

А.Б. Беклемишев

ПРОГНОЗ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ЧЕРЕЗ ОПЕРЕЖАЮЩИЙ ЗС МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ СКРИНИНГ

Континуальные, трансверсально-изотропные и упругие приближения сред в реальной сейсморазведке, к сожалению, не всегда корректны. Действительно, геологическая среда в общем гетерогенна, весьма неоднородна по структуре, вещественному и фазовому составу, содержит помимо упругих и упруго-вязких образований макроскопические вязкие включения, вклад которых в регистрируемое волновое поле, в состав и степень проявления доминирующих мод движения и, наконец, степень влияния которых на качество сейсмических построений еще не вполне изучены. В обычной практике латеральные границы вязких включений могут быть заподозрены лишь иногда и по некоторым косвенным признакам, проявляющимся на стандартных сейсмических временных (скоростных, глубинных) разрезах и картах. К числу таких признаков относятся:

- локальные разрывы в пространственной корреляции выявленных границ в обычно многослойной геологической формации бассейна;
- значительное уменьшение амплитуд (энергий) в сейсмическом волновом поле вблизи и, особенно, внутри зоны вязких включений (например, в водонасыщенной зоне глубинного разлома);
- характерные изменения формы или степени устойчивости формы функций авто- и взаимной корреляции сейсмических трасс с сокращением дистанции до границы вязкого включения.

Названные признаки обнаруживаются лишь при обработке и анализе данных, то есть это «предупреждение» о преимущественно неупругом характере процессов возмущения – релаксации на определенных участках среды явно запаздывает (финансовые и иные ресурсы, обеспечившие проектирование и сбор данных на этих участках, уже истратчены, а эффективность этих затрат может быть оспорена).

Почему? Дело в том, что континуальная, упругая аксиоматика, принятая в сейсморазведке, здесь, по крайней мере, спорна. И, как следствие, полученные данные ненадежны. Тем не менее, их присутствие в соответствующих базах данных спо-

собствует лавинообразному росту информационных объемов сейсморазведки, которая интенсивно развивается в версиях 3D-4D технологий, используя как вертикальные, так и горизонтальные (все три компонента полного вектора, ЗС модификации) движения поверхности наблюдений. А количественный рост информации небезопасен в свете печально знаменитого, но дидактически почти забытого «эффекта Перл-Харбора»: *избыточность информации без учета степени ее надежности – существенное препятствие для эффективной интерпретации.*

Качественная и целенаправленная селекция имеющихся и продолжающих накапливаться информационных ресурсов сейсморазведки по степени их надежности может быть реализована в традиционной, развивающейся и перспективной формах, а также в сочетаниях этих форм.

Традиционной формой предусмотрены, как известно, фильтрация данных (например, частотная или пространственно-временная), включая мьютинг в качестве предельного варианта, и преобразования данных (например, миграционные) к видам скоростного, временного и/или глубинного разреза (сечения) среды.

Развивающаяся (и дополняющая традиционную) форма связана с попыткой использовать поляризационные параметры и поляризационные фильтрующие операторы, производные из трех синхронных ортогональных (X, Y, Z) временных рядов сейсмического движения. Принципиально поляризационные параметры различны для плоско- (или более сложно пространственно-) поляризованных и для линейно поляризованных движений полного вектора. И, если ранее распознавание полей: P- и PS-волн; S- и SP-, SV-, SH-волн; поверхностных волн Релея, Лява, псевдорелеевских – опиралось главным образом на резкие изменения в интенсивности полей (как правило, вертикальных движений) в соответствии с прогнозируемым их относительным запаздыванием, то теперь объективности распознавания способствует также оценка поляризационных параметров по полному вектору движения (разумеется, в заданном временном окне). Роль вероятных возмущений по-

ляризационных параметров (вследствие, например, интерференционных явлений) может быть исключена или, по крайней мере, ослаблена здесь статистическими средствами.

Две упомянутые формы селекции реализуются по имеющейся информационной базе в недекларируемом, но угадываемом предположении равной надежности всех составляющих ее данных, определенных как упругой, так и вязкой механикой реальных реакций среды на возмущение.

Строя перспективную форму контроля надежности не только для промежуточных и конечных результатов исследования, но и включая сюда правомерность постановки работы на конкретной территории, естественно пытаться заблаговременно и оперативно выявить эффективные параметры среды через *все основные*, гипотетически действующие механизмы ее нагружения – релаксации и их математически формализованные представления.

