

Академик
М. А. САДОВСКИЙ,
доктор физико-
математических наук
А. В. НИКОЛАЕВ

НОВЫЕ МЕТОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Сейсмическая разведка оформилась в самостоятельную научную дисциплину в 30-х годах, когда были созданы физические и теоретические основы методов исследования сплошных сред преломленными и отраженными волнами. Эти методы были существенно развиты в 40–50-х годах: возросли их разведочные возможности, повысилась детальность, глубинность, надежность. Последнее десятилетие отмечено новыми большими успехами сейсморазведки. Внедрение невзрывных источников импульсного и вибрационного действия дает возможность формировать зондирующие сейсмические сигналы с заданными свойствами, направленно излучать продольные и поперечные волны. Новые методы обработки информации, развитые в Советском Союзе и за рубежом, позволяют строить трехмерные (а не плоские, как это делалось прежде) поля скоростей сейсмических волн в рамках сравнительно простых детерминированных моделей.

Вместе с тем перед сейсмической разведкой встают новые задачи: изучение сложноподислоцированных сред, выявление неструктурных залежей нефти и газа, прямой поиск месторождений, то есть прогнозирование нефтегазовой залежи, рудного тела и т. д. по комплексу параметров сейсмического волнового поля, а также задачи, связанные с проблемами сейсмического районирования, исследования очаговых зон сильных землетрясений, захоронения радиоактивных веществ, и др. Сейчас уже стало ясно, что возможности традиционных методов во многих случаях ограничены, видны их пределы. Есть ли резерв развития сейсмической разведки и экспериментальной сейсмологии? Как показывает история науки, для того чтобы совершить значительный шаг в развитии той или иной области науки, необходим вызов главным гипотезам феноменологии, нужно хотя бы немного расшатать фундамент, на котором построено здание научного закона.

Существующие методы сейсморазведки и сейсмологии базируются на представлениях о горных породах как о сплошной линейно-упругой среде, в которой сейсмические волны распространяются одинаковым образом, независимо от их амплитуды, и не взаимодействуют между собой; среда пассивна, она поглощает, но не излучает сейсмическую энергию; она неизменна во времени. Кроме того, считается, что разведочные возмож-

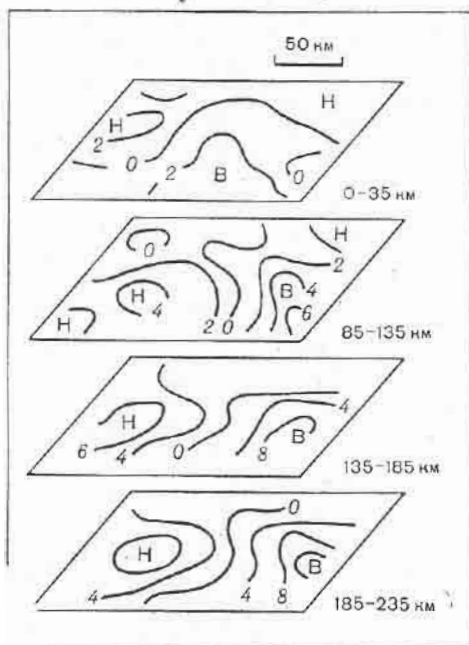


Рис. 1. Скоростной разрез литосферы под группой НОРСАР

Цифры — скорости распространения волны в процентах, Н, В — области пониженных и повышенных значений скорости

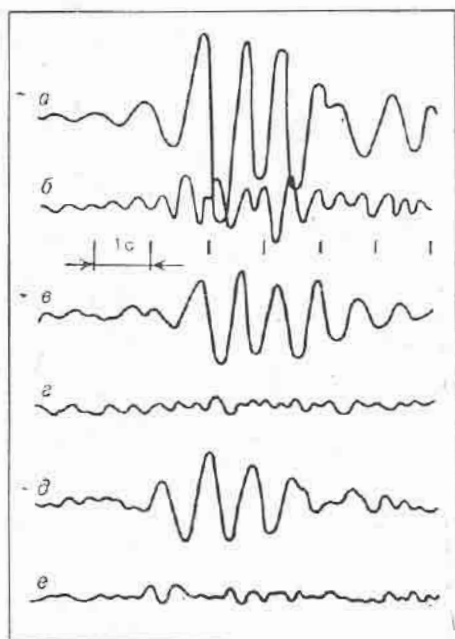


Рис. 2. Записи продольной волны от землетрясения в одном из районов Японии

а, б — вне залежи нефти; в, г, д, е — над залежью; а, в, д — в полосе частот 0,7—2 Гц; б, г, е — в полосе частот 2—5 Гц

ности сейсмического метода имеют принципиальное ограничение, связанное с длинами волн: малые неоднородности не могут быть обнаружены волнами, длина которых в несколько раз превышает их размер.

