

*на правах рукописи*

**ГРИГОРЬЕВЫХ АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ  
РЕКОНСТРУКЦИИ МОДЕЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД  
НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ  
ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка  
информации (в нефтяной и газовой промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ухта 2011

Работа выполнена в Ухтинском государственном техническом университете

Научный руководитель	доктор физико-математических наук, профессор Кобрунов Александр Иванович
Официальные оппоненты	доктор технических наук, Калинин Дмитрий Федорович  кандидат геолого-минералогических наук Даниленко Александр Николаевич
Ведущее предприятие	Воронежский государственный университет

защита диссертации состоится «15» апреля 2011 г. в 14<sup>00</sup> ч. на заседании диссертационного совета Д 212.291.03 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просьба высылать по указанному адресу ученому секретарю совета.

Автореферат разослан «11» марта 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук, доцент



Смирнов Ю.Г.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Актуальность выбранного направления определена приоритетным значением проблемы управления качеством процессов системы реконструкции моделей сложно построенных геологических сред и возможностью ее решения на основе принципов системного анализа.

Задача реконструкции физико-геологических моделей сложно построенных сред, а именно эти среды представляют наибольший интерес, сталкивается с целой серией принципиальных затруднений, происходящих от сложности как предмета рассмотрения, так и данных с которыми приходится оперировать. Традиционно среди этих проблем на первый план выдвигается некорректность обратных задач для многопараметрических моделей сред, которая проявляется как в виде эффектов практической и скрытой эквивалентности, так и в виде неустойчивости решений задачи реконструкции параметров сложно построенных и, по этой причине, многопараметрических сред. Тем не менее, наряду с этой, несомненно, важной проблемой имеется и ряд других проистекающих от сложности и многокомпонентности рассматриваемых объектов проблем существования взаимозависимостей между параметрами и компонентами рассматриваемых объектов, в том числе не достаточно формализованных. Сложные и многокомпонентные системы с установленными или устанавливаемыми взаимосвязями между ними составляют предмет системного анализа в геофизике, целью которого служит рассмотрение элементов системы как взаимоувязанных компонентов некоторого единого целого. В качестве такого целого выступает процесс реконструкции сложных моделей сред взаимосвязанными компонентами которого служат: оперирование нечеткими данными, характерными для реальной геолого-геофизической информацией, включая установление и анализ нечетких отношений между ними; установление критериев эффективности процедур обработки исходя из целевых показателей задачи обработки как средства введения неформализованных зависимостей между исследуемыми компонентами; создание специализированных приемов выявления компонент регулярности в случаях сложных систем помех, включая помехи имеющих характер хаотических (не подчиненных статистическим правилам) преобразований.

Проблематика системного анализа в геофизических методах при реконструкции сложных физико-геологических моделей сред исключительно широка и плодотворна. Однако в настоящей работе мы вынуждены ограничиться очерченным кругом проблем, поскольку именно здесь удалось получить конструктивные результаты, которые служат основой для эффективных приемов анализа данных в сложных условиях.

**Целью** выполненных работ служит повышение эффективности интерпретационного обеспечения геолого-разведочных работ на нефть и газ и мониторинга их качества на основе технологий системного анализа геолого-геофизической информации.

#### **Задачи исследования**

1. Разработка принципов и методик оценки и управления качеством формальных процедур преобразования и обработки сейсмических полей.
2. Разработка теории, методов и алгоритмов обработки геофизических данных с целью распознавания образа геофизического сигнала.
3. Развитие методов автоматизированного прогнозирования параметров сложно построенных моделей с автоматической оценкой меры неопределенности.
4. Создание и апробация компьютерных технологий элементов системного анализа геолого-геофизических данных.

#### **Защищаемые положения:**

1. Принципы и методика определения критериев оптимальности параметров фильтрации на основе расчета корреляционного интеграла от результата фильтрации, представленного в реконструированном фазовом пространстве для оценки и управления качеством обработки сейсмических данных.
2. Методы обработки и фильтрации реальных геофизических данных, не подчиняющихся априори сформулированным вероятностным законам, на основе моделирования стохастического резонанса и оценки хаотичности поля по корреляционному интегралу.
3. Принципы и методика прогнозирования значений характеристик геологической среды на основе применения аппарата нечетких множеств позволяют повышать достоверность и объективность прогнозов с оценкой меры возможности того или иного прогноза.