Эффективные параметры, отвечающие за тип одноосной (например, по X оси) динамической реакции среды $X_2(t)$ на стационарное случайное (например, постоянно присутствующее повсюду микросейсмическое) нагружение $X_1(t)$ должны очевидно совпадать с постоянными коэффициентами – параметрами h , k неоднородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2 X_2(t)}{dt^2} + 2h \frac{dX_2(t)}{dt} + k^2 X_2(t) = k^2 X_1(t), \quad (1)$$

где: $X_2(t)$ – отклонение от равновесного состояния, $k^2 X_2(t)$ – компонент ускорения, связанный с восстанавливающей равновесие упругой силой, $2h \frac{dX_2(t)}{dt}$ – компонент ускорения, связанный с демпфирующей (тормозящей) силой, $\frac{d^2 X_2(t)}{dt^2}$ – компонент ускорения,

связанный с силой инерции, F – внешняя сила, m – масса, то есть $F/m = k^2 X_1(t)$. При $h > 0$, как известно, имеют место устойчивые, затухающие движения двух качественно различных типов: при $2h < k$ – периодическое и при $2h \geq k$ – аperiodическое и гранично-аperiodическое. Случай $h = k$ определен как **критическое демпфирование**, а величина h/k определена как **относительный коэффициент демпфирования**. Диапазон значений параметра:

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

очевидно, охватывает случаи 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 или обратно пропорциональна **коэффициенту затухания**:

$$\omega_0 h/k \sim 1/Q, \quad (3)$$

где ω_0 – **собственная частота** (рад/С) колебательной системы.

Поскольку одноосное микросейсмическое возмущение $X_1(t)$ и, следовательно, реакция $X_2(t)$ – случайные функции времени, в общем случае характеризующиеся нормальными распределениями, их исчерпывающее математическое описание – предмет корреляционной теории случайных функций, которую следует использовать для количественной (в том числе многомерной) характеристики оценок. Понятно, что одноосные движения в направлениях двух других осей координатной системы (Y и Z) могут быть охарактеризованы аналогично. Как результат, эмпирические распределения оценок (2) могут быть получены для всех трех компонент вектора смещения (скорости, ускорения).

Свойства и классификация решений уравнения (1), сопоставленные и согласованные с экспериментальными оценками, также должны исчерпывающе отвечать на вопрос: с каким из трех следующих видов геологической среды – интегрально **упругим**, **упруговязким** или **вязким** сталкивается исследователь в конкретной позиции. Второй из перечисленных видов является, по-видимому, особенно характерным и распространенным в условиях глубокой платформы, осадочного бассейна. Можно ожидать, что третий вид, обусловленный избыточно обводненными зонами деструкции и разломами, является в условиях платформы следующим по значимости и распространенности. Наконец, первый (предельный, близкий к идеальной упругости) вид вряд ли является повсеместно и широко представленным на платформе, так как характеризует скорее реликтовые свойства протоструктуры, приобретенные ее породами непосредственно после завершения стадии литификации и отчасти утраченные в процессе последующей, обычно деструктивной, эволюции.

Передаточная функция есть, как известно [1], частотнозависимое усиление колебательной системы, то есть отношение ее «выхода» к ее «входу», выраженное, например, в децибелах. Эта функция обозначена как $V/E = AЧХ(\omega/k)$, где ω – круговая частота, k – упругость вдоль определенной координатной оси, V и E – спектры смещений: соответственно для функций $X_2(t)$ и $X_1(t)$, и аналитически выражена в следующем виде:

$$AЧХ(\omega/k) = \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{k^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{k^2} \frac{h^2}{k^2} \right]^{-1/2}. \quad (4)$$

На рис. 1 представлено семейство кривых $AЧХ(\omega/k)$ для различных значений обобщенного параметра k/h , обратного относительному коэффициенту демпфирования. При $k/h > 3$ $AЧХ(\omega/k)$ имеют отчетливый «одноимодовый» или резонансный, характер; в диапазоне $3 > k/h > 1,6$ $AЧХ(\omega/k)$ имеют сла-

