



Технология пассивной сейсморазведки при оценке состояния бассейнов, глубинных разломов и их эволюции

Беклемишев А.Б., Потапов О.А., Ларин Г.В., ВНИИГеофизика, г. Москва;
Буданов В.Г., ИФЗ РАН, г. Москва

ИННОВАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ

Неоспорим и экспериментально доказан следующий факт: в общем неоднородная и многофазная геологическая среда — субъект постоянно присутствующего естественного геостатического и геодинамического (волнового) нагружения. Деятельность людей, так называемые антропогенные воздействия, здесь — только один (и далеко не всегда главный) из возмущающих факторов.

Изучение полной реакции среды на естественные вариации нагружения в форме представительных временных рядов текущих значений эффективных параметров (например, интенсивности и др.) призвано осветить:

- причины локально ярких возмущений;
- доминирующие механизмы естественных движений (упругие и/или вязкие);
- позиции и геометрию очаговых зон и зон, где реакция среды на возмущение аномально интенсивна и опасна (site-effect);
- структуру и состояние среды, степень их устойчивости;
- направление и скорость структурной эволюции (обычно весьма медленной деструктуризации).

Приложение индустриальных средств сейсморазведки, наиболее широко представленных сейчас на рынке геофизических услуг, ограничено здесь в силу следующих обстоятельств:

1) концептуально индустриальные технологии базируются на упругих волновых механизмах, ограниченно пригодных в случаях заметного участия вязкой механики, и совершенно неоправданных при доминировании вязких механизмов;

2) используемые здесь приемники обладают в большинстве вертикальной направленностью, адаптированной исключительно к линейно-поляризованным одноосным движениям;

3) возможность согласования спектральных и динамических диапазонов собственных (естественных) движений поверхности среды в векторной форме и приемных аппаратных трактов сегодня отсутствует;

4) оценки интенсивности (кинетической энергии), как правило, сложно поляризованного естественного волнового движения ненадежны и часто в различной степени ошибочно занижены;

5) использование в стандартных подходах мощных зондирующих импульсов способно изменить исходную структуру среды, ее проницаемость и гидрогеологический режим, а также прочность встроенных конструкций, то есть необратимо модифицирует сам объект исследования;

6) стандартные программно-алгоритмические пакеты для обработки и интерпретации инструментальных данных слабо или вовсе не учитывают динамики поляризационных возмущений, дисперсионных характеристик и т.п.

Таким образом, давно ощущаемая потребность в соответствующем "продвинутом"

технологиях теперь формализована в перечнях качественных характеристик и технических требований к направленной модификации программно-аппаратных и методических средств изучения собственных динамических свойств среды и встроенных в нее конструкций, особенно актуальной для городских территорий и территорий промышленных зон.

Пассивная сейсморазведка, независимо развиваемая нами вслед за японскими исследователями с конца 80-х годов как метод, использующий:

- трехкомпонентные (ЗС) высокочувствительные (на 2-3 порядка превосходящие индустриальные стандарты) приемники акселерометры микросейсм;
- длинные (до 60 сек), статистически представительные, синхронизированные временные ряды в фазах (скрининг) и циклах прерывистого мониторинга (TLM);
- идентичные широкополосные (от 0,2 до 300 Гц) измерительные каналы с полным динамическим диапазоном регистрации до 132 дБ;
- свободна от вышеотмеченных ограничений индустриальных подходов.

Здесь:

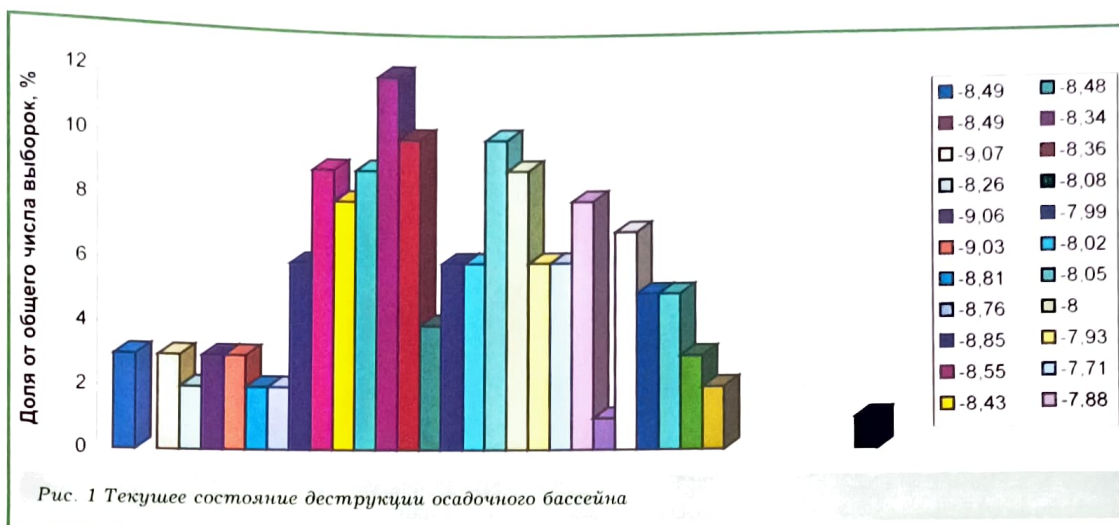
фаза TLM — временной ряд из заданного статистически представительного количества значений определенного, производного из измерений, параметра (например, нагружения-разгрузки, скорости нагружения-разгрузки и т.д.) с фиксированным шагом (обычно 0,1сек); последовательные фазы TLM во временном интервале измерений могут непрерывно следовать друг за другом или в той или иной степени перекрываться;

цикл TLM — охватывает временной ряд(ы) из фазы TLM или из последовательных фаз TLM, относящиеся к определенной позиции, дате и временному интервалу измерений, и временной промежуток (обычно многомесячный), в течение которого измерения в данной позиции прерваны.

Действительно, благодаря ЗС измерениям, пассивная сейсморазведка позволяет идентифицировать:

(1) интервалы внутри временных рядов с преимущественно линейно поляризованным или с преимущественно плоско поляризованным движением; эти интервалы соответственно должны быть связаны с объемными волнами глубинного генезиса (P, S, SV, SH) или с микросейсмными (микротремором), вызванными поверхностными источниками (волны Релея, Лива);

(2) доминирующий тип из трех возможных механизмов реакции среды на возмущение (характерный для данной позиции, даты и временного интервала): упругий, переходный вязкоупругий или вязкий, механизм первого типа — "нагружение — функция деформации" (и наоборот); механизм третьего типа — "нагружение — функция скорости деформации" (и наоборот); механизм второго типа — это сочета-



ные механизмов первого и третьего типов;

(3) участки с двумя различными устойчивыми видами дисперсии: с известным нормальным видом, характерным для упругой и, отчасти, вязкоупругой механики, когда изменение интенсивности и соответствующего сдвига доминирующей частоты в спектральной реакции отчетливо коррелированы, и с недавно экспериментально обнаруженным и мало изученным аномальным видом, когда изменения двух указанных параметров могут быть некоррелированными или слабо коррелированными, характерным, повидимому, только для вязкой механики неоднородных многофазных сред.

В предлагаемом подходе использован, таким образом, давно известный, но изрядно подзабытый с XIX в. так называемый "секрет Кили": никак иначе невозможно пробудить или усилить акустический отклик объекта кроме как на основе его самодвижения и симпатической вибрации, где симпатическая вибрация - результат согласования спектров возбуждения и передаточной функции среды. Развивая отечественную версию пассивной сейсморазведки, мы отказались от широко применяемой "событийной концепции", когда оценки вырабатываются в связи с реакцией на определенное и заметное событие (например, землетрясение или взрыв). Сначала этот отказ носил чисто гипотетический характер и основывался только на обнаруженном непрерывном характере фоновых микросейсм (микротремора). Однако, теперь весь многолетний опыт пассивной сейсморазведки, коллекции ЗС данных, собранные на геологически разнообразных объектах (различные и обширные территории Русской платформы, Балтийского шита, ЮВ Карпат и ЮВ Предкарпатья), и результаты анализа поддерживают следующий тезис: "безсобытийные" оценки эффективны и достаточно статистически устойчивы в условиях реально действующих случайных возмущений, вызывающих отклик среды всегда и везде, где производится измерение.

