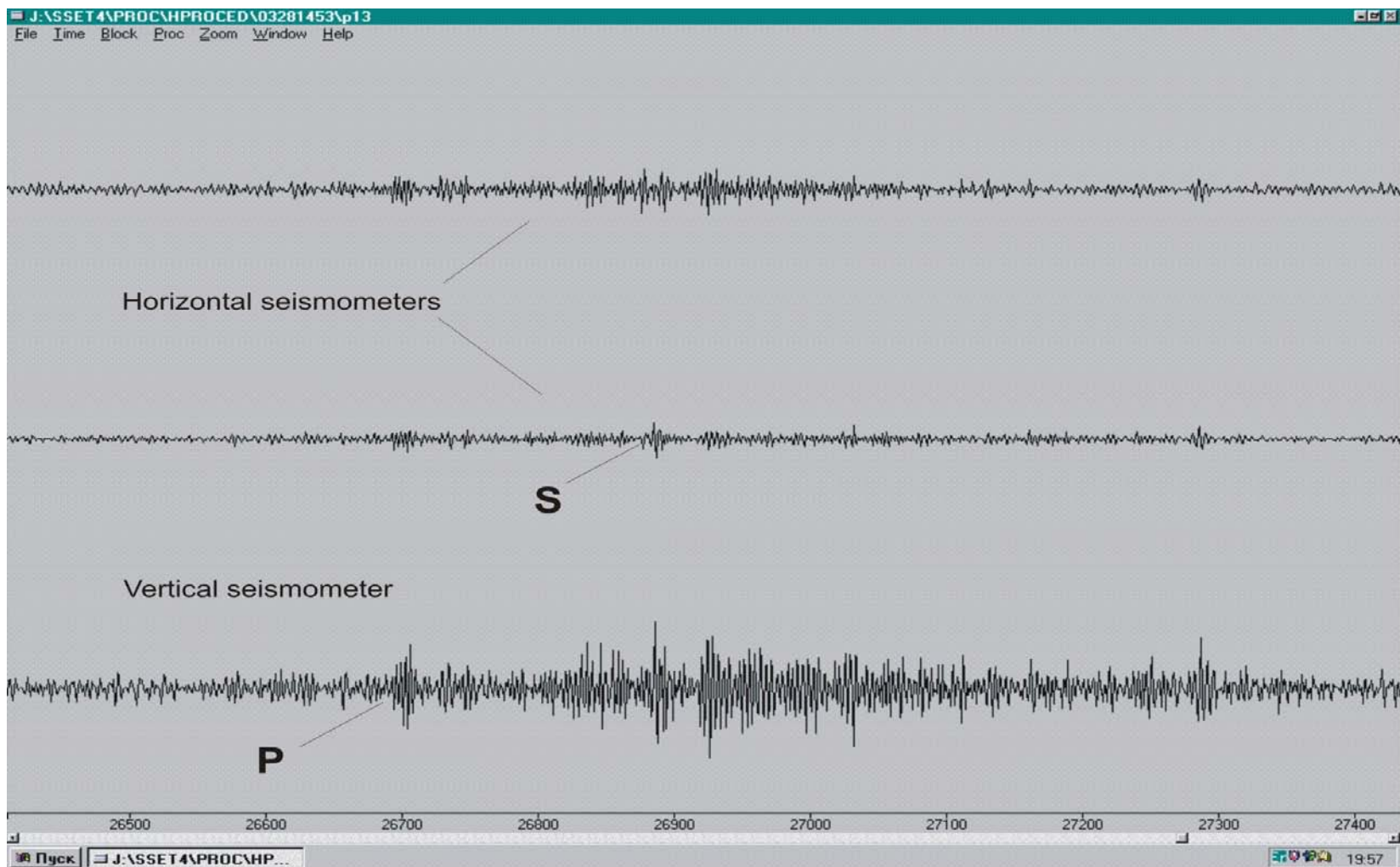
Таким образом в результате работ по глубинному сейсмическому зондированию установлено, что земная кора Персидского залива имеет мощность порядка 40 км (38-42 км, скорости сейсмических волн в базальтах 6.3-6.8 км/с), слабо увеличиваясь в направлении с юго-востока на северо-запад. При этом мощность базальтового слоя составляет 28-32 км, а мощность гранитного слоя незначительна (3-4 км, скорости сейсмических волн 5.0-6.1 км/с). Мощность осадочного чехла здесь составляет 4 км. Таким образом земную кору Персидского залива можно отнести к субокеаническому типу (пониженная мощность гранитов и повышенная мощность базальтов).