бо выраженный экстремум на нормированной частоте $0,9 > \omega/k > 0,6$ соответственно; в диапазоне $1,6 > k/h > 1$ АЧХ(ω/k) характеризуются постепенным спадом, правее нулевой частоты. При этом вблизи $k/h = 1$ и правее $\omega/k = 1$ имеет место почти логарифмически линейная зависимость спада от ω . Для АЧХ(ω/k) существует понятие о полосе пропускания $\Delta\omega = \omega_{вч} - \omega_{нч}$, границы (срезы) которой со стороны нижних $\omega_{нч}$ и верхних $\omega_{вч}$ частот определены условием:

$$АЧХ(\omega_{нч}) = АЧХ(\omega_{вч}) = \varepsilon АЧХ_{\max},$$

где $\varepsilon < 1$ и обычно $\varepsilon = 0,707$.

Особенности линейных систем зависят от наклона (крутизны) АЧХ(ω/k) при переходе из полосы пропускания к области непропускания (например, у правого среза). Констатируем: крутизна АЧХ(ω/k) – переменна и зависима как от ω , так и от k/h . Для практических однозначных оценок имеет смысл говорить далее о значении крутизны, имея ввиду в первую очередь многооктавный правый срез АЧХ(ω/k) и, особенно, вблизи экстремума. При этом, чем выше крутизна среза эмпирической АЧХ(ω/k), тем большее значение k/h должно ей соответствовать.

В природном механизме волнового процесса действуют кроме того обратные связи, являющиеся обычно пространственно неопределенными, частотно зависимыми и запаздывающими функциями возмущения. Посредством обратных связей, то есть путем возврата в среду некоторой части поступившей к поверхности микросейсмической энергии (эхо), вид среза АЧХ(ω/k) и эффективная ширина спектральной реакции (на уровне 3 db) могут быть существенно модифицированы. Как теория, так и опыт свидетельствуют о том, что в реальности зафиксированный на рис. 1 вид среза является лишь приближением в среднем. Несколько устойчивых для конкретной позиции измерения «регенеративных всплесков» и разделяющих «провалов» на правом срезе АЧХ(ω/k) характеризуют реальные флуктуации среза относительно его среднего вида. При этом формы огибающей «регенеративных всплесков» и осредненного правого среза близки друг к другу. Технологически более удобны оценки крутизны правого среза по огибающей «регенеративных всплесков» (так называемый FI-параметр [2]).

Левый однооктавный срез АЧХ(ω/k) имеет место только для случаев, когда $k/h > 1$. Таким образом, надежное обнаружение в эмпирической АЧХ(ω/k) наличия как правого, так и левого срезов является доказательством реально упруговязкой (в предельном случае – идеально упругой) среды в позиции измерений. Наоборот, отсутствие левого среза в АЧХ(ω/k) есть экспериментальное доказательство реально вязкой среды.

