

УДК 550.834.04

Ю. П. НЕПРОЧНОВ, В. В. СЕДОВ, А. А. ОСТРОВСКИЙ,
С. Ю. СОКОЛОВ

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НАКОПЛЕНИЮ
СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ СТАЦИОНАРНОГО
ПНЕВМОИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ
КАСПИЙСКОГО МОРЯ**

В 1980—1981 гг. на юго-западном побережье Каспийского моря Институтом океанологии АН СССР проводились эксперименты, главной задачей которых была отработка профиля ГСЗ длиной до 120 км при помощи пневматического источника сейсмических волн с применением методики синхронного накопления. В результате работ показано, что при условии фиксированного положения источника и приемника можно значительно увеличить дальность регистрации сигналов в методе ГСЗ с невзрывным источником упругих волн. Получен годограф первых вступлений преломленных волн и проведена оценка мощности земной коры в районе работ.

Работы методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) в экспедициях Института океанологии АН СССР в последние годы проводятся с использованием пневматических излучателей (ПИ) [3]. В условиях океана при регистрации сигналов донными сейсмографами (ДС) удается выделить вступления глубинных преломленных и отраженных волн на расстояниях 70—80 км. Для повышения дальности регистрации сейсмических сигналов при заданной мощности источника перспективным представляется применение методики синхронного накопления [6]. Эксперименты с использованием этой методики при ГСЗ на море проводились ранее в Институте океанологии [4] и в Институте Физики Земли АН СССР [2].

В работе [4] описан первый эксперимент, выполненный в 1977 г. в Черном море на НИС «Академик Орбели», главной задачей которого было выделение преломленных волн методом накопления на таких расстояниях от точки излучения, на которых эти волны не видны на единичных сейсмотрассах. Возбуждение сейсмических волн производилось с помощью пневмоизлучателя ПИ-1Б с объемом рабочей камеры 7 л. Судно во время работ стояло на якоре. Сигналы ПИ регистрировались ДС на расстоянии около 15 км от точки излучения. Вследствие повышенного шумового фона, вызванного придонными течениями, на единичных сейсмотрассах вступления преломленных волн не превышали уровня помех. Для выделения полезных сигналов единичные сеймотрассы объединялись в серии, состоящие из 10—20 трасс каждая, и синхронно суммировались на ЭВМ. На суммарных трассах, полученных для каждой серии, были выделены идентичные вступления преломленных волн, превышающие уровень помех приблизительно в 2,5 раза. Улучшение отношения сигнал/помеха при этом было равно 3—4. Существенным ограничением в увеличении кратности суммирования было то, что стоящее на якоре судно постоянно перемещалось из-за ветра и течения в районе работ на расстояния, соизмеримые с длиной волны сейсмического сигнала, и это приводило к нарушению синхронности при суммировании. При этом дальнейшее увеличение числа суммируемых трасс становилось бесполезным, так как не приводило к росту отношения сигнал/помеха.

В работе [2] описан опыт применения методики синхронного накопления сейсмических сигналов для просвечивания земной коры в районе Нурекского водохранилища. Для возбуждения сейсмических волн ис-

пользовался источник ПИ-1Б, жестко закрепленный у крутого берега. Регистрация велась сейсмической ЧМ-станцией для наблюдений методом накопления на расстояниях до 27 км. На единичных сеймотрассах вступления полезных волн превышают уровень помех в 2—2,5 раза. Синхронное суммирование серии из 18 единичных излучений позволило увеличить отношение сигнал/помеха в 4 раза и надежно выделить преломленные волны на фоне сильных промышленных помех.

В 1980—1981 гг. эксперименты по накоплению были продолжены на юго-западном побережье Каспийского моря Институтом океанологии АН СССР. Особенностью этих работ являлись фиксированные положения источника и приемника сейсмических волн и профильная система наблюдений, позволившая получить геофизическую информацию о земной коре в районе работ.