Разумеется, первоначально в значительной степени были использованы доступные японские источники, так как именно японским исследователям, начиная с пионерской работы Kanaï K., удалось экспериментально доказать и иногда успешно эксплуатировать связи между некоторыми спектральными параметрами

естественного сейсмического движения и геологией места измерения. Более того, ими же были получены явные свидетельства того, что степень разрушения (ущерб) при землетрясениях прямо связана с локальными геологическими особенностями. Однако, очевидно привлекательные (вследствие простоты и дешевизны) стартовые версии пассивной сейсморазведки во многих случаях оказались мало продуктивными вследствие, прежде всего, слабости теоретического обоснования, неоптимальной параметризации и неоднозначной интерпретации. Проблема эффективного комплекса параметров к настоящему моменту продвинута до значительно более устойчивых оценок пространственной автокорреляции, позволивших оптимизировать величины шага наблюдений и интервала выборки, а также спектрального соотношения горизонтального и вертикального движений (HVSR). Столь же естественно пытаться выявлять эффективные параметры через **все основные**, гипотетически действующие в среде механизмы и их математически формализованные представления. Эффективные параметры, отвечающие за тип динамической реакции среды $Y(t)$ на стационарное случайное нагружение $X(t)$ должны совпадать с постоянными коэффициентами h , k линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + 2h \frac{dY(t)}{dt} + k^2 Y(t) = k^2 X(t), \quad (1)$$

где: $Y(t)$ - отклонение от равновесного состояния;

$k^2 Y(t)$ - компонент ускорения, связанный с восстанавливающей равновесие упругой силой;

$2h \frac{dY(t)}{dt}$ - компонент ускорения, связанный с демпфирующей (тормозящей) силой;

$\frac{d^2 Y(t)}{dt^2}$ - компонент ускорения, связанный с силой инерции; F - внешняя сила; m - масса,

то есть $F/m = k^2 X(t)$. При $h > 0$, как известно, имеют место устойчивые, затухающие движения двух качественно различных типов: при $2h < k$ - периодическое (квазипериодическое) и при $2h \geq k$ - аperiодическое и гранично-аperiодическое. Диапазон значений обобщающего параметра:

ПРОГРЕС

- он и в А

Система обеспечивает устойчивую регистрацию сейсмических данных в различных климатических условиях (при температуре окружающей среды от -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$).

Обладает параметрами на уровне мировых стандартов, поддерживается сервисной службой производителя.

ОАО "СКБ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬСКОГО ЗАВОДА"

г.Саратов, ул.Крайняя, 129 т.: (8452) 64-09-51, ф.: (8452) 64-09-52

КОНТАКТИРУЙТЕ С НАМИ -

НАШ "ПРОГРЕСС-Т2" - ЭТО ВАШ ПРОГРЕСС!



**МОЩНЫЙ ИНСТРУМЕНТ
ДЛЯ ИННОВАЦИЙ**

СС-Т2

ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ
СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНАЯ
СИСТЕМА

Маррике ПРОГРЕСС

СМОРАЗВЕДОЧНЫХ
ЕМПЕРАТУРЕ

ОВ,

-

ТРОЕНИЯ"

452) 64-14-52



5 ГАРАНТИЯ
лет

ПРОГРЕСС-Т2

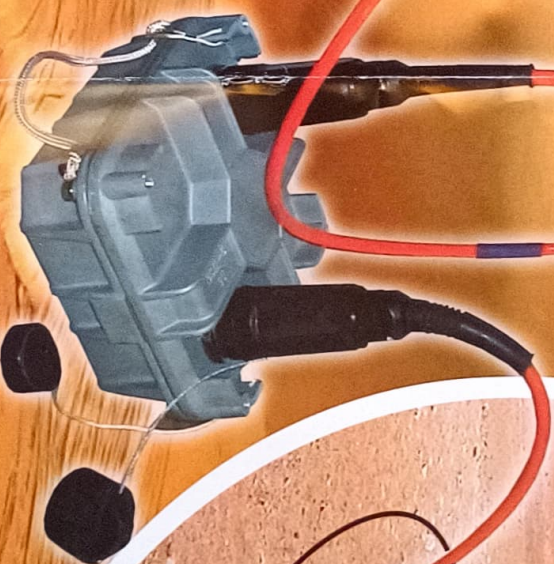
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ
ГЕЙСМОРАЗВЕДЧНАЯ
СИСТЕМА