#### **Научная новизна**

1. Впервые введены и обоснованы меры нерегулярности для геофизических полей (меры хаотичности), основанные на корреляционном интеграле в псевдо-фазовом пространстве.
2. Впервые предложен нелинейный цифровой фильтр, моделирующий эволюцию поля по эффективному параметру хаотичности с возникновением синергетического эффекта, проявляющегося в ослаблении хаотичных и усилении регулярных компонент сигнала.
3. Впервые для геофизических задач на основе системного анализа процедур обработки сформулированы и исследованы критерии оптимальности качества обрабатывающих фильтров.

4. Впервые для задач прогноза геологических параметров сформулированы и исследованы принципы нечеткого моделирования на основе композиции Мамдани.
5. Впервые построены нелинейные цифровые фильтры, основанные на принципах стохастического резонанса и позволяющие выделять скрытые закономерности регулярности.

#### **Практическая значимость**

Обеспечивается повышение достоверности обнаружения регулярных компонент в геофизических полях за счет применения моделирования стохастического резонанса и эволюционной хаотической фильтраций совместно с традиционными методами обнаружения сигнала. Компьютерная программа SRFilter (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613402 от 21 мая 2010 г.) для поддержки принятия решения о местонахождении сигнала в волновом поле.

Обеспечивается возможность численной оценки результата произвольной фильтрации в хаотической метрике с целью получения численных оценок для контроля качества обработки геофизических полей. Это позволит строить оптимальные по критерию регулярности графы обработки сейсмических данных и сравнивать один граф с другим по мере регулярности получаемых результатов. Этим обеспечивается возможность автоматизированного тестирования качества работы методов обработки полей, за счет создания процедур автоматического подбора оптимальных значений фильтров, связанных с обнаружением регулярных компонент сигналов и полей.

Обеспечивается автоматизированный учет нечеткой структуры геолого-геофизических данных при прогнозировании характеристик среды с автоматической оценкой меры возможности того или иного прогноза.

#### **Реализация результатов работы**

Работы используются при выполнении научных исследований по программам:

«Научное обоснование и разработка теоретических основ изучения распределенных параметров внутреннего строения геологических объектов по комплексу геофизических данных», Минобразования АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», 2009-2010, №01.2.00 901904.

«Разработка теории и методов математического моделирования в задачах инверсии геофизических полей с целью прогноза и изучения локальных неоднородностей и внутреннего строения литосферы». Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук», 2009-2011.

«Оценка ресурсов и прогнозирование состояния литосферы на основе эволюционно-динамического анализа геолого-геофизической информации». Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук», 2000-2012, ФЦП.

Работы использовались в учебном процессе при подготовке магистерских диссертаций и студенческих научных работ.

Предлагаемые фильтры и эффективные критерии оптимальности фильтров использовались при обработке материалов полевой геофизики в научных и научно-производственных организациях нефтегазовой отрасли: ГОУ ВПО УГТУ и филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г.Ухта.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертации докладывались на Международном семинаре им. Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (Ухта 2008 г., Казань 2009 г., Москва 2010 г.), Международной научно-практической конференции-выставке «Санкт-Петербург-2008», (Санкт-Петербург, 2008 г.), международной научно-практической конференции «Геомодель-2008 г.» (Геленджик, 2008 г.), международной молодежной конференции «Севергеозкотех» (Ухта, 2007, 2008, 2009 г.), научно-практических семинарах молодых специалистов и ученых ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Ухта, 2008, 2010 г., Москва, 2008, 2010 г.), международном семинаре по проблемам математического моделирования Воронежского государственного технического университета (Воронеж, 2009 г.), на семинарах по системному анализу и математическому моделированию в науках о Земле в Ухтинском государственном техническом университете.

По теме диссертации опубликовано 18 работ.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, библиографического списка из 57 наименований, содержит 118 страниц текста, включая 60 рисунков.

#### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору, академику Российской академии естественных наук А.И. Кобрунову за постановку задачи, оказание помощи и контроль на всех этапах научно-исследовательской работы, а также заведующему сектором обработки материалов полевой геофизики филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в

г. Ухта С.В. Шабалину за внимание и помощь в практической реализации результатов научных исследований.