Карта эпицентров землетрясений акватории Персидского залива и района гор Загрос

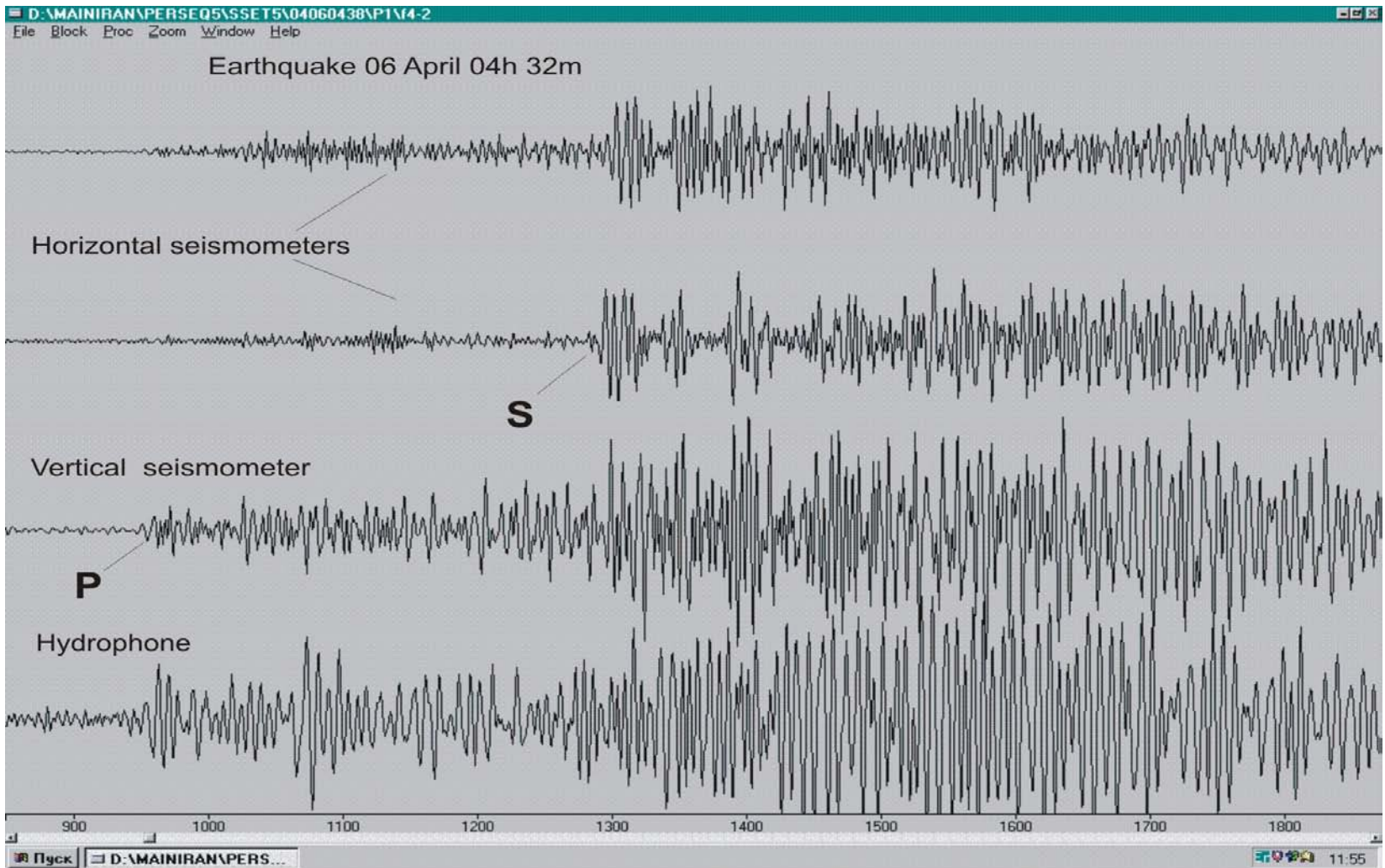


По данным геологической службы США в акватории Персидского залива отсутствуют очаги мантийных землетрясений. По данным ИО РАН мантийная сейсмичности присутствует и представлена очагами слабых ($M < 3$) землетрясений в мантии. Сейсмичность в районе АЭС Бушер рассеянная, линейные цепочки эпицентров землетрясений отсутствуют, т.е. нет активных разломов в земной коре.

Микроземлетрясение в районе Бушерской атомной станции, зарегистрированное На дне Персидского залива