- они в Африке ПРОГРЕСС

Система обеспечивает устойчивую регистрацию сейсморазведочных данных в различных климатических условиях (при температуре окружающей среды от - 40°С до +70°С).
Обладает параметрами на уровне мировых стандартов, поддерживается сервисной службой производителя -

ОАО "СКБ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ"
г.Саратов, ул.Крайняя, 129 Т.:(8452) 64-09-51, ф.: (8452) 64-14-52

КОНТАКТИРУЙТЕ С НАМИ -
НАШ "ПРОГРЕСС-Т2" - ЭТО ВАШ ПРОГРЕСС!



**МОЩНЫЙ ИНСТРУМЕНТ
ДЛЯ ИННОВАЦИЙ**



ИННОВАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

$$k/h = Q, \quad (2)$$

— охватывает случай, как упругой, так и вязкой механики, и допускает выбор порогового количественного критерия соответствующего типа. Величина k/h при этом пропорциональна интегральному показателю добротности Q среды (обратно пропорциональна затуханию $1/Q$).

Поскольку $X(t)$ и, следовательно, $Y(t)$ — случайные функции времени, в общем случае характеризующиеся нормальными распределениями, их исчерпывающее математическое описание — предмет корреляционной теории случайных функций, которая использована для статистической (в том числе многомерной) оценки качества результатов.

Инструментальная идентификация действующих в среде фактических механизмов нагружения-релаксации и количественная их характеристика, предусмотренные только в отечественных ТЛМ-совместимых модификациях пассивной сейсморазведки, обеспечивают этим модификациям возможность заблаговременно (до реализации проекта) прогнозировать качество индустриальной сейсморазведки и высокоточной гравиразведки, используя карты добротности. Более того, эти карты полезны на этапе проектирования для оптимизации привязки позиций сейсмоприемников и профилей к упругим участкам, а опорных гравиметрических сетей — к вязким (в последнем случае важно также учесть геометрию (и в том числе топографию) участка и локальное усиление: соответствующие волновые узлы и всплески). Безусловным результатом такого опережающего прогноза качества является улучшенная увязка (сопоставимость) мультимедийных данных и, следовательно, более надежная интерпретация.

Давно экспериментально доказано: увеличение размеров ущерба, наносимого землетрясением, связано, главным образом, с близостью к импедансно-контрастным и часто погребенным латеральным несогласиям (разломам, осыпям, крутым кромкам аллювиальных долин и т.п.) и локализуется в сравнительно узкой полосе на акустически мягкой стороне от несогласия. Положение гипоцентра и характеристики источника имеют при этом подчиненное значение. Как результат, изучение геометрии, флюидо- и газонасыщения и степени современной активности глубинных разломов, погребенных русел и древних долин (в общем,