Это сильная схематизация свойств реальной среды, которая на самом деле не сплошная, а скорее дискретная, кусковатая, содержит целую иерархию масштабов неоднородностей. Естественно было бы рассматривать реальную среду как систему отдельных, находящихся в различных напряженных состояниях. В соответствии с вероятностным распределением напряжений по отдельностям некоторое малое их число уже с самого начала приложения внешнего воздействия должно находиться в состоянии, близком к неустойчивости. Поэтому даже слабое воздействие извне вызовет изменение свойств и энергетического состояния системы во времени, что и наблюдается в действительности.

Реальные горные породы обладают выраженными нелинейными упругими свойствами, постоянно излучают микросейсмические колебания (сейсмическая эмиссия), претерпевают временные изменения в связи с изменениями напряженного состояния, вызванными геодинамическими и геохимическими процессами. Теоретическое исследование таких систем лежит вне возможностей механики сплошных линейно-упругих, упруго-пластичных и других моделей среды. Для того чтобы учесть вероятностный характер процессов, протекающих в реальной среде, необходим новый аппарат исследования, основанный на методах статистической физики и открывающий пути к изучению временного развития процессов в системе. Создание такой теории дело будущего. Однако многие полезные результаты можно получить и привычными методами, опреде-

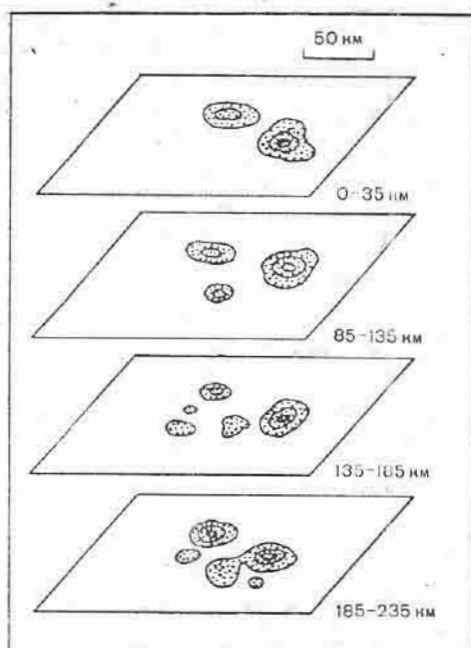


Рис. 3. Разрез литосферы под группой НОРСАР

Контурами показаны области скопления рассеивателей; использованы рассеянные волны от землетрясения в одном из районов Японии, частота 1,6 Гц

и сейсмической голографии, выявление пространственных аномалий статистической структуры микросейсм и волн кода («хвостовых» частей записи сейсмических сигналов от импульсных источников), связанных с залежью нефти или газа, изучение нелинейных упругих свойств реальных сред, сейсмической эмиссии и флуоресценции, временных изменений скоростей распространения упругих волн.

Метод состоит в том, что среда под группой регистрирующих приборов просвечивается проходящими снизу волнами от удаленных источников, которые выносят на поверхность аномалии времени своего пробега, своей амплитуды и формы, позволяющие определить строение среды. Идея использования удаленных источников была предложена академиком Г. А. Гамбурцевым в 40-х годах, по не получила развития в разведочной геофизике. С появлением площадных сейсмических антенн в сейсмологии были развиты методы интерпретации таких наблюдений.

На рис. 1 показан трехмерный сейсмический разрез под группой НОРСАР¹ в южной Норвегии по данным К. Акк (США), Е. Хусеби, К. Кристофферсена (Норвегия). Разрез построен по временам пробега волн от землетрясений, очаги которых расположены во всем диапазоне азимутов с эпицентрными расстояниями 3–8 тыс. км.