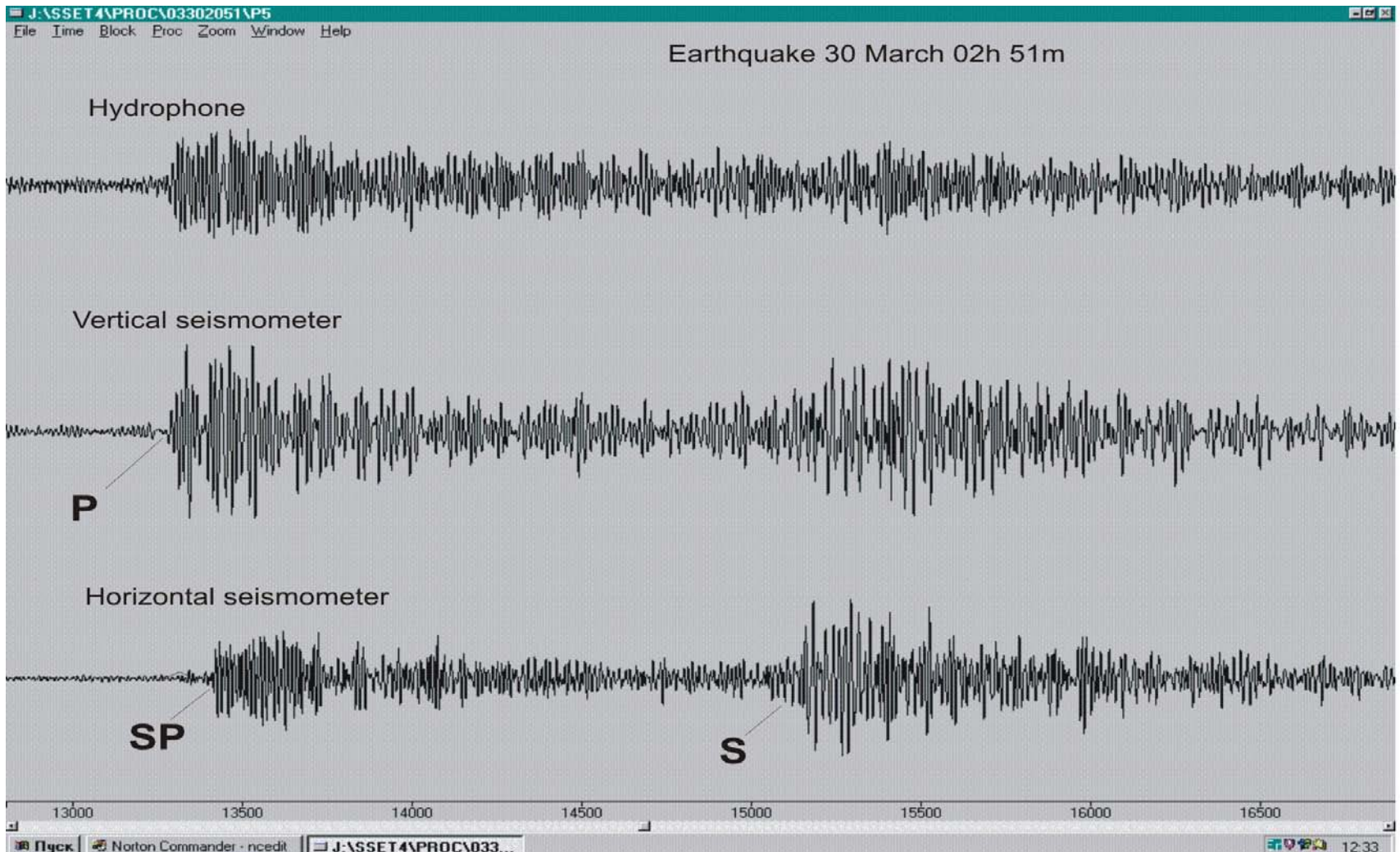


Запись землетрясения с очагом в земной коре района Загрос, полученная на дне Персидского залива



Соотношение амплитуд продольных P и поперечных S волн превышает 5

Запись землетрясения с очагом в мантии района Загрос, полученная на дне Персидского залива



Соотношение амплитуд продольных P и поперечных S волн примерно одинаковое

Времена вступлений продольных и поперечных волн на разных станциях, а также