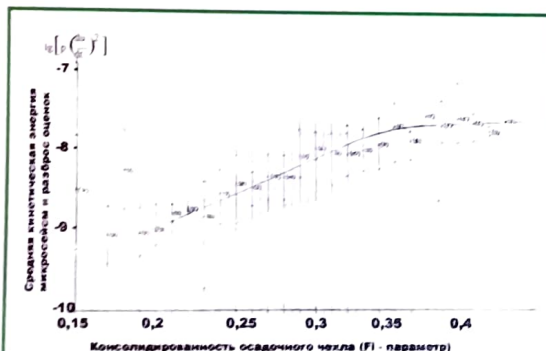


Рис. 2 Средняя кинетическая энергия микросейс и разброс инструментальных оценок

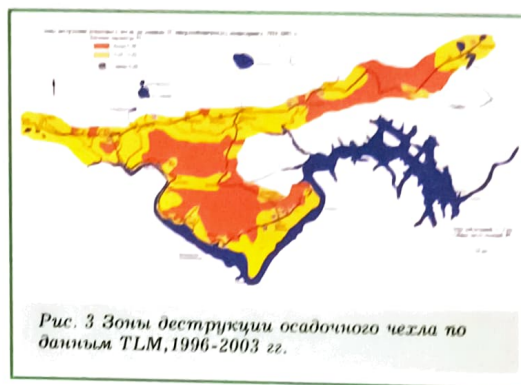


Рис. 3 Зоны деструкции осадочного чехла по данным ТЛМ, 1996-2003 гг.

деструктивных зон) — актуальнейшая задача, эффективное решение которой должно иметь, следствием оптимальную привязку на местности вновь проектируемых важнейших объектов инфраструктуры: магистральных трубопроводов, АЭС, мостов, туннелей, плотин, дамб, каналов, линий метро и т.п. Для действующих (в том числе в районах, ранее считавшихся сейсмически безопасными) объектов полезно скорректировать прогнозы локальных сейсмических рисков и рекомендации инженерного характера. И здесь карты добротности (в версии FI параметра, см. ниже) и данные ТЛМ являются эффективным инструментом.

С другой стороны интерес к глубинным разломам связан с тем, что они — главная составляющая флюидодинамической системы и, вероятнее всего, ключевой фактор, определяющий стабильность и запасы углеводородного сырья, извлекаемые объемы и эффективность средств интенсификации добычи. Именно недоучетом разломного фактора можно объяснить несовпадение прогнозируемых (на стадии разработки бассейна и/или моделирования резервуара) запасов и реально извлеченной на сегодня продукции, необъяснимое в рамках принятых и, как казалось, очевидных подходов.

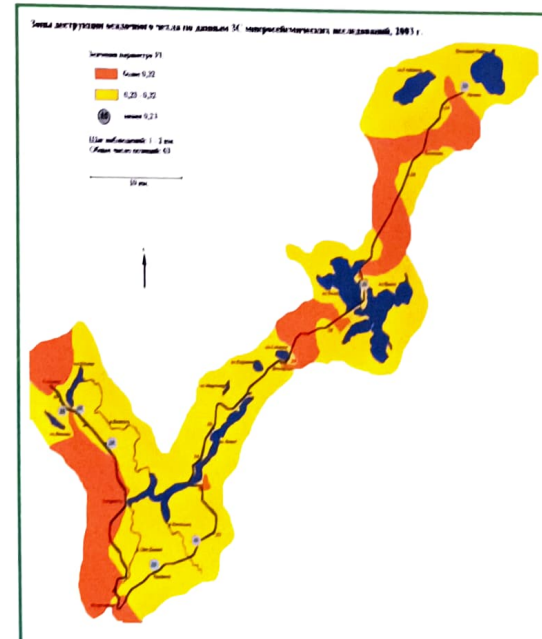


Рис. 4 Зоны деструкции осадочного чехла по данным скрининга, 2003 г.

Для реализации технологии пассивной сейсморазведки был разработан точный и высокочувствительный измерительный инструмент: трехкомпонентный (ЗС) приемник микросейсм (по чувствительности на три порядка превосходящий промышленные стандарты) типа ДВЗ-024, адаптированный к цифровой полевой регистрирующей системе из семейства "Вибротестер" и к стандартным РС-информационным технологиям. Три пьезорезистивных датчика-акселерометра, образующих ортогональную систему, имеют идентичные амплитудно-частотные спектры в диапазоне 0,2-300 Гц. Каждый датчик включен в БИС-тензометрический мост, в котором обратными связями поддерживаются условия высокой термо- и баростабильности сигнала. В результате гарантированы высокие качество и надежность ЗС-данных. Преобразованные в цифровую форму синхронизированные выборки компонент ускорения сохраняются как временные ряды и как результаты стандартного FFT-процессинга (в частотной области). Специальными программами обеспечен углубленный анализ временных рядов и спектров, продуктом которого являются: доминанты спектра и крутизна его правого среза (F1 параметр), типы поляризации и дисперсии, энергии, распределения и корреляционные оценки.