Автор признателен ректору УГТУ, профессору, д.т.н. Н.Д. Цхадая, директору филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г.Ухта к.т.н. Е.М. Гурленову и начальнику отдела МИТО филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г.Ухта А.В. Рыбкину.

Автор благодарен: д.т.н. Н.В. Долгушину, к.т.н., доценту С.В. Шиловой, к.ф.-м.н., доценту Ю.Г. Смирнову, к.т.н., доценту В.Е. Кулешову.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** изложена актуальность диссертационной работы, цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе «Управление качеством в интерпретационных моделях геофизических исследований»** на основе анализа работ В.Н. Страхова, А.И. Кобрунова, Ю.П. Ампилова, А.А. Никитина делается вывод о зависимости качества геологической модели, рассматриваемой, как результат интерпретации, от качества всей системы интерпретации. В свою очередь качество системы интерпретации определяется качеством ее интерпретационного обеспечения. Современные методы управления качеством требуют обеспечить процесс принятия решения результатами проработки множества альтернатив. В этой связи, в современном интерпретационном обеспечении выделяются следующие проблемы.

1. На сегодняшний день отсутствует системная организация процесса реконструкции моделей сложно-построенных сред. Обработка и интерпретация геолого-геофизических данных представляет собой многоэтапный процесс, в котором каждый этап стремится обособиться от предыдущего и последующего этапов.
2. Основным методом контроля качества остается визуальный. Это при возрастающих вычислительных возможностях компьютерной техники и развития методов распознавания образов.
3. Отсутствует методика определения формализованных критериев для поиска оптимальных значений параметров фильтрации и преобразования сейсмических данных с целью оценки и управления качеством обработки. Теория данного вопроса разработана недостаточно. Существующие критерии достаточно сложны и не являются универсальными. К тому же требуют введения априорной информации.
4. Отсутствует методика прогнозирования значений геолого-геофизических параметров учитывающая нечеткость отношений между геолого-геофизическими

параметрами и, в этой связи, позволяющая оценивать меру возможности того или иного прогноза. Современная практика подходов к установлению взаимосвязей и прогнозирования значений основана на предположении существования корреляционно-регрессионных зависимостей между изучаемыми параметрами, вид которых и перечень входящих в них параметров постулируется априори. Вместо учета нечеткой структуры получающихся отношений осуществляется замена реального экспериментального материала полученными законами, и некоторой интегральной, т.е. характерной для всего отношения в целом, оценкой качества – меры тесноты связи (например, коэффициента корреляции для линейных связей или дисперсионного отношения для нелинейных).

Решению обнаруженных проблем способствует развитие вычислительных возможностей современной компьютерной техники.

**Во второй главе «Системный анализ качества процедур преобразования геофизических полей»** обосновываются теоретические основы управления качеством формальных процедур преобразования и обработки геофизических данных, что соответствует первым двум защищаемым положениям.

Формулируется задача оценки и управления качеством формальных процедур преобразований и обработки геофизических данных на основе принципов теории критериального доопределения обратных задач геофизики А. И. Кобрунова. Отбор операторов преобразования геофизического поля осуществляется введением критерия оптимальности имеющего вид

$$J(F(p)U) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $U$  - наблюдаемое поле,  $F$  - оператор преобразования поля, зависящий от параметров  $p$ ,  $J$  - критерий оптимальности параметра преобразования, оценивающий качество результата преобразования. Отличие постановки задачи в виде формулы (1) от постановки задачи обычной оптимальной фильтрации в том, что в ней ищется оптимальный фильтр из заданного класса фильтров, определяемых экспертом-обработчиком; в ней первичным являются сами фильтры, а критерий их отбора вторичен. Напротив, в классической постановке задачи оптимальной фильтрации первичен сам критерий, которому должен удовлетворять результат фильтрации и неважно какой при этом используется фильтр.

