



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМЫ ReapakRK+

Д. И. Рудницкая*, М. В. Корнилов*, И. Н. Стражникова**

Система ReapakRK+ относится к сейсмоинверсионным методам обработки сейсмических данных. В статье описаны способы разделения волновой сейсмической записи на сверточные компоненты: элементарный сигнал и импульсную характеристику среды. Обоснован метод кластеризации этих характеристик и расчет по ним динамических и структурных Reapak-атрибутов: отраженной энергии, доминирующего знака коэффициентов отражения, числа, размеров и наклонов отражателей (отражающих границ и площадок) и других атрибутов. Получаемая дополнительная сейсмическая информация повышает надежность геологических построений на всех этапах исследований: региональном, поисковом, локальном.

Ключевые слова: система ReapakRK+, сейсмическая инверсия, элементарный сигнал, разрез ЭКО, Reapak-атрибуты.

THEORETICAL AND ALGORITHMIC BASIS OF THE ReapakRK+ SYSTEM

D. I. Rudnitskaya, M. V. Kornilov, I. N. Strazhnikova

The ReapakRK+ system belongs to inversion methods of seismic data processing. The paper describes techniques for separating a wave seismic record into convolutional components, that is a wavelet and pulse response of medium. The method of clustering of these characteristics and subsequent calculating of dynamic and structural Reapak-attributes from them is founded. The attributes are: reflected energy, predominant sign of reflection coefficients, number, sizes and slopes of reflectors (reflection boundaries and sites) and other attributes. The additional seismic information makes geological constructions more reliable at all phases of studies: regional, prospecting, and local.

Key words: ReapakRK+ system, seismic inversion, wavelet, ERC section, Reapak-attributes.

Одним из путей повышения эффективности сейсмических исследований является дальнейшее развитие методов сейсмической инверсии. В основе этих методов (ПАК, VELOG, STRATA и др.) лежат способы разделения волновой записи на сверточные компоненты – элементарный сигнал и импульсную характеристику среды. Их применение повышает разрешенность сейсмической информации, дает оценки акустических характеристик границ пластов и тонкослоистых пачек. В свою очередь, это является основой для решения обратной динамической задачи – расчета акустических импедансов и скоростей распространения сейсмических волн в тонких пластах по коэффициентам отражения на их границах, а также последующей оценки литологических характеристик разреза и емкостных параметров пластов-коллекторов.

Система **ReapakRK+** – одна из действующих сейсмоинверсионных технологий [7]. Данные для входа в систему – временные либо глубинные сейсмические разрезы, полученные любым методом реализации волнового продолжения, в том числе суммированием по ОГТ. Основными стадиями технологического процесса являются статистический способ определения элементарного сигнала и два приближенных способа инверсионных преобразований волновой сейсмической записи: нелинейный способ последовательных вычитаний и линейный способ последовательных

приближений. В первом случае сейсмоакустический разрез аппроксимируется разрывной пластовой моделью, во втором – гладкой. Результат первой стадии сейсмической инверсии представлен в виде трасс эффективных коэффициентов отражения (ЭКО).

Последующая кластеризация этих трасс, фактически выполняющая функцию автоматической корреляции границ ЭКО, преобразует разрез ЭКО, структурированный по трассам, в разрез системы отражателей, записанных в координатах $2t_0, x$. Эта трансформация разреза позволяет выполнять расчеты его динамических и структурных характеристик. В скользящих окнах кластеризованного разреза рассчитывают Reapak-атрибуты: отраженную энергию (средние значения коэффициентов отражения), доминирующий знак коэффициентов отражения, плотность заполнения среды отражателями (число отражателей), средние и суммарные размеры отражателей, наклоны отражателей и их дисперсию. Поля Reapak-атрибутов, представленные в координатах $2t_0, x$, визуализируют в цветной палитре с «подложкой» отражателей (границ, площадок). Таким образом, высоко разрешенная визуальная информация о строении геометрических элементов разреза совмещается с количественными оценками его динамических и структурных характеристик. Расчет Reapak-атрибутов расширяет информационное пространство сейсмических данных, позволяя определять количественные критерии идентификации геологических элементов разреза.

* ФГУП «СНИИГГиМС» (Новосибирск),

** НГУ (Новосибирск)



Определение элементарного сигнала

Для расчета элементарного сигнала непосредственно по сейсмическим данным использован статистический способ накопления [3, 4, 8]. Сущность его заключается в следующем.

Рассмотрим простейшую одномерную модель сейсмической записи, состоящую из однопериодных (в данном случае продольных) волн, пренебрегая влиянием фактора поглощения и наличия случайных помех:

$$F(t) = f_0(t) * u(t), \quad (1)$$

где $f_0(t)$ – элементарный сигнал, $u(t)$ – импульсная реакция среды.

Предположим, что элементарный сигнал полупериодный, обладает одноэкстремальным спектром, основная энергия которого находится в ограниченном диапазоне частот. Импульсная реакция состоит из последовательности обобщенных функций вида

$$u(t) = \sum_m K_m \delta(t - \tau_m). \quad (2)$$

При этом предполагается, что τ_m подчинены равномерному распределению, а K_m – закону распределения Пуассона с нулевым средним.

Способ накопления состоит в следующем. Учитывая (1) и (2), определим среднее значение из суммы отрезков сейсмограммы – выборки одинаковой длительности: $T_{i+1} - T_i = \Delta T_i$, где $i = 1, 2, \dots$,

$$\begin{aligned} f_{\Sigma}(t) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_{i+1}} f_0(\tau) u_i(\tau - t) d\tau = \\ &= \frac{1}{N} \int_{T_i}^{T_{i+1}} f_0(\tau) \sum_{i=1}^N u_i(\tau - t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

В случае равномерного или Пуассоновского распределения импульсов с первым моментом, равным нулю, имеем $f_{\Sigma}(t) \rightarrow 0$ при возрастании количества выборок N .

Если во всех выборках выделить доминирующие волны, привести их к одной полярности и при суммировании исключить временные сдвиги между ними (привести к одному времени t_{pi}), то произойдет накопление сигналов относительно фиксированного момента t_{pi} . В остальные моменты, как и ранее, при $N \rightarrow \infty$ $f_{\Sigma}(t) \rightarrow 0$.

В результате некоторых преобразований (1–3) [8] получаем $\bar{f}_{\Sigma}(t) = \bar{K}_p f_0(t_i)$, т. е.

$$\bar{f}_0(t) = \frac{1}{\bar{K}_p} \bar{f}_{\Sigma}(t),$$

где \bar{K}_p – среднее значение амплитуд импульсов, по которым определяется элементарный сигнал $\bar{f}_0(t)$

$$\bar{K}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{ip}.$$

Таким образом, путем накопления выборок можно получить оценку элементарного сигнала произвольной формы.

Следует отметить, что в построении алгоритма применительно к реальным сейсмическим

трассам самым ответственным моментом является определение времен вступления наиболее интенсивных волн. Поэтому при суммировании волновых пакетов вводится предположение о возможности представления сейсмической трассы в виде отдельных волновых пакетов. Начало каждого волнового пакета можно привести в соответствие с моментом вступления первой интенсивной волны. Тогда моменты вступления сигналов можно определить по точкам максимального роста градиента экстремальных амплитуд [4]:

$$f(t_{pi}) = \Delta a_i / \Delta t_i = (|a_i| - |a_{i-1}|) / (t_i - t_{i-1}),$$

где a_i – амплитуда в точке экстремума колебательного процесса.