Анализ возможностей метода просвечиваний удаленными источниками для изучения глубин до 10 км показал, что его применение требует плотных площадных сетей регистрации, «обстрела» исследуемого объема

для отклонения результатов опытных наблюдений от предписываемых линейной теорией.

Возможности детальных исследований среды не имеют принципиальных ограничений со стороны длин волн и размеров неоднородностей. Существуют методы извлечения информации о тонкой структуре среды из низкочастотного волнового поля — это требует специального планирования и обработки наблюдений.

Работы по сейсмологии, которые ведутся в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР, ориентированы на изучение до сих пор мало известных свойств реальных сред, возможностей и путей их использования для целей сейсмической разведки, познание строения глубоких оболочек Земли, развития процессов в очаговых зонах взрывов и землетрясений и прогнозирование этих процессов. Основные направления исследований — разработка новых методов изучения верхней части разреза удаленными сейсмическими источниками в варианте просвечиваний

¹ Группа представляет собой сеть из 132 вертикальных короткопериодных сейсмометров, покрывающих площадь 100×100 км².

с разных азимутов, больших значений сигнал—помеха. Особенность метода состоит в его способности различать, главным образом, горизонтальные неоднородности, он не чувствителен к плоской слоистости. При сейсмических просвечиваниях лучи только один раз проходят верхнюю часть исследуемого объема, сильно искажающую волновое поле.

Опытные работы Института физики Земли в Припятском прогибе доказали принципиальную возможность использования как взрывов, удаленных на 200—300 км, так и землетрясений, очаги которых удалены на несколько тысяч километров². На рис. 2 приведены примеры записи удаленного землетрясения, зарегистрированного в районе Восточно-Первотомайского месторождения нефти в Белоруссии. Первые продольные волны, прошедшие через залежь, обеднены высокими частотами. Эту характеристику, паряду с другими, можно использовать в качестве признака для прямого поиска нефти и газа.

В перспективе исследование больших площадей сейсмическими просвечиваниями может быть обеспечено сетью стационарных вибростоек, которые расположены на расстояниях порядка 500 км друг от друга.

Другой способ изучения верхней части среды под группой сейсмических станций, в котором применяются удаленные источники, реализует голографический принцип построения неоднородностей, рассеивающих сейсмические волны. Классическая голография использует гармонические источники. Импульсные источники также могут быть использованы, но это требует специального преобразования зарегистрированных сигналов, эквивалентного их приведению к гармоническому источнику. Метод восстановления изображений состоит в том, что каждая точка среды как бы опрашивается — не является ли она рассеивателем, а затем, когда все точки опрошены, результаты картируются.

На рис. 3 показан разрез под сейсмической группой НОРСАР, построенный П. А. Троицким по данным регистрации удаленных землетрясений для частоты 1,8 Гц. Получен неожиданный результат: выявлены столбообразные неоднородности, проходящие через всю литосферу. Методика сейсмоголографических исследований опробована и обоснована ультразвуковым моделированием.

В масштабе сейсмической разведки исследования по сейсмической голографии ведутся в Сибирском отделении АН СССР, где получены убедительные результаты.

Метод сейсмоголографии может использовать микросейсмические колебания. Идея состоит в том, что каждый отдельный рассеиватель в среде переизлучает микросейсмические колебания. Это вторичное излучение имеет упорядоченную пространственную структуру. Представим себе, что на поверхности воды плавает предмет. Хаотическое волнение воды переизлучается этим предметом, от него расходятся волны, «круги». Если бы предмет стал невидимым, по этим кругам можно было бы догадаться о его присутствии именно в этом месте. Таким образом, микросейсмические случайные колебания могут быть использованы наравне с колебаниями от импульсных или гармонических источников для изучения строения реальных сред. Такой метод требует наблюдений с помощью плотной системы станций над исследуемым объектом, обработки данных продолжительной регистрации. Он был разработан в Институте физики

² Первые просвечивания нефтяной залежи удаленными землетрясениями выполнены в 1959 г. на месторождении нефти Майли Су в Ферганской долине И. Л. Нерсесовым и членом-корреспондентом АН СССР А. С. Алексеевым, получившими обнадеживающий результат.