Аппаратура и методика работ. Стационарный пункт возбуждения сейсмических сигналов (ПВ) был оборудован на морской эстакаде в районе мыса Сангачал (рис. 1) на расстоянии около 12 км от берега¹. Глубина моря в районе ПВ составляла 12 м. Пневмоизлучатель ПИ-5 с объемом рабочей камеры 30 л опускался на глубину 8 м. Давление в камере ПИ составляло около 100 атм ($100 \cdot 10^5$ Па). Излучения проводились один раз в 2 мин в течение

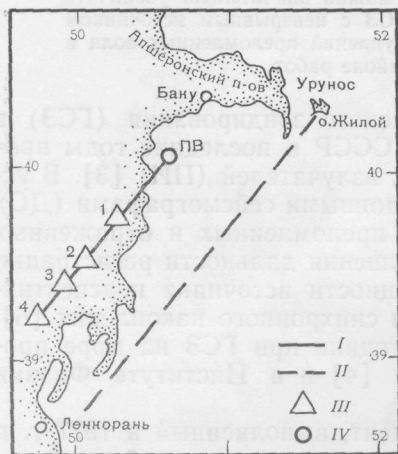


Рис. 1. Схема расположения ПВ и пунктов регистрации во время эксперимента 1980—1981 гг. и положение профиля ГСЗ от о. Жилой в направлении на Ленкорань [1]

I — профиль эксперимента 1980—1981 гг.; II — профиль ГСЗ от о. Жилой в направлении на Ленкорань; III — пункт регистрации; IV — пункт возбуждения

данного ПИ [3]. За счет влияния водной поверхности и дна моря амплитуда сигнала на данной частоте приблизительно в 4 раза меньше, чем при возбуждении в оптимальных условиях.

Раз в час на второй канал самописца записывались сигналы точного времени радиостанции «Маяк» для контроля хода кварцевого генератора, запускающего ПИ.

Для регистрации серий сейсмических сигналов использовались ДС конструкции ОКБ ОТ ИОАН. При регистрации скорость движения магнитной ленты была равна 0,95 мм/с. Частотный диапазон регистрируемых сигналов составлял 4—30 Гц. Регистрация сейсмических сигналов велась на двух уровнях усиления, что обеспечивало динамический диапазон записи около 65 дБ.

¹ Стационарный пункт возбуждения сейсмических волн на морской эстакаде был оборудован и обслуживался сотрудниками Лаборатории морской сейсмоземлетрясения и Морской геофизической партии Азербайджанского отделения ВНИИГеофизики.

Параллельно с сейсмическими сигналами записывался пилот-сигнал с частотой 32 Гц. При оцифровке записей с целью ввода их в ЭВМ удвоенный пилот-сигнал использовался для задания моментов отсчетов. Таким образом, обеспечивалась равномерность отсчетов в реальном времени (коррекция неравномерности движения магнитной ленты). Точность хода кварцевых часов ДС составляла 10^{-7} . На магнитную ленту ДС записывались минутные и секундные импульсы с часов. Привязку часов ДС к генератору, запускающему ПИ, осуществляли сверкой часов ДС с сигналами точного времени радиостанции «Маяк». Сверки производились: в пункте 1 (ближний к ПВ пункт регистрации) — перед началом работы ПИ и через 24 ч (после окончания работ); в пункте 2 — каждые 8 ч; в пунктах 3 и 4 — не реже чем каждые 4 ч. Величины расхождения кварцевых часов ДС и ПИ были порядка 10^{-6} , что требовало введения поправок за расхождение часов при обработке материала на ЭВМ.

Всего за время работ произведено четыре серии приблизительно по 600 излучений в каждой и осуществлена непрерывная регистрация сейсмических колебаний в восьми пунктах на территории Азербайджана, четыре из которых составляют профильную систему наблюдений (рис. 1). Максимальное удаление пункта приема от ПИ составляло 116 км.

Методика обработки материалов. При обработке длительных серий излучений на ЭВМ по методике синхронного накопления в случае фиксированного положения источника и приемника главным является учет расхождения часов ПИ и ДС. Как уже говорилось, в процессе работы проводили сверки часов с сигналами точного времени радиостанции «Маяк». Это дало возможность построить аппроксимированные ломаной линией графики расхождения часов ДС относительно часов на ПВ и ввести по ним соответствующие поправки при суммировании. Единичные трассы были оцифрованы на комплексе КАМАК и записаны в цифровом виде на магнитную ленту. Частота дискретизации была равна 64 Гц, или 0,0156 с в реальном времени. Суммирование проводилось на ЭВМ ЕС-1040. Поправка на расхождение часов вводилась, когда разница времени ПИ и ДС превышала шаг квантования по времени. При этом производили сдвиг очередных единичных трасс по времени на один отсчет. Когда поправка превышала два шага квантования, задавался сдвиг, равный двум отсчетам, и т. д. Расхождение часов ДС и ПИ как функция номера трассы задавалось в программе на языке ФОРТРАН, и введение поправок происходило автоматически.