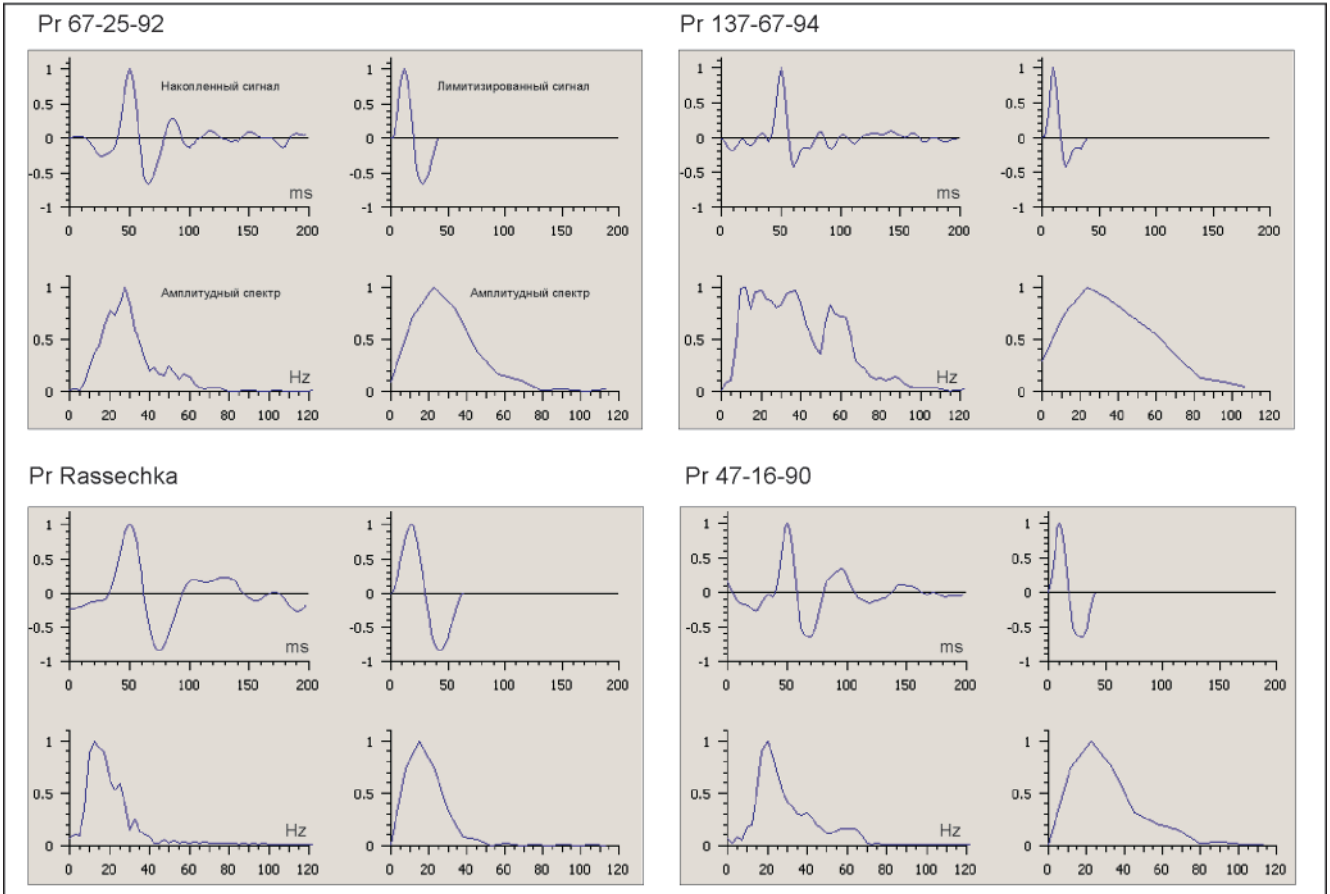
Таким образом, в основе алгоритма определения формы элементарного сигнала заложен способ накопления. Он реализован путем суммирования волновых пакетов (выборки из сейсмических трасс), в которых первые волны приведены к единичным амплитудам, одной полярности и одинаковому времени вступления. Времена вступления пакетов определяются по максимальным значениям прироста градиента экстремальных амплитуд. Суммирование таких выборок в заданных интервалах времени по заданному количеству трасс дает оценку формы элементарного сигнала.

Протяженность суммируемых пакетов должна быть больше ожидаемой протяженности элементарного сигнала. Для надежности результатов накопления интервал, в котором набираются пакеты для суммирования, должен обеспечить их достаточное количество (при обязательном соблюдении условия их случайной структуры). Лимитизация накопленного сигнала при использовании его как ядра оператора при сейсмоинверсионных преобразованиях – необходимая процедура для исключения недокомпенсированной шумовой компоненты. По форме элементарного сигнала и его лимитизированного аналога определяют их амплитудные и фазовые спектры.

В процессе работы всех предыдущих версий системы Реапак, реализующих данный способ накопления элементарного сигнала, были выполнены многочисленные проверки надежности используемого способа. Поскольку в элементарном сигнале заложена информация об условиях возбуждения и приема сейсмических колебаний, а также о процедурах обработки сейсмических данных, надежность его определений была подтверждена в результате специальных исследований на моделях и на реальных материалах, полученных при разных условиях наблюдений и для разных методов их обработки. В качестве примера на рис. 1, а показаны сигналы, полученные по сейсмическим разрезам, которые характеризуются разным частотным составом, а на рис. 1, б – элементарные сигналы, полученные в разных интервалах одного и того же разреза.



а



б

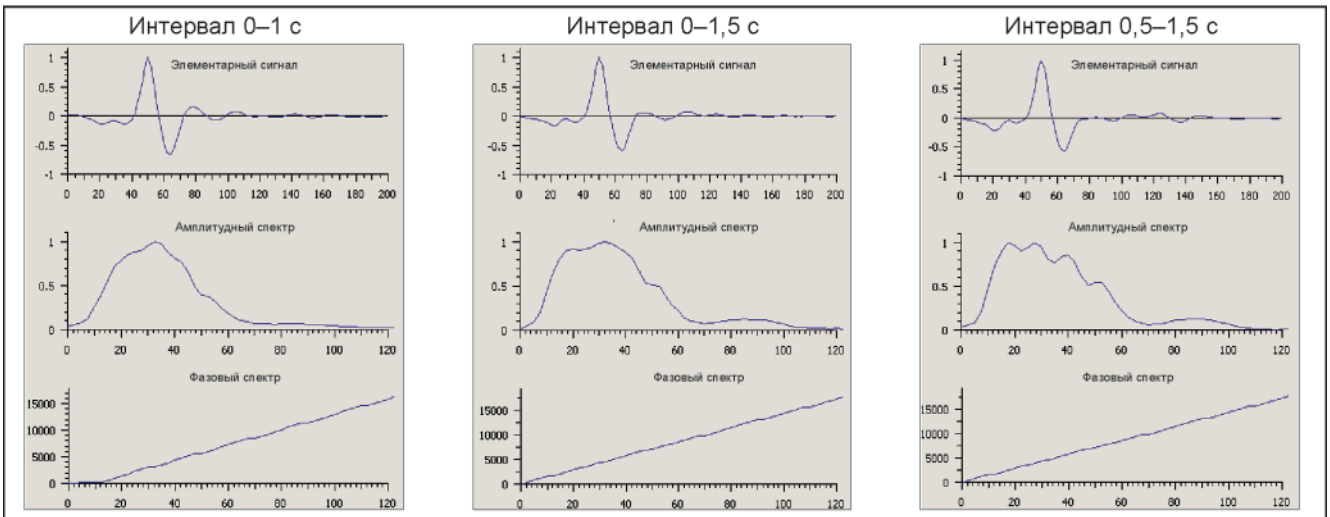


Рис. 1. Элементарные сигналы (способ накопления, РеапакПК+): а – разный частотный состав сейсмической записи, б – разные временные интервалы сейсмической записи