Вводится и обосновывается понятие эффективного параметра регулярности как индикатора качества поля. Регулярность – это собирательное понятие, помогающее эксперту через оценку регулярности дать интегральную оценку интерпретационным свойствам объекта. Обосновывается, что для установления оптимальных параметров некоторого преобразования требуется рассмотреть эффективный критерий  $J$  оптимальности результата преобразования в смысле регулярности. Этот, формальный,



критерий  $J$  используется как критерий качества результата преобразования (фильтрации) поля. На его основе определяется оптимальная структура и значения параметров преобразования поля в процессе его обработки с целью усиления и подчеркивания интерпретационных свойств поля, т.е. повышения его регулярности.

Рассматривается модель управления качеством формальных процедур преобразования и обработки геофизических полей с целью изучения проблемы обнаружения регулярности как модель стохастического резонанса. Изучение свойств поля на основе его преобразований рассматривается как система с резонансом. При этом предполагается, что поле – это система, свойства которой отвечают резонансом на определенное, идентифицирующее их, воздействие. Под воздействием понимается совокупность операций алгоритма преобразования поля. Под моделью выявления свойств поля понимаются классы операторов  $F$  (см. формулу 1) воздействия на поле с целью повышения его регулярности, например, в результате обнаружения сигнала. Системный подход, состоящий в рассмотрении процесса преобразования поля, как системы с резонансом, позволяет сформулировать задачу обнаружения сигнала на основе добавления дополнительного шума (доказательство этого факта приводится в третьей главе путем демонстрации специального сконструированного на идее стохастического резонанса фильтра).

Обосновывается необходимость рассмотрения геофизического поля в псевдофазовом пространстве  $U$  с целью изучения его регулярности.

Вводится мера эффективного параметра регулярности и обосновывается, что она является частным случаем меры хаотичности геофизического поля. Мера регулярности/хаотичности вводится посредством вычисления оценки  $C_2$  корреляционного интеграла в реконструированном по отсчетам поля фазовом пространстве  $U$ , по формуле

$$C_2(\ell) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \Theta(\ell - |U(i) - U(j)|), \quad (2)$$

где  $\Theta$  - функция Хевисайда:  $\Theta(x) = 0$ , при  $x < 0$  и  $\Theta(x) = 1$  при  $x > 0$ ; величина  $\Theta(\ell - |U(i) - U(j)|)$  показывает расстояние  $|U(i) - U(j)|$  меньше или больше  $\ell$ .

Уточняется задача (1) управления качеством процессов обработки геофизических полей через оценку меры изменения эффективного параметра регулярности, взятого по мере хаотичности, в результате воздействия оператора  $A$  на поле  $U$

$$\begin{aligned} J_A(C_2(\mathbf{U}, \ell)) &\rightarrow \max, \\ \mathbf{U} &= \Psi(U'), \\ U' &= A[U(\xi), \bar{p}], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U(\xi)$  - исходное поле на момент  $\xi$  рассмотрения,  $\bar{p}$  - параметры преобразования (фильтра),  $A$  - оператор преобразования,  $U'$  - результат преобразования (фильтрации),  $\Psi$  - оператор реконструкции фазового пространства по полю  $U(\xi)$ ;  $C_2(U, \ell)$  - функция корреляционного интеграла по фазовому пространству от радиуса окрестности точки в фазовом пространстве,  $\ell$  пробегает область своих значений,  $J_A$  - выражение для критерия качества результата преобразования  $A$ , или критерия оптимальности параметров преобразования (фильтра  $A$ ).

В третьей главе «Методы распознавания образов регулярных сигналов в сейсмических полях» акцентируется внимание на втором защищаемом положении. Разрабатываются методы поддержки принятия экспертом решения о качестве выполненных преобразований поля на основе рассмотрения результата обработки в пространстве эффективного параметра (атрибута) регулярности. На основе анализа получающихся изображений, соответствующих различным вариантам обработки данных, эксперт принимает решение об оптимальном варианте обработки. Разрабатываются не подчиняющиеся априори сформулированным вероятностным законам фильтры обнаружения регулярности в сейсмических полях.