Перед обработкой полевого материала на ЭВМ были получены обзорные сейсмограммы для каждого ДС. Это дало возможность выделить те участки записей, где имелись сильные нестационарные помехи, и исключить их из обработки. Информация о пригодности трасс для обработки в зависимости от номера трассы также была заложена в программу и учитывалась автоматически. Кроме того, на основании распечаток отдельных единичных трасс для каждой серии выбирался цифровой уровень, превышающий среднеквадратичный разброс значений на 50%, и при считывании очередной трассы в случае появления значений, превышающих заданный уровень, трасса не учитывалась. Вышеописанная операция выбраковки трасс по аномально высоким значениям отсчетов правомерна и целесообразна, поскольку отношение сигнал/помеха на единичных трассах значительно меньше единицы.

Результаты. В результате обработки записей четырех постановок ДС (см. рис. 1) на эпицентральных расстояниях 43, 76, 94 и 116 км были получены суммарные трассы (рис. 2) с кратностью суммирования N соответственно 180, 151, 362 и 196. При этом отношение сигнал/помеха теоретически должно увеличиваться в \sqrt{N} (в 13, 12, 19 и 14 раз соответственно) [6]. Отношение сигнал/помеха на всех четырех суммарных трассах колеблется в пределах 1,5—2,5. Этот факт свидетельствует, что исходное отношение сигнал/помеха было много меньше единицы. Пре-

ломленные волны не видны даже на единичных трассах постановки I, отстоящей от ПИ на 43 км.

На удаленных трассах 3 и 4 первые вступления полезных волн (они соединены сплошной линией) выделяются более уверенно, чем на трассах 1 и 2. Скорее всего это связано с тем, что на постановках 1 и 2 учет расхождения часов ПИ и ДС был сделан менее детально и аппроксимирующая его линия сильно отличается от реального хода часов. Наличие недоучтенного сдвига на единичных трассах значительно уменьшает теоретическую величину изменения отношения сигнал/помеха при синхронном накоплении [5]. Если считать недоучтенный сдвиг случайной