Следует отметить, что применение способа определения элементарного сигнала непосредственно по сейсмическим данным обеспечивает самодостаточность системы РеапакПК+ и создает определенные преимущества по сравнению с другими методами сейсмической инверсии, в которых процедура расчета элементарного сигнала связана с использованием данных акустического каротажа. Это ограничивает возможности применения данных методов в основном рамками детальных работ. Для

системы РеапакПК+ таких ограничений нет. Она пригодна при любой детальности исследований, в том числе при работах методами СГ-ОГТ.

Восстановление импульсной характеристики среды способом последовательных вычитаний

Опишем принцип вычисления временного ряда ЭКО, реализованный как нелинейный способ последовательных вычитаний [5, 8, 10].



Располагая элементарным сигналом $f_0(t)$, рассчитываем взаимно корреляционную функцию между сейсмической трассой $f(t)$ и этим сигналом:

$$B(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T \tilde{f}_0(t) f(t + \tau) dt,$$

где $T = T_2 + T_1$ – сумма времен задания элементарного сигнала $\tilde{f}_0(t)$ и сейсмограммы $f(t)$. В результате каждому элементарному сигналу, составляющему сейсмограмму, ставится в соответствие его автокорреляционная функция (ФАК), т. е. симметризованный (нульфазовый) сигнал.

Далее определяется огибающая $Q(t)$ функции $B(\tau)$. Экстремальные значения амплитуд $Q(t)$ разбиваются на несколько уровней дискриминации R , при этом для каждого уровня $r = 1, 2, \dots, R$ будут уточняться импульсные реакции. Точкам экстремальных амплитуд огибающих $R(\tau)$ присваиваются импульс и знак, равные величине и знаку амплитуды колебания, причем так, что в пределах длительности элементарного сигнала T_2 выбирается один импульс, превышающий заданный уровень дискриминации. Таким образом, по огибающей $R(t_i)$ строится импульсная последовательность $\{u_B(\tau_i)\}$, сформированная из наиболее сильных импульсов, модули которых находятся в пределах

$$(r - 1) \left| \frac{B(\tau_{\max})}{r} \right| < |u_B(\tau_i)| \leq |B(\tau_{\max})|. \quad (4)$$

Напомним, что каждому импульсу k_i в $u_B(\tau_i)$ поставлена в соответствие ФАК элементарного сигнала. Центральный пик функции автокорреляции элементарного сигнала можно определить как $\sigma = \int_{-T_1}^{T_1} \bar{f}^2(t) dt$.

Поскольку последовательность $\{u_B(\tau_i)\} = \{\sigma k_i\}$ отличается от импульсной сейсмограммы $u_i(t) = \{k_i\}$ постоянным множителем σ , то производится нормировка вида

$$u_r(t) = \{k_i\} = \frac{u_B(\tau_i)}{\sigma}. \quad (5)$$

Заменим аргумент в $u(\tau_i)$ на $t = \tau_i - T/2$, учитывая, что ФВК (функция взаимной корреляции) удлинилась по сравнению с исходной сейсмограммой на T_2 (по $T_2/2$ в начале и в конце), и совместим последовательность импульсов с исходной сейсмограммой. В результате первой подытерации с индексом $r = 1$ получим последовательность k_{ir} в функции $u_r(t) = \{u_r(t_i)\}$, которая является приближенной импульсной реакцией среды, соответствующей вступлениям наиболее сильных сигналов.

Далее определяется свертка найденной импульсной реакции с полученным ранее элементарным сигналом и тем самым синтезируется сейсмограмма из наиболее сильных волн

$$F_r(\tau) = u_r(t_i) * \tilde{f}_0(t), \quad (6)$$

которая затем вычитается из исходной сейсмограммы $f(t)$. Результат вычитания представляет собой первую остаточную сейсмограмму $F_{ost}^{r=1}(t)$

без наиболее сильных волн в каждом пакете длительностью в элементарный сигнал T_2 . Эту сейсмограмму используют для последующей оценки импульсной реакции $u_{r=2}(t)$ по тому же алгоритму (формулы 4–6).

Аналогичными процедурами получаем последовательности $u_{r=1}(t_i), u_r(t_i), \dots, u_{r=R}(t_i)$, и $F_{ost}^{r=1}(t), F_{ost}^{r=2}(t), \dots, F_{ost}^{r=R-1}(t)$, которые связаны между собой зависимостями

$$\begin{aligned} F_{ost}^{r=1}(t) &= f(t) - u_{r=1}(t_i) * \tilde{f}_0(t), \\ F_{ost}^{r=2}(t) &= F_{ost}^{r=1}(t) - u_{r=2}(t_i) * \tilde{f}_0(t), \\ &\dots \\ F_{ost}^{r=R}(t) &= F_{ost}^{r=R-1}(t) - u_{r=R}(t_i) * \tilde{f}_0(t). \end{aligned}$$

Если остаточная сейсмограмма после выделения $R - 1$ убывающей последовательности импульсных реакций меньше некоторого заданного уровня по условиям дискриминации, т. е. $\max |F_{ost}^R(t)| < \varepsilon$, где $\varepsilon = B(\tau_{\max}) / R$, то процесс расчета импульсных реакций $u^l(t)$ прекращается. Остаток $F_{ost}^{r=R}(t)$ считается помехой. Импульсная сейсмограмма определяется как

$$u^l(t) + \sum_{r=1}^R u_r^l(t).$$

Индекс l присвоен как признак первого приближения импульсной сейсмограммы при условии последующих уточнений. Контролем точности работы алгоритма обрабатывающих процедур должно быть условие

$$f(t) = \tilde{f}_0(t) * \sum_{r=1}^R u_r(t) + F_{ost}^R(t),$$

где $f(t)$ – исходная сейсмограмма.

Алгоритм нелинейного способа последовательных вычитаний состоит в определении времен вступления, оценках амплитуд и последующем вычитании элементарных волн. В результате вычисления функции взаимной корреляции между сейсмической трассой и элементарным сигналом каждому элементарному сигналу ставится в соответствие его автокорреляционная функция. Положение доминирующих сигналов, формирующих импульсную характеристику среды в первой итерации, определяется в результате экстремирования функции взаимной корреляции. При свертке найденной импульсной характеристики с элементарным сигналом синтезируется сейсмограмма из наиболее сильных волн. Результат ее вычитания из исходной трассы формирует первую остаточную сейсмограмму, которая используется для последующих уточнений импульсной реакции по тому же алгоритму. Если после очередной итерации остаток меньше некоторого заданного уровня, то процесс расчета прекращается. Остаток считается помехой. Результаты итераций суммируются.