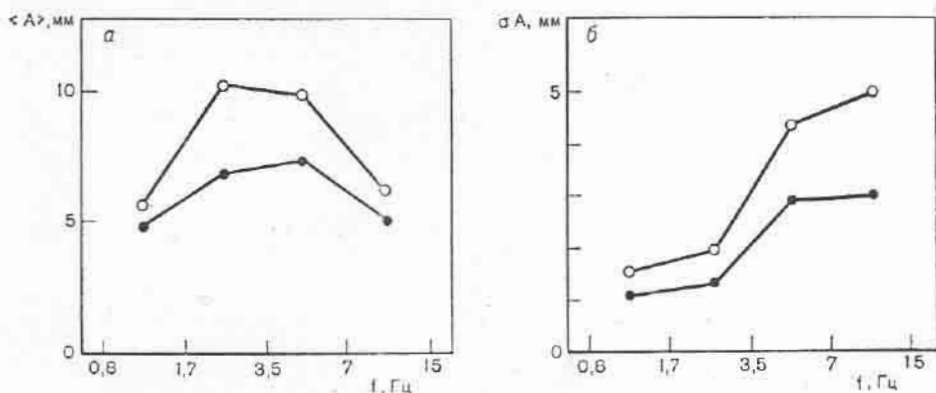


Рис. 4. Средние амплитуды записи микросейсмических колебаний (A) — a и средние флуктуации амплитуд σA — b в четырех полосах частот

● — над залежью, ○ — вне залежи

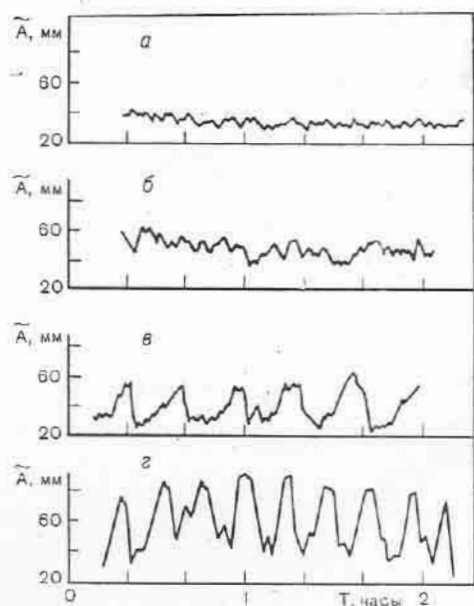


Рис. 5. Образцы огибающей записи микросейсмического шума \tilde{A} . Полоса частот 30,9—31 Гц
 a, b — записи в «спокойные» периоды, v, z — записи после сильных землетрясений

Земли, опробован на материалах группы НОРСАР. «Срез», полученный этим методом для глубины 100 км, имеет сходство со «срезом», полученным по описанной выше голографической схеме.

Использование микросейсм для визуализации рассеивающих сейсмические волны неоднородностей требует обработки длинных образцов записи — от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Можно ожидать, что в перспективе сейсмоголография на микросейсмических колебаниях будет применяться для рекогносцировочных наблюдений в труднодоступных и не имеющих постоянно действующих сейсмических источников районах.

Структура поля микросейсмических колебаний тесно связана со строением среды. В частности, обеднение микросейсм высокими частотами, уменьшение их интенсивности наблюдается в областях, обладающих повышенными поглощающими свойствами. Работы Института физики Земли в районе Восточно-Пер-

вомайского месторождения нефти подтвердили это. На рис. 4 приведены осредненные спектры короткопериодных микросейсм и их флуктуации над залежью и вне залежи. Наблюдаемые различия показывают, что область нефтяной залежи характеризуется повышенным поглощением сейсмических волн.

Исследования структуры микросейсмических колебаний ведутся в ФРГ и США с целью поиска зон повышенного разогрева, источников

тепловой энергии, которые обладают сильными поглощающими свойствами и служат, таким образом, стоком микросейсм. Но реальная среда, оказывается, не только сток, но и источник микросейсм, она обладает *сейсмической эмиссией*.