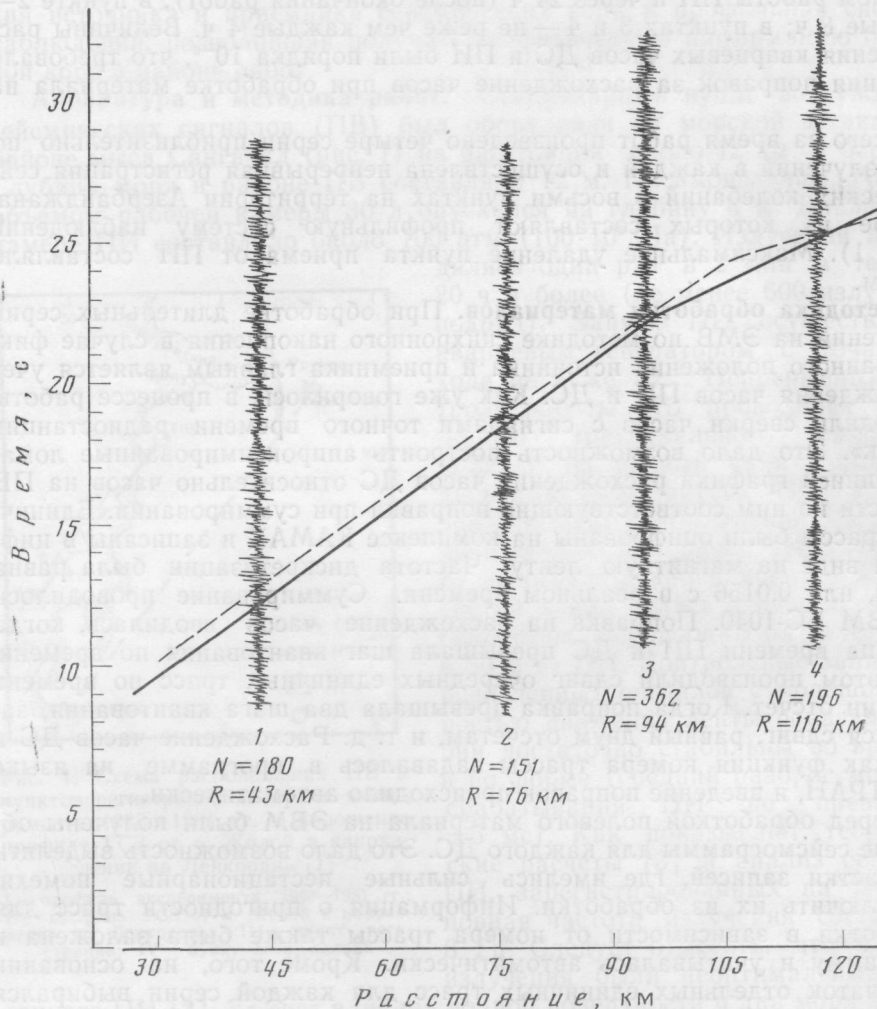


Рис. 2. Сводная сейсмограмма эксперимента по накоплению

N — кратность накопления; R — эпицентральное расстояние; I — экспериментальный годограф; II — теоретический годограф, посчитанный по модели, наиболее хорошо соответствующей экспериментальным данным

величиной с разбросом σ , то при частоте 8 Гц и разбросе $\sigma=0,0156$ с (1 шаг квантования) реальное изменение отношения сигнал/помеха по амплитуде меньше теоретического на 20%. В нашем случае при точности хода часов ПИ и ДС порядка 10^{-7} и интервалах времени между сверками ≤ 4 ч неучтенная компонента расхождения часов для пунктов 3 и 4 не может существенно превысить по величине шаг квантования. Поэтому мы вправе считать, что минимальное увеличение отношения сигнал/помеха составляет для пунктов 3 и 4 соответственно 15 и 11. Для пунктов 2 и особенно 1 увеличение отношения сигнал/помеха может быть в 2—4 раза меньше, так как интервалы времени между сверками здесь

равны мировым системам распр

По сах, бр ления кажуш полож 3-м и 4

По щих се от о. У пийско мощнос первый ростью с грани тий сло ростью мощнос «гранит скорост мощнос 6,6—7,0 мантии было се делей э тически

Срав теорети дать, чт 4 являет сах 1, 2 коры с о Моде вступлен на рис. ставлен 71 поло 28 км), рость ув вышеннь втором с Оценка с ным дан

Выводы

методики с 2. В ре источника от пневмои 3. Полу Оценка мош Авторы

1. Аксенови ский М. вание в п
2. Володин Фихиева излучате

равны 8 и 24 ч соответственно. Влияние разброса на результаты суммирования моделируется как фильтрация исходного сигнала некоторой системой, частотная характеристика которой равна спектру функции распределения сдвига.

По первым вступлениям, выделенным на четырех суммарных трассах, был построен годограф преломленных волн (рис. 2). Первые вступления на трассах 1, 2 и 3 находятся практически на одной прямой с кажущейся граничной скоростью, равной $6,0 \pm 0,1$ км·с⁻¹. На трассе 4 положение первого вступления свидетельствует о смене волн между 3-м и 4-м пунктами приема.

По литературным данным [1, 7] была получена информация об общих сейсмических свойствах слоев земной коры вдоль профиля ГСЗ от о. Жилой в направлении на Ленкорань (см. рис. 1). В районе Каспийского моря, ближайшем к месту наших работ, осадочная толща мощностью 15 км представлена тремя слоями: первый слой мощностью 3 км со средней скоростью $2,5$ км·с⁻¹; второй слой мощностью 7 км с граничными скоростями 3,4—3,6 км/с и третий слой мощностью 5 км с граничной скоростью 4,8 км/с. Консолидированная кора мощностью 25 км представлена двумя слоями: «гранитным» мощностью 13 км с граничными скоростями 5,7—6,4 км/с и «базальтовым» мощностью 12 км с граничными скоростями 6,6—7,0 км/с. Граничная скорость у кровли мантии 8,1 км/с. На основании этих данных было составлено несколько сейсмических моделей земной коры и произведен расчет теоретических годографов преломленных волн.