Рис. 2 иллюстрирует итерационный процесс восстановления импульсной характеристики среды способом последовательных вычитаний. На входе – фрагмент разреза ОГТ по профилю



060805 Собинской площади (Восточная Сибирь). Последовательно приведены результаты расчета пяти итераций. Визуализация разрезов ЭКО выполнена в оригинальном штриховом цветном изображении, принятом в системе РеапакРК+. Размер штрихов соответствует значению ЭКО, а их направление и цвет – знаку ЭКО: красный (вверх) – положительный, синий (вниз) – отрицательный. Приведены также исходный временной разрез ОГТ и рассчитанный элементарный сигнал. На рис. 2 виден последовательный эффект дополнения и уточнения границ, составляющих разрез ЭКО, а при сопоставлении с исходным разрезом – также эффект повышения разрешенности и детальности разреза ЭКО по сравнению с исходным разрезом ОГТ.

Восстановление импульсной характеристики среды способом последовательных приближений

Другой (линейный) способ восстановления импульсной характеристики среды – метод последовательных приближений [9] – сформулирован в терминах решения некорректных задач [1, 2].

Представим сейсмическую запись в виде

$$f(t) = u(t) * A(t) + n(t), \tag{7}$$

где $f(t)$ – сейсмическая трасса; $u(t)$ – импульсная реакция среды; $A(t)$ – сигнал; $n(t)$ – аддитивный нормальный шум.

Форму сигнала считаем известной, например, восстановленной с помощью суммирования волновых пакетов. Решение уравнения (7) методом наименьших квадратов (минимизирующее функционал ошибки $\|Au - f\|$) совпадает с решением уравнения

$$A * Au = A * f, \tag{8}$$

где $A * Au$ – оператор свертки с функцией автокорреляции сигнала; $A * f$ – функция взаимной корреляции сигнала и трассы.

Таких решений может быть бесконечно много, и ЭКО-решение – одно из них.

Рассмотрим получение гладкого решения обратной задачи (8) способом последовательных приближений. Параметром регуляризации здесь также является номер итерации n . Начальное приближение u_0 разумно брать ближе к точному решению задачи. При отсутствии информации о точном решении полагают $u_0 = 0$. Рассмотрим итерационный процесс:

$$u_{n+1} = u_n - \mu(A * Au_n - A * f), \quad (0 < \mu < 2/A * A).$$

При $u_0 = 0$

$$u_n = \sum_{j=0}^{n-1} (J - \mu A * A)^j \mu A * f,$$

где J – единичный оператор.

Известно [1, 2], что для точно заданных $A * A$ и $f, u_n \rightarrow u^*$ при $n \rightarrow \infty$, где u^* – ближайшее к u_0 решение. В случае $u_0(t) = 0$ получаем сходимость к нормальному решению, т. е. к решению с мини-

мальной нормой в классе гладких суммируемых с квадратом функций W_2^1 . Если вместо точного значения f имеется некоторое приближение f_δ , такое, что $\|f_\delta - f\| < \delta$, то в приближении u_n нельзя устремлять n к бесконечности (может нарушиться сходимость). Вместо этого следует указать такое согласование $n = n(\delta)$ параметра n с уровнем точности входных данных δ , чтобы при $\delta \rightarrow 0$ $u_n \rightarrow u^*$. Обычно выбирается такое значение n , при котором невязка $\|A * Au_n - A * f\|$ сравнима с δ .

Алгоритм линейного способа последовательных приближений предполагает аппроксимацию среды гладкой моделью. Он состоит в предварительном вычислении функции автокорреляции элементарного сигнала (ФАК), функции взаимной корреляции (ФВК) элементарного сигнала с соответствующими приближениями гладкого решения трассы ЭКО. В итерационном режиме, начиная с минимальных значений функции приближения путем получения симметричной свертки ФАК сигнала с функцией приближения, происходит ее уточнение через сопоставление ФВК с результатом свертки. В результате заданного числа циклов итераций формируется ЭКО-трасса, удовлетворяющая установленным требованиям сходимости процесса. Амплитудный спектр этой трассы не должен выходить за пределы спектра входной сейсмической трассы. Гладкое решение преобразуется в дискретное путем экстремирования.

На рис. 3 (Ia и IIa) сопоставлены разрезы ЭКО, полученные двумя описанными способами. Как видно, оба способа дают близкие результаты в отношении выделяемых и прослеживаемых границ. Заметно отличаются результаты по степени гладкости границ и площадок: более гладкие наблюдаются на результате последовательных приближений. В то же время результат последовательных вычитаний содержит группы отдельных импульсов в пределах между выделенными границами. В зависимости от конкретных условий геологической среды эти группы могут рассматриваться и как полезная информация, и как нерегулярный шум. В отношении разрешенности можно видеть существенные преимущества разрезов ЭКО по сравнению с исходным разрезом ОГТ (см. рис. 2).

Кластеризация трасс ЭКО и расчет Реапак-атрибутов

Импульсные характеристики среды рассчитывают по отдельным трассам и изображают в виде разрезов ЭКО (см. рис. 2), на которых каждая трасса располагается в соответствии с ее положением на оси x (по линии профиля). При такой структуре данных сейсмические границы, прослеживаемые на этих разрезах, не определены в плоскости координат $2t_0, x$. Для их трассирования выполняется кластеризация трасс ЭКО, при которой