Несколько тысяч длинных инструментальных ЗС выборок собрано, начиная с 1994 года, в различных регионах Русской платформы, на Балтийском щите, на ЮВ периферии Карпатского орогена. Ниже представлены результаты обработки и интерпретации для фрагмента этой коллекции, относящегося к внутренней и периферической части Московской синеклизы (Тверская область).

На рис. 1 состояние текущей деструкции осадочного чехла представлено в форме распределения, полностью охватывающего названный фрагмент. Можно видеть, что основную долю в распределении составляют данные, характеризующиеся преобладающей упруго-вязкой Maxwell-механикой ($0,23 < F1 < 0,32$). Существенная доля в распределении принадлежит умеренно упругой ($0,35 > F1 > 0,32$) и упругой ($0,49 > F1 > 0,35$) Forsyth-механике. Число установленных упругих ($0,49 > F1 > 0,35$) и вязких ($0,15 < F1 < 0,23$) случаев минимально, но первое превалирует над вторым.

Кинетическая энергия $lg \left[\rho \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \right]$ и F1

- параметр коррелированы (рис. 2), причем минимальная энергия со средними уровнями вблизи -9 характеризует предельные вязкие случаи, а максимальная, с уровнями вблизи -7, - предельные упругие случаи. Количественно обозначенные выше границы упругой, умеренно упругой, упруго-вязкой и вязкой механики определены позициями, в которых существенно изменяется величина

$$d \left\{ lg \left[\rho \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \right] \right\} / d(F1).$$

В итоге имеет место следующая интер-

претация: современная деструктивная геологическая история бассейна является в значительной мере незавершенной, хотя реликтовый статус ($F1 \approx 0,43-0,49$) утрачен, а темпы эволюции отдельных фрагментов бассейна весьма различны.

На рис. 3 (TLM) и 4 (скрининг) представлены карты заданных выше диапазонов F1 параметра. Интенсивная окраска отражает участки, в пределах которых стандартные средства сейсморазведки принципиально способны удовлетворить высокие требования по качеству структурных исследований. В то же время эти участки непригодны для размещения опорных пунктов высокоточной гравиметрии. Участки иной окраски, и, особенно, ограниченные овалами, в той или иной степени проблемны с точки зрения качества стандартных средств сейсморазведки, но в их пределах возможно, подбирая позиции с минимальными энергиями и F1, размещать опорные гравиметрические пункты.

Можно видеть также, что вязкие зоны деструкции в осадках (см. овалы) сгруппированы в почти линейных кластерах, общая направленность которых координирована с речными долинами. Логично предположить, что форма производных кластеров есть проявление унаследованного осадочной формацией глубинного разлома.

По крайней мере, три участка (рис. 3): вблизи Каблуково, Юрьево-Девичье и, особенно, Харитоново, являются опасными как потенциальные носители сайт-эффекта. Здесь кинетическая энергия микросейсм экстраемально высока во всех фазах и циклах TLM. Характерно, что сайт-эффекты прогнозируются в позициях, где расстояние между предельно вязкой и предельно упругой средой минимально, то есть в области, где периферия жесткой плиты имеет максимально возможную свободу движения. В условиях избыточного водонасыщения, согласно П.А. Ребиндеру, быстро нарастает усталость материала на периферии плиты и деструктивный процесс ускоряется.

На рис. 4 также можно видеть пять инструментально выделенных вязких деструктивных зон и два участка потенциальных сайт-эффектов (между озерами Боталы и Отолов).

Прогноз времени активизации сайт-эффектов возможен на базе изучения платформенных микросейсмических ритмов.

Авторы признательны Российскому фонду фундаментальных исследований РФФИ за многолетнюю, начиная с 1994 года, финансовую поддержку экспедиционных работ.

Литература:

1. A.B. Beklemishev, O.A. Potapov, G.V. Larin, V.G. Boudanov, V.B. Dubovskoy, A.A. Kaluguine "Basin status, deep faults and their evolution are produced from passive seismic exploration" Workshop on preparation of large scale fault zone map of Tehran area and guidelines for civil construction. Tehran, Iran, 2004.