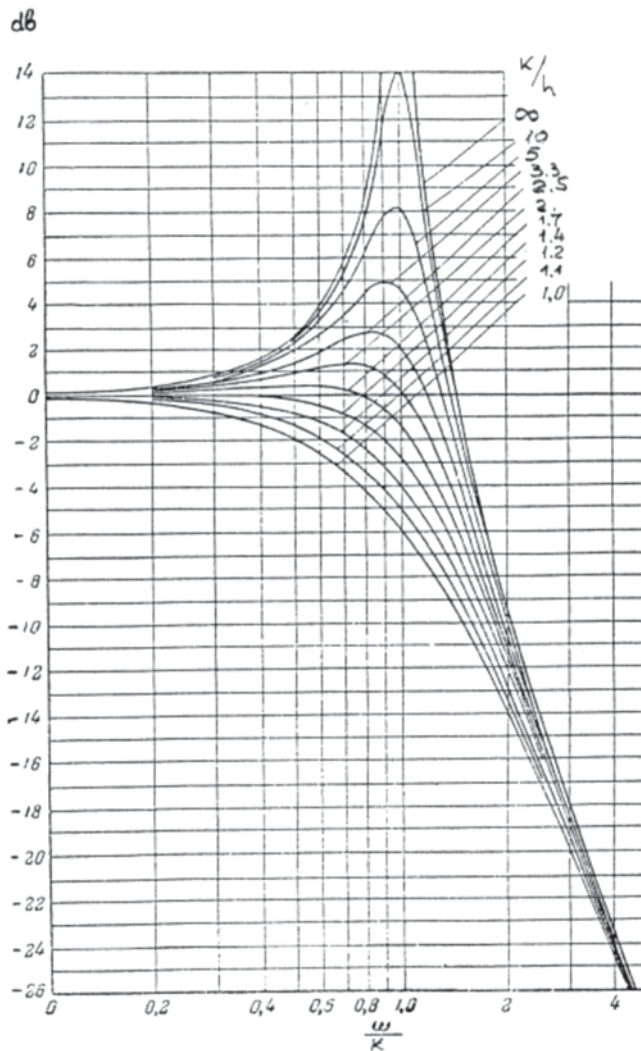


Рис. 1. АЧХ (ω/k) для различных значений относительного коэффициента демпфирования

Чтобы представить действительные временную и соответствующую спектральную реакцию упругой среды на краткий по продолжительности возмущающий импульс (скорости смещения), воспользуемся данными инструментальных измерений на многометровых плитных моделях, заимствованными из публикации корпорации Newport [3]. На рис. 2а можно видеть временные развертки возмущающего импульса (вертикальное движение) и соответствующей упругой реакции, зафиксированной на поверхности плиты (типа RS512-12 table top), существенно более длительной. Энергетические спектры E и V для возмущающего импульса $X_1(t)$ и для реакции $X_2(t)$ соответственно (б) представлены здесь вместе с результирующей передаточной функцией (в), полученной делением спектральной реакции поверхности на спектр входного импульса, то есть V/E . Из анализа представленных результатов следуют несколько важных для дальнейшего заключений.

1. Сравнение форм: передаточной функции V/E (в), обобщенной микросейсмической спектраль-

ной реакции и теоретической спектральной реакции фильтра нижних частот – см., например, решение уравнения (1) для случая $k/h \approx 2$ – указывает на их тождественность с точностью до масштаба, особенно, вблизи максимума.

2. Спектральная форма для импульса $X_1(t)$ – менее выраженная, менее контрастная, менее «окрашенная», чем спектральная реакция на поверхности для $X_2(t)$; для временных форм имеет место обратная картина.

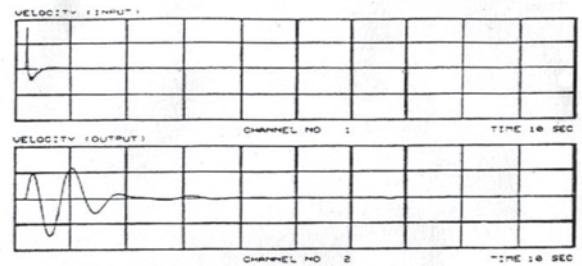
3. Наличие у функции (в) левого плато – свидетельство устойчивых и идентичных (по крутизне, ≈ 30 дБ/окт, и по уровням) левых срезов спектральных реакций на поверхности и возмущающего импульса (соответственно **V** и **E**).

4. Наличие экстремума функции (в), точно совпадающего (по частоте) с таковым для спектральной реакции на поверхности **V**, указывает на доминирующую роль последней в формировании отклика.

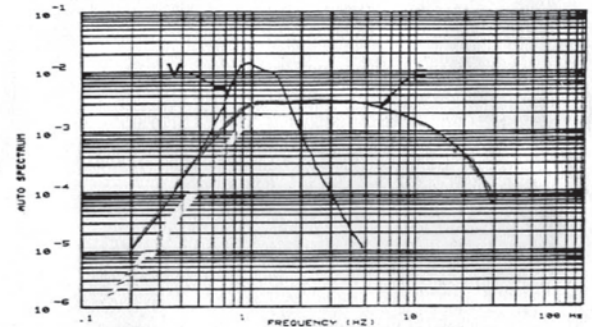
5. Эмпирический экстремум (в), равный 2,6, доказывает установленную выше только теоретически возможность локального относительного превышения спектральной реакции на поверхности над спектром возмущающего импульса (то есть $V/E > 1$ на частотах вблизи экстремума).

6. Правый срез производной функции (в) имеет переменную крутизну, связанную с особенностями формы спектров **V** и **E**, и более пологий, чем у спектральной реакции поверхности (ср. ≈ 6 дБ/окт в области 1–4,5 Гц и 20 дБ/окт правее 4,5 Гц против ≈ 40 дБ/окт для соответствующего среза спектра **V**). «Регенеративный всплеск» вблизи 1,5 Гц ухудшил резонансные характеристики (эффективную упругость) среды как колебательной системы, но одновременно придал спектру **V** и передаточной функции **V/E** особые выразительные свойства, связанные с геометрией реально не безграничной и не идеально упругой плиты, с конкретной позицией точки измерения на ее поверхности и т.д.