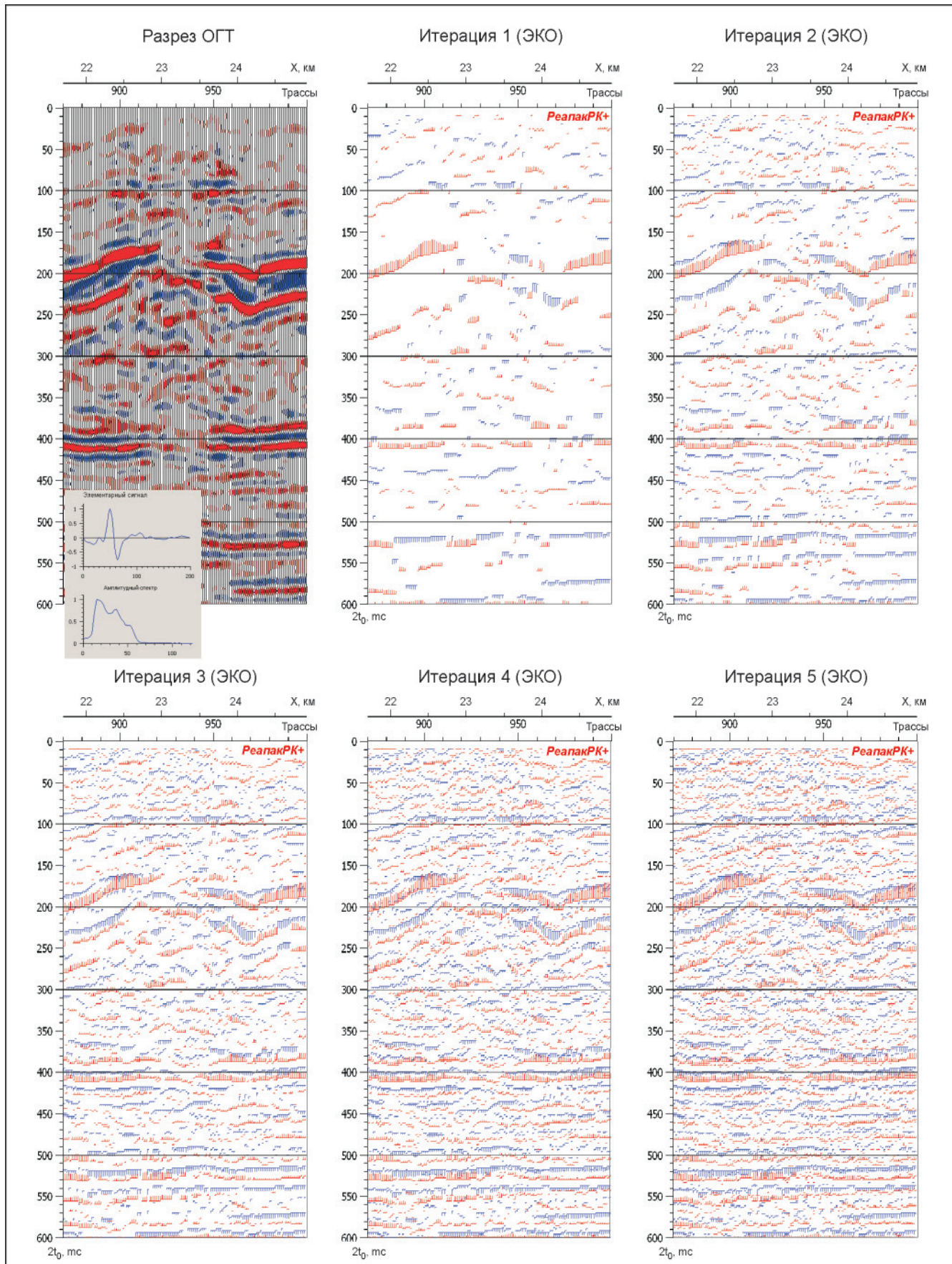


Рис. 2. Восстановление импульсной характеристики среды способом последовательных вычитаний (5 итераций)
 1, 2 – акустические границы с положительным (1) и отрицательным (2) знаками ЭКО

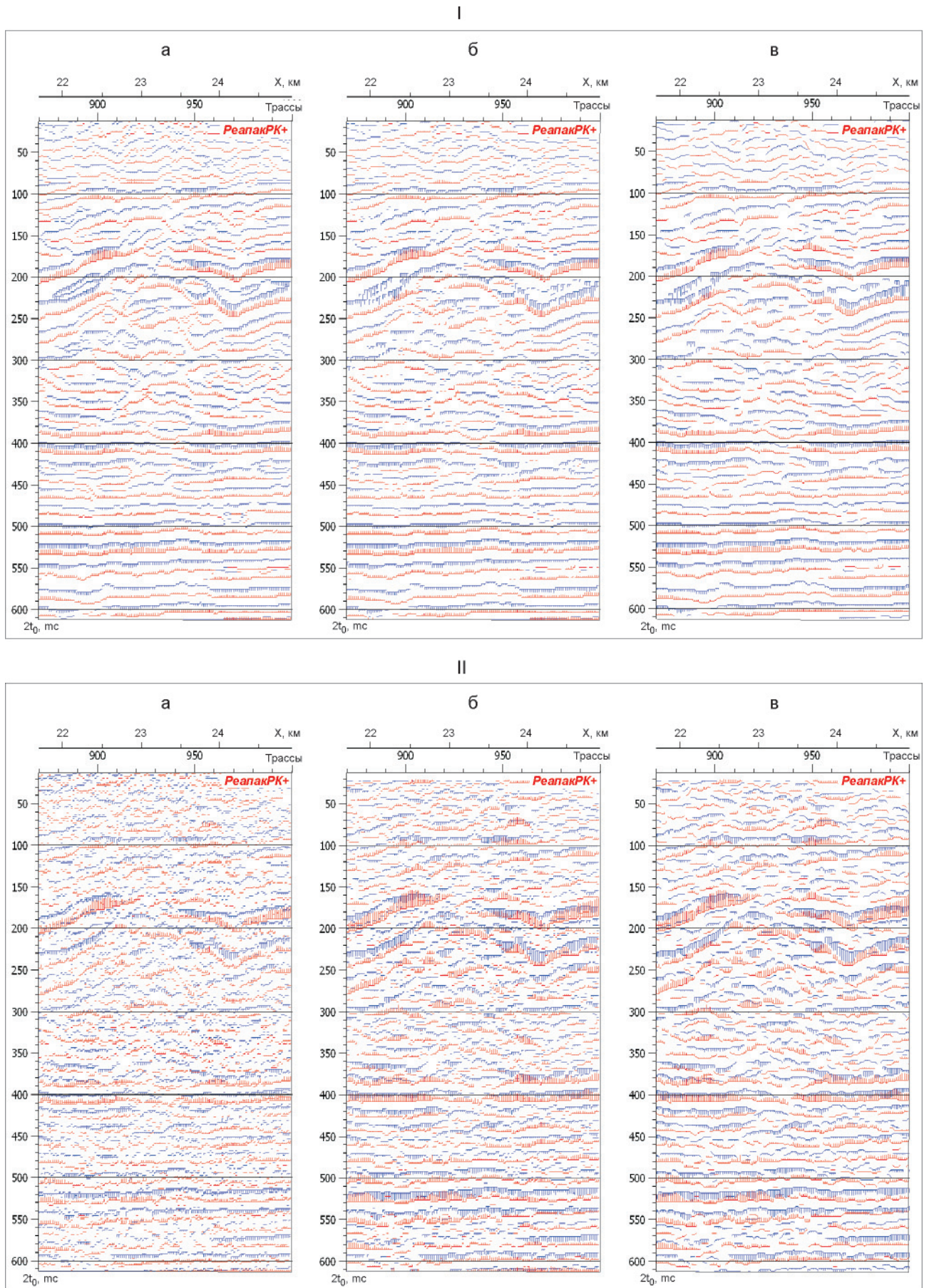


Рис. 3. Сопоставление разрезов ЭКО, полученных способом последовательных приближений (I) и последовательных вычитаний (II): а – потрассная запись; б – потрассная запись после процедуры усиления регулярной компоненты; в – разрез ЭКО после кластеризации (запись отражателей в координатах $2t_0, x$)



импульсы соседних трасс последовательно объединяются в группы (кластеры) с выполнением определенных условий: совпадение знака ЭКО, попадание в заданный временной интервал, непрерывность прослеживания. Кластеризованные группы позиционируются как отдельные отражатели, каждый из которых представлен значениями ЭКО в координатах $2t_0, x$.

Таким образом, кластеризация системы трасс ЭКО фактически выполняет функцию автоматической корреляции отражателей. В результате разрез ЭКО представляется как система отражателей, записанных в координатах $2t_0, x$. Перед процедурой кластеризации выполняется статистическая обработка трасс с целью усиления регулярной компоненты. Результаты применения этих процедур проиллюстрированы на рис. 3, где показаны разрезы ЭКО, полученные двумя способами: после их статистической обработки (Iб, Iв) и кластеризации трасс (IIб, IIв). После процедуры статистической обработки видно уменьшение количества тех единичных импульсов на разрезе последовательных вычитаний, которые можно отнести к шумовой составляющей. Заметим, что, используя определенный режим расчетов, в частности увеличив задаваемый при кластеризации минимальный размер отражателей (до 5–7 трасс), можно полностью исключить из записи разреза ЭКО мелкие элементы, рассматриваемые как шум. После кластеризации каждая граница и площадь сейсмического разреза охарактеризована размером, наклоном и значением ЭКО. Это является основой для расчета Реапак-атрибутов – динамических и структурных характеристик разреза.