На рис. 5 показаны записи огибающей микросейсмического шума, полученные в разное время сейсмической обсерваторией «Обнинск»². На нижних записях отчетливо видна периодичность, связанная с собственными колебаниями Земли после сильных землетрясений. В спектре огибающей присутствуют все главные моды собственных колебаний. Собственные колебания Земли модулируют высокочастотные микросейсмсы по амплитуде, а это значит, что причина микросейсм — не только внешние, экзогенные источники, но также источники внутренние — постоянно происходящие в среде микротрещки. Детальный анализ позволяет выявить колебания уровня микросейсм, обусловленные лунно-солнечными приливными деформациями.

Интенсивность эмиссии связана с напряженным состоянием среды, ее трещиноватостью разных масштабов; соответственно, и характер эмиссии несет информацию об этих качествах среды. Интерес к эмиссии в последние годы определяется перспективой использования этого явления для прогноза землетрясений. В настоящее время исследуется возможность применения сейсмической эмиссии для разведки полезных ископаемых. Пока еще неясно, является ли залежь нефти или газа достаточно интенсивным источником микросейсм, насколько выражена аномалия этого качества по отношению к вмещающим породам. Есть косвенные указания на то, что источниками высокочастотных микросейсм должны быть рудные тела.

Сейсмическая эмиссия дает ощутимый вклад в поле высокочастотных — десятки герц — микросейсмических колебаний. Поэтому пространственные аномалии статистических характеристик высокочастотных микросейсм связаны не только с особенностями строения верхней части среды, но и с пространственным распределением микросейсмической активности, что может служить прямым указанием на присутствие залежи.

Установлено, что виброколебания стимулируют сейсмическую эмиссию. Это обстоятельство позволит существенно расширить возможности исследования нового явления и качества реальных сред — способности источать микросейсмические колебания, «светиться».

Недавними исследованиями структуры сейсмического волнового поля вблизи виброисточников, проведенными Институтом физики Земли и Научно-исследовательским институтом радиофизических измерений, установлено, что в осадочных породах, таких как супеси, суглинки, даже при незначительных деформациях (10^{-5} — 10^{-6}) могут проявляться заметные нелинейные эффекты. Коэффициент нелинейности

$$K = \rho v (dv/dp)$$

(ρ — плотность, v — скорость продольной волны, p — давление) определяет степень нелинейного действия упругой среды. В рыхлых грунтах он достигает значений 10^4 и, возможно, больших, в консолидированных монолитных горных породах составляет величины порядка нескольких десятков. Параметр K — важная физическая характеристика среды, и потому крайне желательно научиться определять его в верхней части разреза, до глубин 5—10 км.

Как известно, гетерогенные трехфазные среды обладают сильными нелинейными свойствами, поэтому есть все основания полагать, что неф-

² Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов. — Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1979, № 1.

тяные залежи представляют собой яркие аномалии коэффициента нелинейности.

С нелинейной упругостью связан ряд эффектов: взаимодействие сейсмических волн, характерные искажения гармонических сигналов. Взаимодействие выражается, например, в возникновении пизкочастотных волн при интерференции волн высокочастотных с близкими частотами. При этом возникают биения на низкой частоте, колебания детектируются (нелинейно искажаются) средой, в результате чего образуется пизкочастотная волна.

Другой эффект — искажение гармонической волны по мере ее распространения в нелинейно-упругой среде. Волна при этом обретает форму сравнительно сложного периодического колебания. Значит, часть сейсмической энергии переходит в высшие гармоники. Возникновение высокочастотных колебаний на кратных частотах может быть использовано для обнаружения объемов среды, обладающих аномально высокими значениями коэффициента нелинейности. Например, можно облучать определенную область среды гармоническими сейсмическими колебаниями на некоторой основной частоте, регистрировать при этом волны кратных частот. Применяя площадные системы приема, можно найти направления на источники высокочастотных сейсмических колебаний — области аномально сильных нелинейных свойств. В этих же областях будут возникать низкочастотные сейсмические волны, если их облучать близкими по частоте высокочастотными гармоническими сигналами.

Описанные эффекты указывают пути выявления объемов среды, обладающих аномально сильными поглощающими свойствами. Существенно, что нелинейная упругость присутствует и в других явлениях — временных изменениях скоростей распространения волн, связанных с изменением поля напряжений.