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами позволяет утверждать, что волна, вступившая первой на трассе 4 является мантийной, а вступления на трассах 1, 2 и 3 соответствуют преломленным волнам консолидированной коры с относительно небольшим градиентом скоростей.

Модель, имеющая наименьшие расхождения во временах первых вступлений в сравнении с экспериментальными данными, представлена на рис. 3. Годограф преломленных волн, рассчитанный для нее, представлен на рис. 2. Полученная модель коры отличается от исходной [1, 7] положением границы Конрада (в исходной модели — на глубине 28 км), наличием градиента скорости в третьем осадочном слое (скорость увеличивается от 4,8 км/с у кровли до 5,1 км/с у подошвы) и повышенным по сравнению с исходной моделью градиентом скорости во втором осадочном слое (скорость увеличивается от 3,6 до 4,0 км/с). Оценка общей мощности земной коры по полученным экспериментальным данным методом T_0 для района работ дала величину около 40 км.

Выводы. 1. Впервые были проведены профильные наблюдения ГСЗ с применением методики синхронного накопления сигналов от пневмоизлучателя.

2. В результате работ было показано, что при условии фиксированных положений источника и приемника можно значительно увеличить дальность регистрации сигналов от пневмоизлучателя в методе ГСЗ путем применения синхронного накопления.

3. Получен годограф первых вступлений преломленных волн до расстояний 120 км. Оценка мощности земной коры в районе работ дала величину около 40 км.

Авторы благодарят Ю. Г. Гаюбарова за помощь в проведении работ.

Литература

1. Аксенович Г. И., Аронов Л. Е., Гагельганц А. А., Гальперин Е. И., Зайончковский М. А., Косминская И. П., Крокшина Г. М. Глубинное сейсмическое зондирование в центральной части Каспийского моря. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. Володин А. А., Дададжанов И. А., Зеликман Э. И., Капустин Н. К., Николаев А. В., Фихиева Л. М. Опыт сейсмического просвечивания с накоплением сигналов пневмоизлучателя. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1983, № 4, с. 107—109.

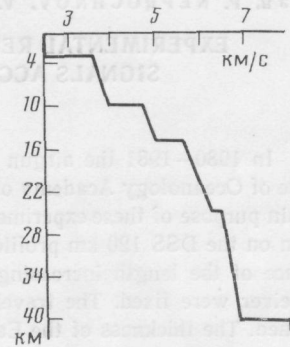


Рис. 3. Сейсмическая модель земной коры в районе работ, наиболее хорошо совпадающая с экспериментальными данными

3. Непрочнов Ю. П., Ельников И. Н. Использование пневматических излучателей при глубинном сейсмическом зондировании.— В кн.: Проблемы вибрационного просвечивания Земли. М.: Наука, 1977, с. 185—195.
4. Непрочнов Ю. П., Седов В. В., Гринько Б. Н. Опыт накопления сигналов от пневматических источников при ГСЗ на море.— Океанология, 1979, т. 19, вып. 3, с. 499—503.
5. Рапопорт М. Б. Автоматическая обработка записей колебаний в сейсморазведке. М.: Недра, 1973.
6. Харкевич А. А. Борьба с помехами. М.: Изд-во ФМЛ, 1963.
7. Шапировский Н. И., Гаджиев Р. М. Морская геофизическая разведка. Баку: Азерб.НИИГР, 1962.

Институт океанологии им. П. П. Ширшова
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
4.X.1983

После доработки
2.IV.1984

Ю. П. NEPROCHNOV, V. V. SEDOV, A. A. OSTROVSKIY, S. Ju. SOKOLOV

EXPERIMENTAL RESULTS ON THE STATIONARY AIRGUN SEISMIC SIGNALS ACCUMULATION OFF THE WESTERN SHORE OF THE CASPIAN SEA

In 1980—1981 the airgun seismic signal accumulation experiments were held by Institute of Oceanology Academy of Sciences of USSR on western shore of the Caspian Sea. The main purpose of these experiments was using of the method of synchronous signals accumulation on the DSS 120 km profile. The signals were emitted by pneumatic source. The significance of the length increasing of the DSS was shown, when the positions of source and receiver were fixed. The travel-time plot of first arrivals of the refracted waved was obtained. The thickness of the Earth crust in the area studied was estimated.