Основные динамические Реапак-атрибуты разреза – отраженная энергия (рассчитывается как средние из абсолютных значений ЭКО) и доминирующий знак коэффициентов отражения (среднее значение ЭКО с учетом знака). К структурным Реапак-атрибутом относятся средняя и суммарная длины отражателей, плотность (число) отражателей, их наклоны и дисперсия наклонов. Эти характеристики рассчитывают в скользящих окнах, размеры которых задают в зависимости от исходных данных и от требуемой детальности исследований. Результаты расчета Реапак-атрибутов визуализируются в виде закодированных полей с «подложкой» отражателей (границ и площадок). На рис. 4 приведены поля отраженной энергии, доминирующего знака коэффициентов отражения и средней длины отражателей, вычисленные для способов последовательных приближений (I) и последовательных вычитаний (II). Поля совмещены с «подложкой» с разрезами ЭКО. Диапазон значений параметров для изображения полей в цвете устанавливают по соответствующим гистограммам, а палитры их цветового изображения калибруют в условных единицах их нормированных значений. Совпадение границ ЭКО и полей Реапак-атрибутов, полученных

двумя принципиально разными способами, однозначно свидетельствует о надежности методов сейсмической инверсии, используемых в системе РеапакРК+.

Дополнительная информация о разрезе, полученная средствами этой системы, существенно повышает уровень надежности построения геологических моделей при решении как глобальных проблем изучения строения земной коры [6], так и при решении прикладных задач, связанных с поисками нефтегазовых залежей. В качестве небольшого примера, рассмотрим опробование средств Реапак-технологии на Собинском нефтегазовом месторождении. Собинское месторождение – это сложное построенная, многопластовая нефтегазонасная структура, разбитая на блоки дизъюнктивными нарушениями. Залежи нефти и газа здесь относятся к интервалам ванаварской свиты, содержащей песчаные пласты Вн-I, Вн-II, Вн-III-V.

На рис. 5 показана схема расположения скважин и сейсмических профилей, по которым выполнена обработка сейсмических материалов в системе РеапакРК+. Сейсмический профиль 350805 пересекает этот контур и проходит через скв. 12, 14, 17, 18, 29. Скв. 17 и 29 находятся за контуром залежи, остальные – в контуре. На рис. 6 приведены поля отраженной энергии, доминирующего знака коэффициентов отражения, числа отражателей и их средней длины, полученные по этому профилю. Поля совмещены с разрезом ЭКО, на котором видна антиклинальная форма прослеживаемых границ со сводами, расположенными в пределах контура залежи. Аномальные характеристики полей Реапак-атрибутов характеризуют разные аспекты строения среды. Так, на полях отраженной энергии, числа и средней длины отражателей в основном проявляется блоковое строение разреза. На поле доминирующего знака ЭКО в большей степени отражена литостратиграфическая структура среды.

По резкому различию фоновых значений отраженной энергии, средней длины и числа отражателей на всех разрезах выделены три блока (б1, б2, б3), разделенных дизъюнктивными нарушениями, которые представлены субвертикальными линиями, ограничивающими зоны положительных и отрицательных аномалий на полях Реапак-атрибутов. Блоки различаются также по положению и морфологии внутренних границ пластов, по динамическим характеристикам отраженных от них волн, по условиям их примыкания и другим признакам. В пределах блока б1 расположены непродуктивные скв. 17 и 29. Границы ЭКО, прослеживаемые в этом блоке, имеют высокий уровень отраженной энергии и достаточную «гладкость» формы. Аналогичная структура границ ЭКО характерна для блока б3.

Положение блока б2, в котором находятся продуктивные скв. 12, 14, 18, совпадает с контуром залежи. Результаты испытаний на притоки

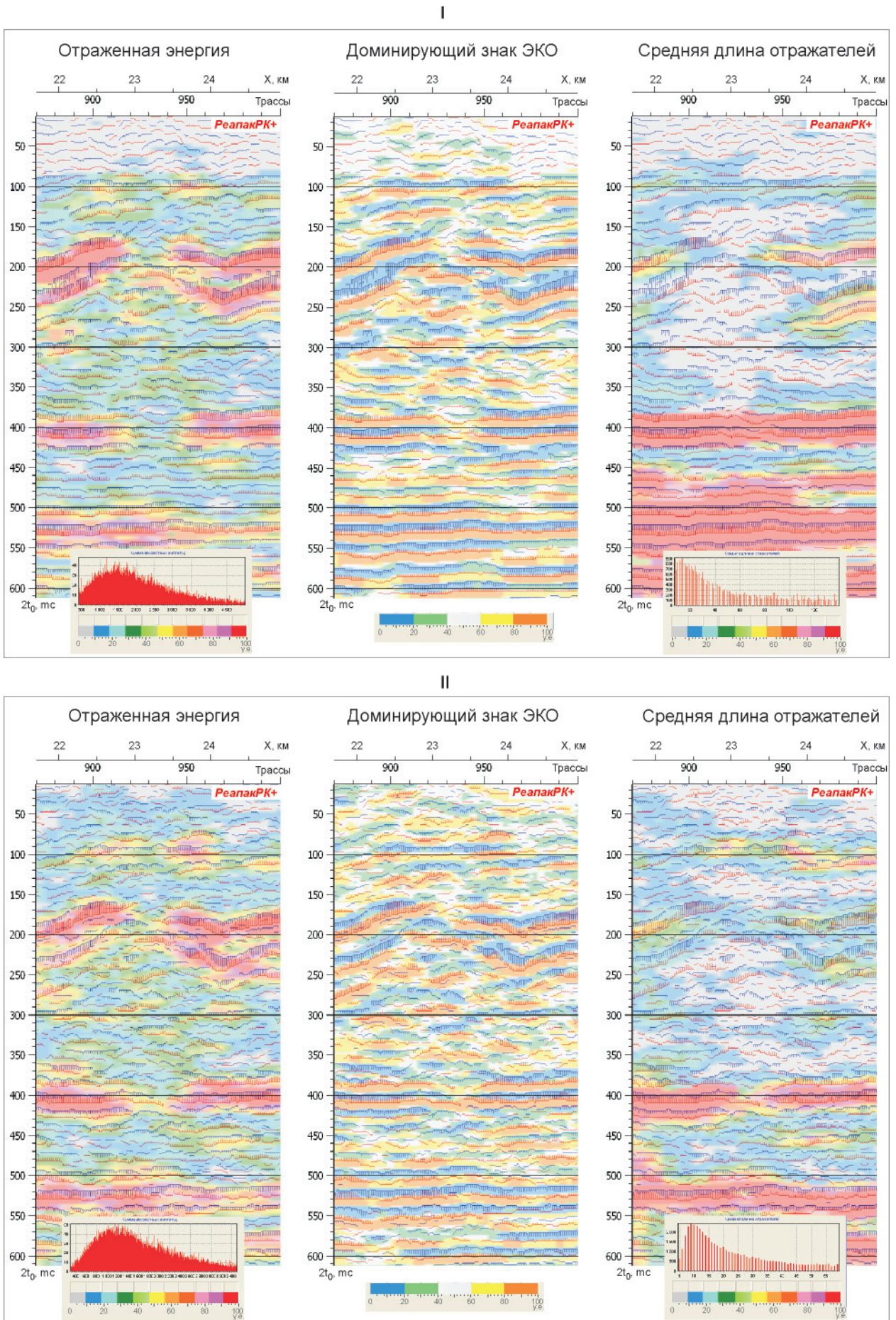


Рис. 4. Поля Реапак-атрибутов, вычисленные для способов последовательных приближений (I) и последовательных вычитаний (II)