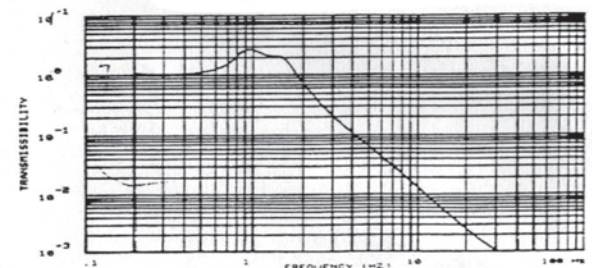
Скважинные данные, традиционно и независимо заверяющие геофизические прогнозы, позволяют констатировать устойчивую контркорреляционную связь между мощностью мягких осадков ВЧР (поверх кровли коренных пород) и доминирующей частотой микросейсмической спектральной реакции. На рис. 3 представлено пространственное распределение покомпонентных микросейсмических ускорений на севере Тверской области, сопоставленное в двух позициях с глубиной кровли первой жесткой границы (известняки Подольской свиты, C2 PD). Увеличение доли жесткой упругой составляющей в геологическом разрезе при сокращении мощности мягкой ВЧР (моренные четвертичные отложения, Q) от скважины 1 к скважине 2 приводит к увеличению



1 — When excited by an impulse (above) using a hydraulic, an RS512-12 table top has a rapidly decaying vertical time response (bottom curve).



2 — The frequency content, or autospectrum, of the response is shown for both the excitation impulse (E) and the system response (V).



3 — System vertical transmissibility, as a function of frequency, is obtained by dividing the output autospectrum by its input spectrum.

Рис. 2. Импульсное возмущение $X_1(t)$ и реакция среды $X_2(t)$ как соответствующие скорости вертикального смещения во временной области – а, как соответствующие спектры **E** и **V** в частотной области – б, передаточная функция системы для вертикальных движений, **V/E** – в [3]

параметра k/h и, соответственно, к правому сдвигу пика спектральной реакции в строгом согласии с переходом от более низкой составляющей семейства реакций на рис. 1 к приподнятой. Хотя время здесь не является константой (а растет вместе с номерами сканируемых позиций), это подтверждение теории наблюдается как на вертикальном (а), так и на синхронизированных горизонтальных (б) компонентах микросейсмического ускорения, причем на последних почти столь же ярко. Действительно, отношение частот для двух упомянутых позиций скрининга: $28/55 = 0,51$ (а) и $59/111 = 0,53$ (б). Пространственное распределение мгновенных и средних уровней микросейсмических ускорений представлено здесь квадратами и прерывистой кривой соответственно (масштаб измерений был изменен вдвое в позиции 45, см. различные, левую и правую, верти-

кальные шкалы). Можно видеть, что в среднем вблизи скважины 1 вертикальный компонент ускорения более, чем в 3,5 раза, превалирует над горизонтальными, а вблизи скважины 2 это превалирование больше, чем порядок (15 : 1,2). Как результат, с высокой степенью достоверности можно заключить, что, по крайней мере, вблизи скважин 1 и 2 в ЗС микросейсмических выборках наблюдались согласно (4.6) преимущественно линейно поляризованные (ранг поляризационной матрицы практически равен единице) микросейсмические, связанные с волнами глубинного генезиса.

Выводы

Инструментальная идентификация действующих в среде фактических механизмов нагружения-релаксации и количественная их характеристика предусмотрены только в отечественных модификациях (ЗС микросейсмический скрининг и прерывистый мониторинг) пассивной сейсморазведки и обеспечивают этим модификациям возможность заблаговременно (на предпроектном этапе, то есть до реализации индустриального проекта) прогнозировать качество сейсморазведки и высокоточной гравиразведки, используя карты добротности. Более того, эти карты полезны на этапе проектирования для оптимизации привязки позиций источников, сейсмоприемников и профилей к упругим участкам, а опорных гравиметрических сетей – к вязким (в последнем случае важно также учесть геометрию участка и локальное усиление, замеченное еще Гутенбергом [4]: соответствующие волновые узлы и всплески). Безусловным результатом такого опережающего прогноза качества среды являются повышение обоснованности и результативности проектов сейсморазведочных и гравиметрических исследований, улучшенная увязка (сопоставимость) мультидисциплинарных данных и, следовательно, более надежная интерпретация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов О.Л. Методы разведки и контроля за разработкой нефтяных залежей, основанные на регистрации акустических и термоакустических полей