### 1. Нелинейный фильтр на основе моделирования стохастического резонанса.

Общая модель процесса фильтрации, основанного на стохастическом резонансе, имеет вид:



Рис. 1. Принципиальная схема фильтрации на основе стохастического резонанса

Фильтр стохастического резонанса представляет собой нелинейный оператор  $\Xi[n(s), \Pi[x(s)]]$  содержащий параметр - возбуждающий шум, действующий на искаженный помехами  $\Pi[x(s)]$  входной сигнал  $x(s)$ , результатом действия которого служит выходной сигнал  $y(s)$ . При воздействии на входной сигнал шумом определенной интенсивности будет происходить резонанс, т.е. усиление контрастности локализаций регулярных фрагментов сигнала.

Наиболее простым приемом реализации одного из классов оператора  $\Xi[n(s), P[x(s)]]$  является имитация порогового эффекта. Он состоит в установлении порога  $c$ :

$$\Xi[n(s), P[x(s)]] = \Theta(|P[x(s)] + n(s, D)| - c), \quad (4)$$

где  $\Theta(a)$  - функция Хевисайда:  $\Theta(a) = 1$ , при  $a \geq 0$ ,  $\Theta(a) = 0$ , при  $a < 0$ ,

$c$  - некоторое «пороговое» значение,

$n(s, D)$  - шум возбуждения с интенсивностью  $D$ .

Меняя интенсивность  $D$  шума, получаем простейшую реализацию фильтра моделирования стохастического резонанса (СР-фильтр).

Проведенные вычислительные эксперименты, показали достаточно высокую эффективность следующей модификации СР-фильтра, являющейся некоторым усложнением уже рассмотренного. Значение оператора  $\Xi[n(s), P[x(s)]]$  рассматривается как оценка вероятности преодоления порогового значения  $c$  в результате  $k$  воздействий на  $P[x(s)]$  возбуждающим шумом  $n(s)$ . Тогда аналогом (4) будет

$$\Xi_k[n(s), P[x(s)]] = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Theta(|P[x(s)] + n(s, D_i)| - c), \quad (5)$$

При  $k = 1$  формула (5) эквивалентна формуле (4).

Анализ показывает, что существует некоторая оптимальная интенсивность шума, при которой регулярность результата фильтрации максимальна, при этом она больше регулярности исходных данных. СР фильтр геофизических данных с помощью добавления шума определенной интенсивности позволяет обнаруживать скрытые регулярные компоненты сигнала.

## 2. Нелинейный оператор измерения хаотичности геофизического поля в скользящем окне.

Оператор хаотичности  $\Omega$  отображает геофизическое поле в функцию пространственного распределения эффективного параметра регулярности поля, взятого по мере хаотичности. Оператор зависит от поля  $U(\xi, t)$  так, что для каждого момента  $\xi$  рассмотрения задает его меру хаотичности как функцию координат  $t$ :

$$X(\xi, t) = C_2(U(\xi, t)), \quad (6)$$

$$U(\xi, t) = \Psi(U(\xi, t), m, \{\tau_i, i = 1 \dots m - 1\}),$$

где  $\Psi(U(\xi, t), m, \{\tau_i, i = 1 \dots m - 1\})$  операция пересчета одномерного сигнала  $U(\xi, t)$  в фазовое пространство размерности  $m$  с интервальными параметрами  $\{\tau_i\}$ .

Специального выражения для критерия  $J_A$  качества результата преобразования  $A$  поля  $U(\xi, t)$  не вводится. Фактически, оценка качества дается экспертом на основе

своего восприятия изображения  $X$ , в данном случае в роли функционала  $J_A$  качества выступает эксперт.

Пусть на некотором этапе обработки геофизического сигнала его компоненты имеют разную хаотичность и мера хаотичности эквивалентна установленному для компоненты отношению сигнал/шум.

Модель сигнала (рис. 2, вверху) выглядит следующим образом:

$$U(t) = \frac{1}{r(t)} \left( \sum_i \sin \omega_i t \right) + k(t)V,$$

где  $\omega_i$  - некоторая частота,  $V$  - моделирующая хаотичность поля случайная величина с нормальным законом распределения ( $\mu = 0, \sigma = 1$ ), с диапазоном значений от 0 до 1.  $k(t)$  - коэффициент шума, определяющий степень хаотичности в момент времени  $t$ , коэффициент  $\frac{1}{r(t)}$  эквивалентен коэффициенту затухания.