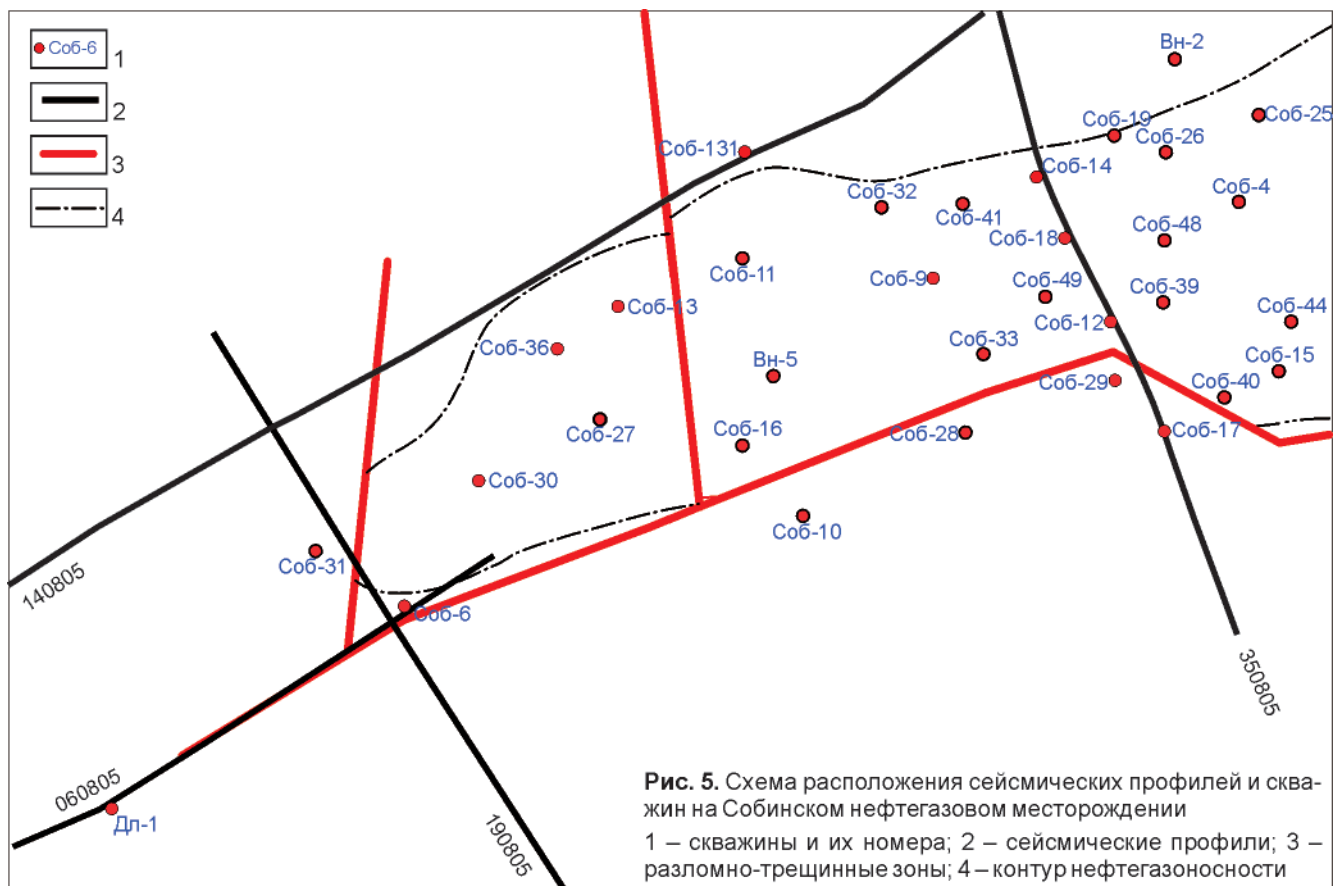


Рис. 5. Схема расположения сейсмических профилей и скважин на Собинском нефтегазовом месторождении
 1 – скважины и их номера; 2 – сейсмические профили; 3 – разломно-трещинные зоны; 4 – контур нефтегазоносности

углеводородов в скв. 12 и интерпретации данных ГИС свидетельствуют о высокой степени насыщения песчаных пластов в этом блоке нефтью и газом. Кроме того, скв. 14 и 18 вскрыты песчаные пласты, отдельные пропластки которых в верхней части интервала также насыщены углеводородами. В сейсмическом отношении этот блок характеризуется значительно более низкими значениями отраженной энергии, малыми размерами отражателей и повышенным их количеством. Это может свидетельствовать о значительной раздробленности среды и о высокой степени трещиноватости пород. Следовательно, установленные особенности полей вполне логично связать с косвенными признаками присутствия залежи.

На поле доминирующего знака отражателей разломы, разделяющие блоки, прослеживаются менее контрастно, границы ЭКО – более надежно. Идентификация границ ЭКО на Собинском месторождении выполнена с использованием материалов ГИС и результатов литостратиграфического расчленения разреза вендских и кембрийских отложений по Деликтиконской скв. 1 (составлен Л. А. Кроль) и геологических моделей отложений ванаварской свиты (составлены П. Н. Мельниковым и Н. В. Мангазеевой). Сопоставление сейсмических и скважинных данных позволило идентифицировать и проследить следующие границы: Б (кровля венда), osk (подошва терригенного пласта в низах оскобинской свиты), vp (кровля ванаварской свиты), R_0 (денудационная поверхность рифея). Все эти границы на

поле доминирующего знака ЭКО контролируются ленточными формами аномалий (см. рис. 6). Для границ Б, R_0 , и osk это аномалии с положительными значениями доминирующего знака ЭКО, а для границы vp – с отрицательными. Очень важно, что данные аномалии соотносятся с линиями ЭКО не только при гладкой форме отражающих границ, наблюдаемых вне контура залежи, но и в пределах контура залежи, где гладкость границ нарушена процессами деструктуризации. Именно такую раздробленную структуру границ можно наблюдать в сводовой части Собинского поднятия в блоке б2. Тем не менее здесь прослежены все идентифицированные границы, в том числе границы, относящиеся к нефтегазонасыщенным интервалам, представленным песчаными пластами Вн-I и Вн-III-V, хотя в блоке наблюдается мелкая раздробленность границ ванаварской свиты и снижена акустическая контрастность пластов. В то же время относительно высокую степень газонасыщения разреза можно связать со структурным фактором, а также с повышенной трещиноватостью песчаных пластов, что отражено в мелкой раздробленности структуры отражающих границ. Протяженность этого блока, относящегося к контуру залежи, 8 км, а его сейсмический образ совпадает с представлениями о мелкой слоистости продуктивных интервалов, установленных в скважинах. Роль флюидоупора для Собинского месторождения может играть терригенная пачка оскобинской свиты, надежно прослеженная по границе ЭКО, относящейся к ее подошве (граница osk).