файлы, содержащие данные о скоростном строении земной коры и координаты сейсмических станций, являются входными данными для программы **НУРО-71**, использовавшейся для расчета координат эпицентров землетрясений, глубин очагов, ошибок их вычисления, времен в очагах землетрясений, а также их магнитуд.

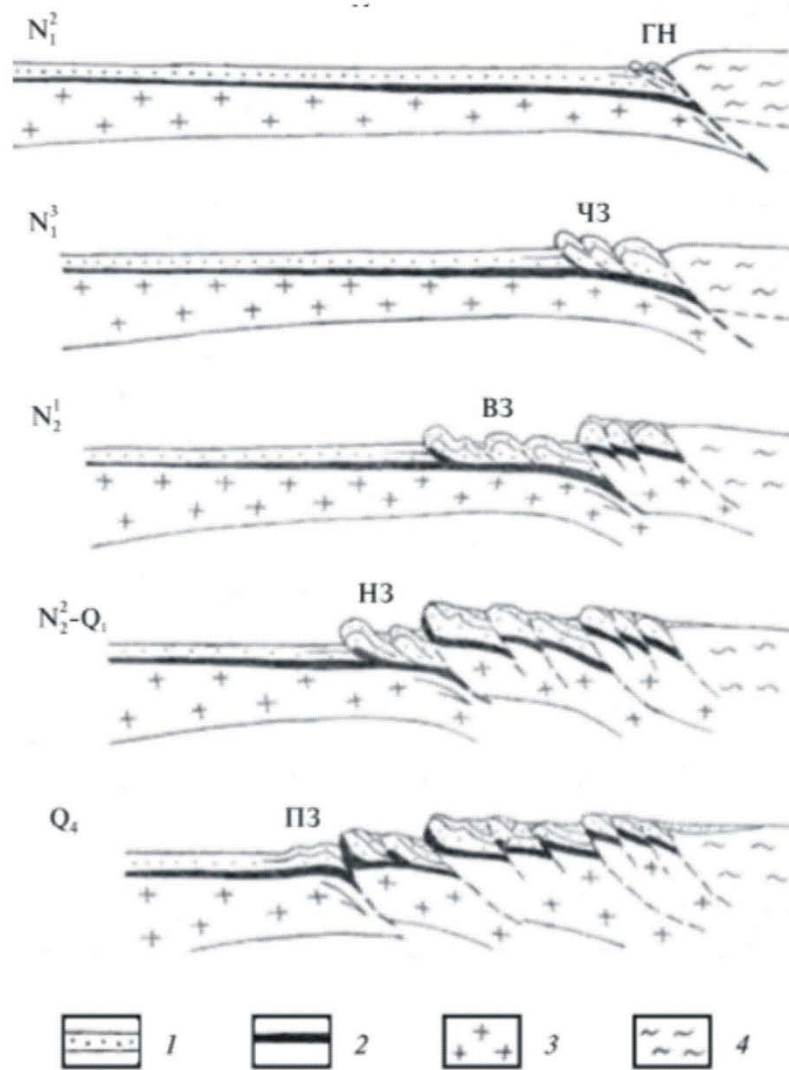
**Скоростная модель среды,
использовавшаяся для вычисления координат эпицентров
землетрясений Персидского залива**