Предположим, что  $k(t)$  постоянен и равен  $k_0$  везде за исключением интервала  $AB$ , а в интервале  $AB$ , где коэффициент шума  $k(t)$  равно  $k$ , причем  $k \neq k_0$ , т.е.

$$k(t) = \begin{cases} k_0 & t \notin [A, B] \\ k, & t \in [A, B] \end{cases}$$

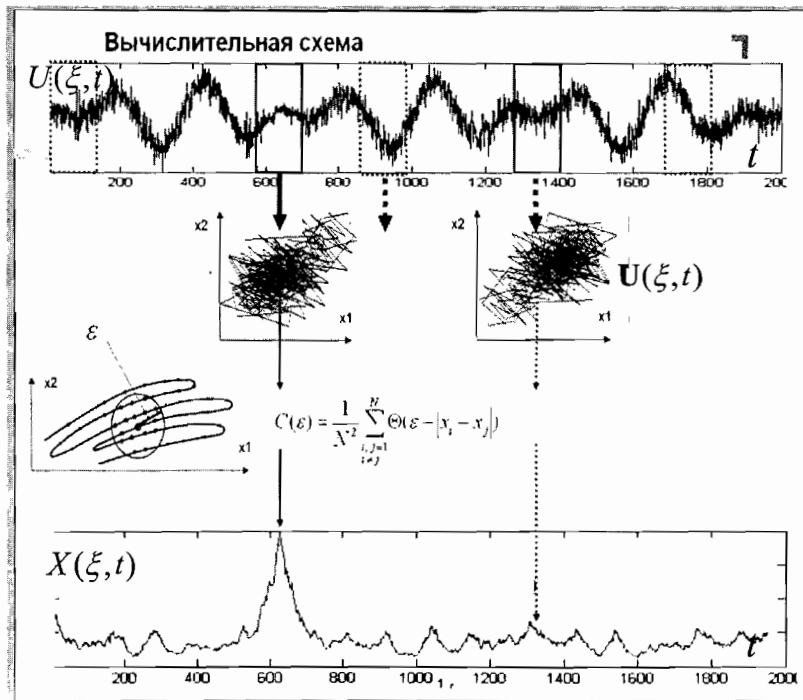


Рис. 2. Схема расчета эффективного параметра регулярности по мере хаотичности в скользящем окне.

Найдем оценку распределения  $k(t)$ , рассчитывая меру хаотичности для каждой, выбираемой в скользящем окне компоненты поля  $U$  с помощью оператора  $\Omega$ . Процесс продолжается для всей области значений переменной  $t$ . Результат представ-

лен на рис. 2, внизу. На графике (рис. 2, внизу) видно, что «ярко выраженный» пик соответствует области расположения интервала  $AB$  с аномальным значением соотношения сигнал/шум.

Для обеспечения регуляризации последовательности  $X(\xi, t)$  вводится коррекция ее величины с помощью оператора  $B$ , состоящая в пересчете  $X(\xi, t)$  в функцию:

$$X'(\xi, t) = X(\xi, t) \cdot \mu, \quad \mu = \frac{X(\xi, t)}{\alpha + \sqrt{\left(\frac{X(\xi, t) - X(\xi, t + \Delta t)}{\Delta t}\right)^2}}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  - некоторое число.

### 3. Нелинейный эволюционный оператор хаотичности.

Представляет собой нелинейное усиление регулярных компонент сигнала  $U(\xi, t)$ , где  $\xi$  - момент времени (или этап) обработки (эволюции) поля как системы,  $t$  - параметр поля (для сейсмических полей  $t$  - это время).

Нелинейный эволюционный оператор действует на поле согласно формулам:

$$U(\xi_{i+1}, t) = U(\xi_i, t) \cdot \exp(-\Omega(U(\xi_i, t))). \quad (8)$$

или

$$U(\xi_{i+1}, t) = U(t) \cdot \exp\left(-\sum_i \Omega(U(\xi_i, t))\right). \quad (9)$$

$$U(t) = U(\xi, t)|_{\xi=0}$$

Находя меру хаотичности сигнала в различных его фрагментах по формуле (6), а также, используя корректирующий оператор  $B$ , формула (7), можно реализовать процесс самоорганизации регулярных компонент поля за счет затухания наиболее хаотичных компонент согласно формулам (8) и (9), переписав их в следующем виде

$$U(\xi_{i+1}, x, y) = U(\xi_i, x, y) \cdot \exp(-B(X(\xi_i, x, y)))$$

или

$$U(\xi_{i+1}, x, y) = U(\xi_i, x, y) \cdot \exp\left(-B\left(C_2\left(\Psi\left(U(\xi_i, x, y), m, \tau_x, \tau_y, \varepsilon\right)\right)\right)\right), \quad (10)$$