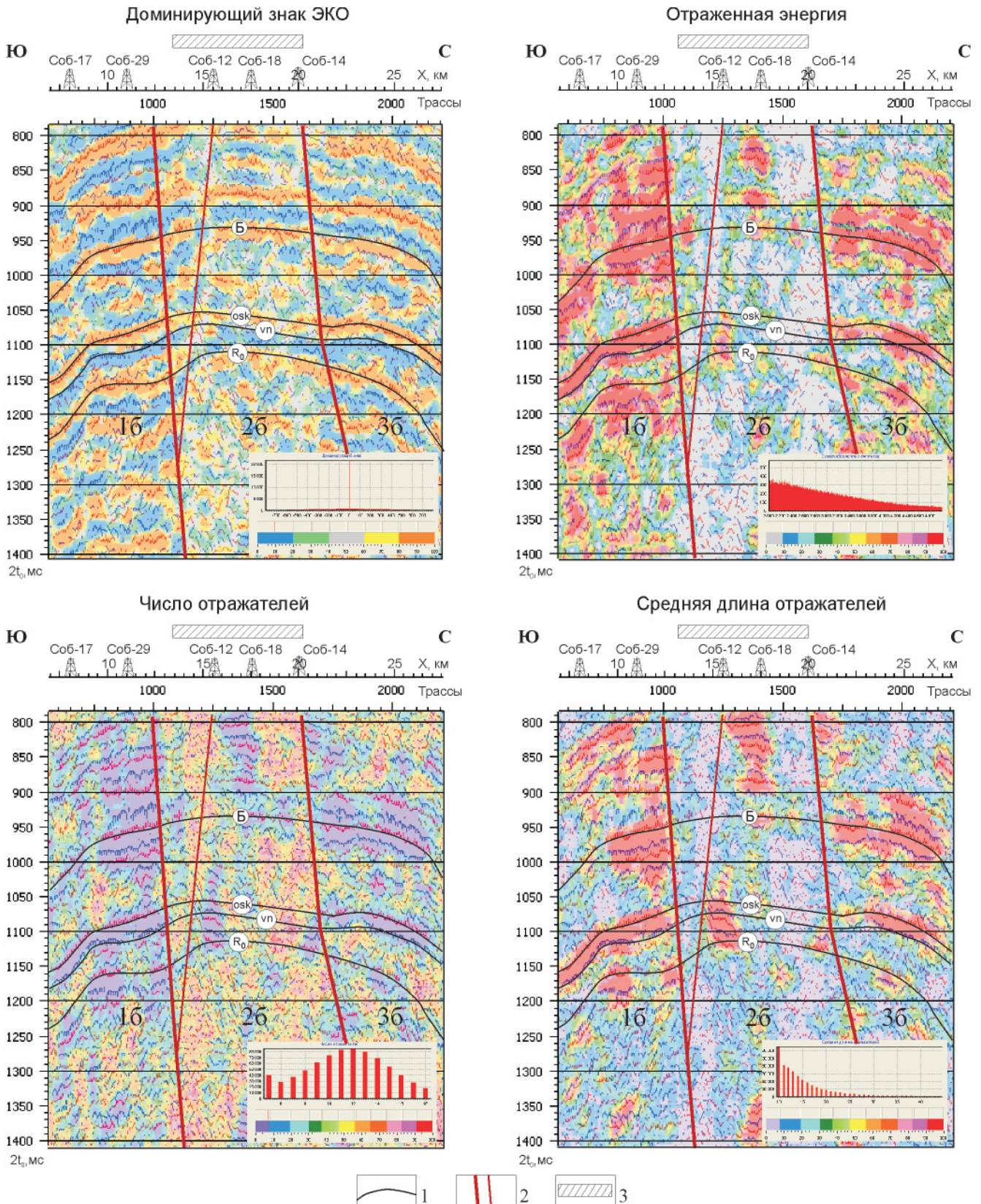


Рис. 6. Ансамбль полей Реапак-атрибутов. Профиль 350805, Собинское месторождение
1 – сейсмостратиграфические границы; 2 – дизъюнктивные нарушения; 3 – контур нефтегазовой залежи

В соотношениях более мелких разломов в этой части разреза намечаются элементы оперения «пальмовой» структуры. Такое строение разломов может указывать на то, что его формирование происходило под влиянием тан-

генциальных напряжений, вызванных горизонтальными сдвигами. Это тектонический фактор, который также может иметь важное значение при оценке продуктивных характеристик месторождения.



Если переходить к площадному представлению модели месторождения, то полученные данные позволяют предположить, что модель Собинского месторождения может быть представлена узкими субширотными блоками, разделенными разломами. При этом одна часть разломов может выполнять функции флюидопоров, другая – подводящих каналов. Возможно также наличие секущих разломов субмеридиональных направлений. В заключение отметим, что приведенный небольшой пример применения Реапак-технологии на Собинском нефтегазовом месторождении свидетельствует о целесообразности включения разрезов ЭКО и полей Реапак-атрибутов в информационную структуру данных, используемых при создании моделей сложно построенных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бакушинский, А. Б.** Интерактивные методы решения некорректных задач [Текст] / А. Б. Бакушинский, А. В. Гончарский. – М. : Наука, 1989.
2. **Вайникко, Г. М.** Итерационные процедуры в некорректных задачах [Текст] / Г. М. Вайникко, А. Ю. Веретенников. – М. : Наука, 1986.
3. **Изварин, Ю. И.** Обработка и интерпретация данных сейсморазведки МОВ ОГТ на основе динамической теории распространения сейсмических волн [Текст] / Ю. И. Изварин, В. А. Гроссгейм, В. П. Синиченко // Машинная обработка сейсмических данных для изучения физических свойств в условиях Западной Сибири. – М. : ВНИИГеофизика, 1980. – С. 36–37.
4. **Методические** рекомендации по обработке сейсмических записей для изучения акустических неоднородностей тонкослоистых сред с целью прогнозирования неантиклинальных ловушек нефти и газа [Текст] / Д. И. Рудницкая, В. И. Берилко, Т. А. Горохова [и др.]. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 1983. – 58 с.
5. **Нахамкин, С. А.** Алгоритм и программа разделения регулярных волн методом последовательных вычитаний [Текст] / С. А. Нахамкин, В. Н. Троян // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л. : Наука, 1976. – С. 186–196.
6. **Рудницкая, Д. И.** Применение Реапак-технологии при построении геологических моделей земной коры и разработке глубинных сейсмогеологических критериев регионального прогнозирования нефтегазоперспективных объектов [Текст] / Д. И. Рудницкая, В. С. Старосельцев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири – 2012. – № 1. – С. 3–14.
7. **Свидетельство** о государственной регистрации программ для ЭВМ – РеапакРК+ (ReapackRK+) [Текст] / Д. И. Рудницкая, М. В. Корнилов // Реестр программ для ЭВМ. – М., 2008.
8. **Способ** накопления и оценки элементарного сигнала по сейсмическим данным [Текст] / Д. И. Рудницкая, Н. Е. Гринь, Л. Я. Гордиенко, Е. З. Рахленко // Геология и геофизика. – 1985. – № 12. – С. 91–104.
9. **Стражникова, И. Н.** Итерационные способы решения обратных задач и свойства ЭКО-преобразования [Текст] / И. Н. Стражникова // Автоматизированная методика прогнозирования геологического разреза при поисках нефти и газа в Западной Сибири. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 1990. – С. 52–58.
10. **Троян, В. Н.** Статистические методы обработки сейсмической информации при исследовании сложных сред [Текст] / В. Н. Троян. – М. : Недра, 1982.

© Д. И. Рудницкая, М. В. Корнилов,
И. Н. Стражникова, 2012