Наконец, хотя этот вопрос и выходит за рамки сейсмологии, нельзя не обратить внимание на то, что модель среды в виде системы отдельных горной породы (блоков), помимо существенного приближения к реальной среде с точки зрения описания ее механических свойств, обладает еще одним важнейшим качеством. Естественное предположение о том, что существует междублочное пространство (щели между отдельностями), заполненное газом или жидкостью, сразу позволяет найти причину многочисленных электромагнитных процессов, наблюдаемых при деформировании горной породы. Сейсмоэлектрические эффекты известны давно, но до сих пор не использовались для выявления и изучения нелинейных свойств горной породы.

В связи с проблемой прогноза землетрясений в последнее десятилетие вызывают большой интерес временные изменения скоростей сейсмических волн. Установлено, что перед сильными землетрясениями уменьшается отношение скоростей продольных и поперечных волн в области очага, при этом уменьшаются и обе скорости. После землетрясения скорости восстанавливаются.

Изменение скоростей упругих волн связано с изменением напряженного состояния среды, концентрацией напряжений перед землетрясением в очаговой области. Эффекты изменения скоростей достигают единиц процентов.

В сейсмически пассивных районах изменение напряженного состояния среды связано главным образом с приливными деформациями. Хотя эти деформации составляют всего 10^{-8} — 10^{-9} , относительное изменение скоростей сейсмических волн в верхней части земной коры достигает при этом 10^{-4} . Как видно, эффект невелик, но он может быть уловлен и использован для определения коэффициента нелинейности.

Ярко выраженные аномалии полинейных свойств, связанные с залежью нефти или газа, должны дать более сильные эффекты, что позволит выявить их, несмотря на сравнительно небольшой (километры) пространственный размер.

Изучение временных изменений среды требует применения систематических просвечиваний с помощью источников, обладающих высокой стабильностью действия. Именно такими источниками и являются сейсмические вибраторы. Систематические просвечивания могут быть совмещены с изучением среды удаленными источниками. Принимая во внимание, что расстояния источник—прибор порядка сотен и первых тысяч километров будут преодолены сейсмическими просвечиваниями в самом близком будущем, приходим к выводу о целесообразности совмещения программ исследований по сейсмической разведке, с одной стороны, и по прогнозу землетрясений — с другой, так как обе задачи могут решаться с помощью единой сети стационарных сейсмических излучателей.

Проблемы сейсмической разведки и прогноза землетрясений, несмотря на различие, имеют много общего: обе нацелены на выявление пространственной неоднородности по комплексу геофизических полей как постоянных, так и изменяющихся во времени. Очаговая область характеризуется сравнительно быстрыми временными изменениями упругих свойств: неоднородность в своем развитии переживает ряд фаз и затем, после сильного землетрясения, практически исчезает. Залежь — это почти не изменяющееся во времени образование, но вместе с тем в ней происходят обратимые изменения, обусловленные действием приливных деформаций.

Идеи новых методов разведки, о которых шла речь, родились в сейсмологии в связи с задачами прогноза землетрясений. Таким образом, исследования по прогнозу землетрясений стали как бы модельными опытами по отношению к задачам сейсмической разведки. Принимая во внимание внутреннее сходство проблем, можно полагать, что и другие методы прогноза землетрясений могут быть применены для поиска и разведки залежей полезных ископаемых. В частности, точные геодезические измерения, изучение хода наклонов и деформаций, обусловленных лунно-солнечными приливами, также должны обнаруживать аномалии, связанные с залежью.

Следует отметить, что в решении задач сейсмической разведки и прогноза землетрясений техника и методика полевых наблюдений, приемы интерпретации данных отдельных методов и комплексная интерпретация — общие. Объединение усилий ученых для решения этих проблем существенно повысит эффективность научных исследований и конструкторских разработок.

Есть еще одна важная сторона обсуждаемых проблем. Новые методы сейморазведки находятся пока в самой ранней стадии своего развития. Независимо от того, насколько эффективными они окажутся в дальнейшем, они не заменят полностью методов традиционных, так как ориентированы на получение качественно иной информации о среде. Вместе с тем глубокое изучение физических явлений, связанных с распространением волн в реальных средах, позволит усовершенствовать теорию и методику интерпретации традиционных методов сейсмической разведки.

Исследования новых физических принципов сейсмической разведки начаты совсем недавно, однако сейчас уже ясно, что сейсмический метод разведки обладает большими возможностями развития в новых направлениях, что определит его научно-технический прогресс через 5–10 лет.