а также

$$U(\xi_{i+1}, x, y) = U_0(x, y) \cdot \exp\left(-\sum_i B\left(C_2\left(\Psi\left(U(\xi_i, x, y), m, \tau_x, \tau_y, \varepsilon_i\right)\right)\right)\right). \quad (11)$$

Пусть  $U_0$  точный сигнал, представлен на рис. 3. Пусть зашумленный сигнал с уровнем шума, равного максимальной амплитуде точного сигнала, имитирующий фрагмент волнового поля представлен в виде  $S = U_0 + N$  (рис. 4), где,  $N$  - нормальный шум с параметрами  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 1$

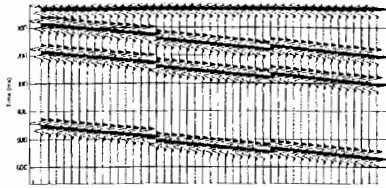


Рис. 3.  $U_0$

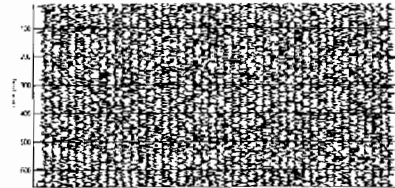


Рис. 4.  $S$

В результате применения к  $S$  формулы (11), после 3-х итераций, получаем следующий результат (рис. 5).

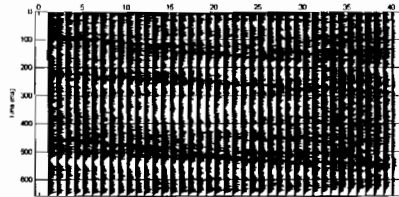


Рис. 5. Результат фильтрации

Распределение наиболее «темных» участков в полученных изображениях стремится к распределению фаз точного сигнала  $U_0$ . Формулы (10) и (11) определяют фильтры, построенные на принципе эволюции в эффективном времени по параметру хаотичности исходного, осложненного помехами сигнала.

В четвертой главе «Оценка качества результата преобразования поля и определение критериев оптимальности параметров преобразования» обосновывается первое защищаемое положение: на основе эффективного параметра регулярности, взятого по мере хаотичности, описываются методики формирования критериев  $J_A$  оптимальности применяемых преобразований поля.

Решается задача в постановке (3) для получения оптимальных значений параметров преобразования поля.

Выражение для критерия  $J_A$  может определяться по двум методикам, имеющим схожие принципы, но отличающиеся стратегии:

- на основе экспертных оценок (названная экспертной стратегией),
- на основе моделей поля с априори известным качеством (названная калибровочной стратегией).

**Экспертная стратегия**, или стратегия на основе использования шкалы экспертных оценок применяется в тех случаях, когда трудно указать иную эталонную шкалу.

Методика определения выражения для критерия  $J_A$  с использованием экспертной стратегии состоит из следующих операций:

- 1) построение модели поля с некоторым соотношением сигнал/шум;

- 2) выполнение нескольких (отличающихся только значениями параметров) преобразований (фильтраций) модели поля по формуле

$$U' = A[U(\xi), \bar{p}], \quad (12)$$

- 3) построение для каждого  $j$ -го результата преобразования (фильтрации) функцию

$$C_2 = C_2(\mathbf{U}_j, \ell).$$

- 4) выполнение экспертной оценки каждого  $j$ -го результата преобразования (фильтрации);  
 5) определение критерия  $J_A$  на основе характеристик функции  $C_2$  таким образом, чтобы оценка, полученная с его помощью, максимально согласовывалась с мнением эксперта.

Сущность методики состоит в подборе перечня и порядка применения операций над кривой качества  $C_2 = C_2(\mathbf{U}_j, \ell)$ , чтобы получившееся выражение  $J_A$  давало оценку (число) максимально близкую к экспертной оценке качества.