Номер слоя	Мощность, км	V_p на кровле слоя, км/с	V_p у подошвы слоя, км/с
1	1.3	2.10	3.55
2	1.1	3.68	4.30
3	2.5	4.80	5.10
4	2.1	5.90	6.10
5	35.3	6.15	6.31
6	200.0	8.10	8.50

Магнитуды землетрясений рассчитывались по формуле:

$$M_L = 3.2 \lg \tau - 3.8$$

Здесь τ - длительность сигнала с момента первого вступления до момента, когда амплитуда коды землетрясения становится сравнимой с амплитудой фонового сейсмического шума в секундах

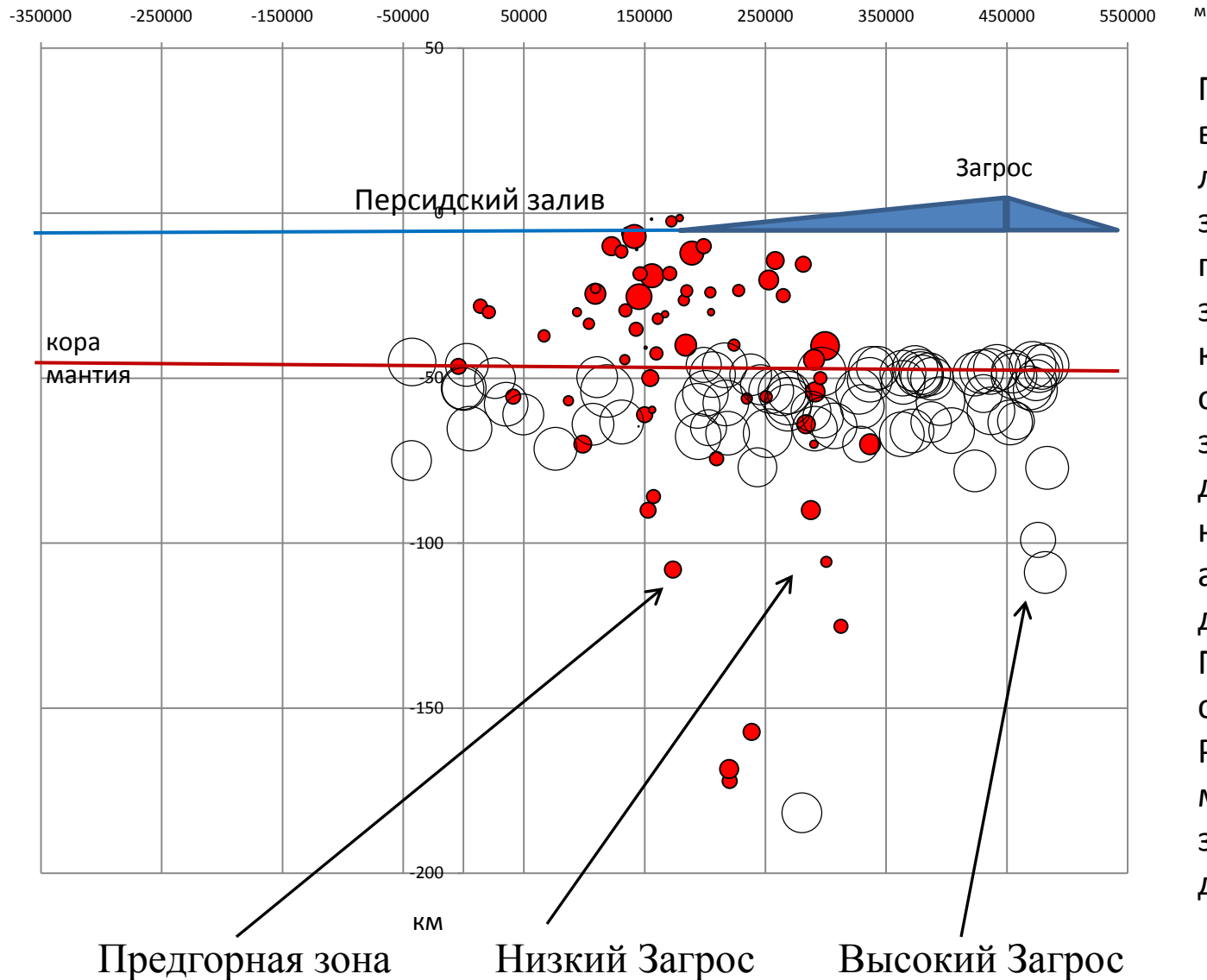


Принципиальная схема развития складчато-надвиговых деформаций и рельефа Загроса в провинции Фарс

1 — осадочный чехол; 2 — Ормузская формация венда в основании осадочного чехла; 3 — кристаллическая часть земной коры; 4 — фундамент Санандаж-Сирджанской зоны Центрального Ирана.

Буквенные обозначения. ГН — Главный надвиг Загроса; тектонические зоны: ЧЗ — Чешуйчатая, ВЗ — Высокого Загроса, НЗ — Низкого Загроса, ПЗ — Предгорная

Согласно В.Г. Трифонову субдукция Аравийской плиты под Загрос, происходившая в венде, постепенно сменялась коллизией. В сегменте Загроса Фарс выделяются четыре зоны: Чешуйчатая, Высокого Загроса, Низкого Загроса и Предгорная. Согласно предложенной интерпретации эволюции Загроса, коллизционное сжатие в зоне Главного надвига привело к возникновению перед его фронтом в Чешуйчатой зоне пологих складок типа тех, что сейчас развиваются в Предгорной зоне. Складки прямо отражались в рельефе и, разрушаясь, служили источником обломочного материала.