в средах, пересеченных обсаженными скважинами, Докт. дисс., Фонды ВНИИГеосистем, М., 1974.
 2. Беклемишев А.Б., Потапов О.А., Ларин Г.В., Буданов В.Г. Технология пассивной сейсморазведки при оценке состояния бассейнов, глубинных разломов и их эволюции, Приборы и системы разведочной геофизики, 02, изд. СО ЕАГО, Саратов, 2004.
 3. Metric Catalog Supplement № 400, Newport Corp., 1985.
 4. Gutenberg B. The amplitudes of waves to be expected in seismic prospecting, Geophys., № 2, 1936.

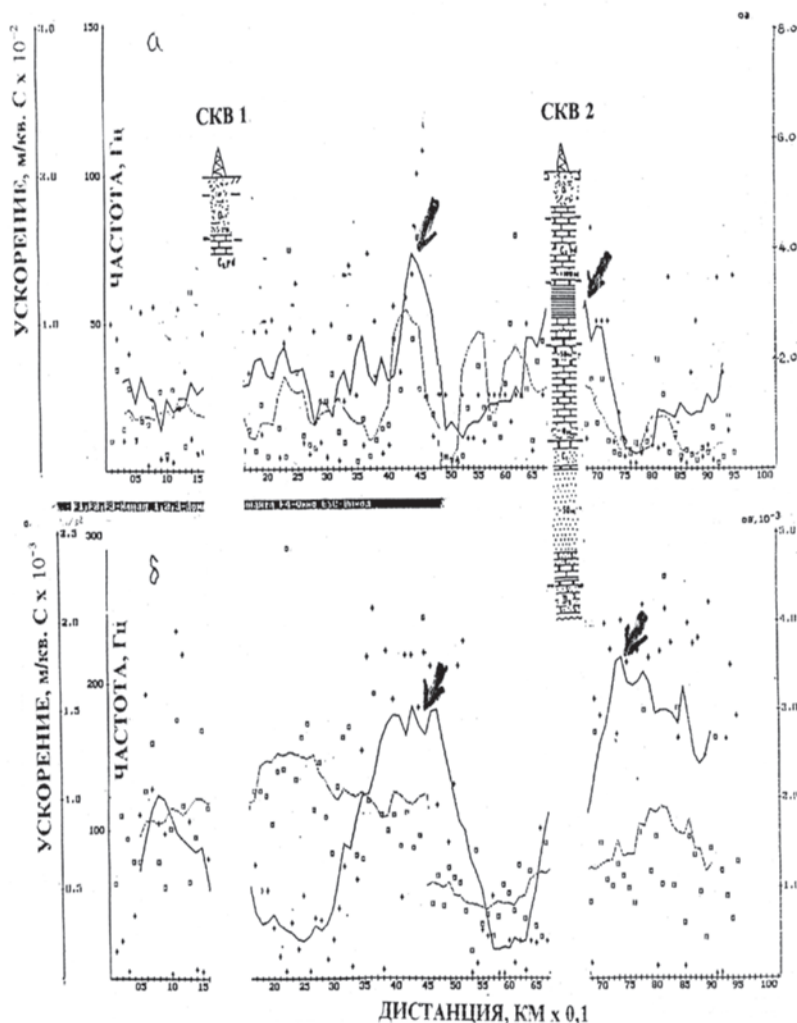


Рис. 3. Пространственное распределение (вдоль 10 км профиля) двух параметров вертикального (а) и горизонтального (б) компонента микросейсмического ускорения: доминирующей частоты АЧХ (кресты) и соответствующего пикового уровня (квадраты). Вариация средних значений представлена соответственно сплошной и пунктирной кривой. Две разные шкалы ускорений (справа и слева) потребовались из-за изменения усиления при регистрации точке 45. Скважинные данные (скв. 1 и 2) допускают здесь интерпретацию характеристик распределений в связи с мощностью моренной приповерхностной толщи