Гипоцентры землетрясений Персидского залива трассируют складки , приуроченные к разным зонам Загроса (Высокого Загроса , Низкого Загроса и Предгорной), указывая на их продолжение в мантии до глубин 120-180 км.

ВЫВОДЫ

В результате работ по глубинному сейсмическому зондированию получен скоростной разрез земной коры Персидского залива до глубины границы Мохо (40 км).

Судя по скоростям продольных сейсмических волн основной слой земной коры состоит из базальтовых пород с $V_p = 6.3-6.8$ км/с. Мощность гранитного слоя с $V_p = 5.0-6.1$ км/с не превышает 4 км. Таким образом можно сделать вывод, что земная кора Персидского залива относится к субокеаническому типу.

Осадочный чехол Персидского залива состоит из 3-4 слоев, скорости сейсмических волн в которых измерены в диапазоне 2.5- 4 км/с.

На траверзе полуострова Бушер на профилях 1,2,3 обнаружена структура, которая возможно, является брахиантиклиналью, имеющей изометричную куполообразную форму, что соответствует складчатости платформенного типа в областях соляно-купольной тектоники. Типичные размеры этой структуры составляют 10×20 км и подобны размерам Бушерской антиклинали.

В результате донных сейсмологических наблюдений обнаружены очаги слабых землетрясений, всего 69 сейсмических событий было записано за 21 день.

Гипоцентры землетрясений Персидского залива трассируют складки, приуроченные к разным зонам Загроста (Высокого Загроста, Низкого Загроста и Предгорной), указывая на их продолжение в мантии до глубин 120-180 км.

Разломы в земной коре акватории Персидского залива в районе АЭС Бушер не обнаружены.