Рассмотрим процесс формирования критерия оптимальности интенсивности дополнительно наводимого шума фильтра на основе моделирования стохастического резонанса. Эксперту предлагалось оценить степень возникновения эффекта стохастического резонанса в результате обработки модели поля СР-фильтром с различной интенсивностью наводимого шума.

Получив при некоторой интенсивности  $D$  результат  $M'_D$  СР-фильтрации, построив соответствующую кривую  $C_2 = C_2(M'_D, \ell)$  и получив ее производную  $\rho_D = \frac{dC_2(M'_D, \ell)}{d\ell}$ , можно оценить меру регулярности  $J(M'_D)$  результата СР-фильтрации  $M'_D$  на основе параметра максимума  $\max(\rho_D)$  и моды  $\ell$  производной  $\rho_D$  функции корреляционного интеграла в виде

$$J(M'_D) = \frac{\ell}{\max(\rho_D)}, \quad (13)$$

$$\ell : \rho_D(\ell) = \max(\rho_D).$$

Для разных результатов фильтрации были вычислены соответствующие отношения по формуле (13). Оценка по формуле (13) согласуется с аналогичным графиком экспертных оценок. Полученное выражение (13) критерий оптимальности параметра СР-фильтра позволяет организовать итерационный процесс подбора оптимальной интенсивности возбуждающего шума СР-фильтра.

**Калибровочная стратегия**, или стратегия на основе сравнения шкалы оценок по критерию  $J_A$  с некоторой эталонной шкалой. Она является развитием экспертной стратегии. В экспертной стратегии эталоном выступал эксперт и его оценка. Калиб-

ровочная стратегия предполагает наличие более формального, менее зависящего от мнения эксперта, эталона – характеристики поля. Примером такого эталона, может служить формальное соотношение сигнал/шум и содержащие эти соотношения модели.

Сущность методики на основе калибровочной стратегии состоит в подборе перечня и порядка применения операций над кривой качества  $C_2 = C_2(\mathbf{U}_j, \ell)$ , чтобы получившееся выражение  $J_A$  давало оценку максимально близкую к оценке соотношения сигнал/шум в соответствующей модели.

Методика определения выражения для критерия  $J_A$  с использованием калибровочной стратегии состоит из следующих операций:

- 1) построение  $N$  моделей поля с одинаковым сигналом, но различным уровнем шума таким образом, чтобы полученные соотношения сигнал/шум будут представлять упорядоченное множество и иметь взаимно однозначное соответствие с порядковыми номерами на полуоси номеров моделей;
- 2) построение для каждой  $j$ -ой модели поля функцию  $C_2 = C_2(\mathbf{U}_j, \ell)$ ;
- 3) определение критерия  $J_A$  на основе характеристик функции  $C_2$  так, чтобы оценки, полученные с его помощью, согласовывались с оценками соотношения сигнал/шум в соответствующих моделях полей.

При калибровочной стратегии выражение для критерия  $J_A$  не зависит от оператора  $A$  преобразования поля. Главное, чтобы в результате воздействия оператора  $A$  изменялось соотношение сигнал/шум по сравнению с тем, которое было в поле до обработки.

По данной методике разработано несколько выражений для критерия. Приведены в диссертации. Достаточно устойчивым к вариациям шума в моделях сигнал/шум оказался критерий  $J_A$ , определяемый как сумма приращений функции корреляционного интеграла задается следующим образом:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} (C_2(\mathbf{U}, \ell_{\min} + (i+1) \cdot d\ell) - C_2(\mathbf{U}, \ell_{\min} + i \cdot d\ell)), \quad (14)$$

где  $\ell_{\min}$  - минимальный радиус окрестности точки в фазовом пространстве;

$d\ell$  - минимальное приращение радиуса,

выражение  $\ell_{\min} + N \cdot d\ell = \ell_N$  определяет максимальный радиус окрестности точки, он определяется, исходя из системы двух условий:

$$\begin{cases} C_2(\ell_N) = k \cdot \ell_N + C_2(\ell_{\min}), \\ \text{для } \forall \ell_i \in [\ell_{\min} \dots \ell_N], C_2(\ell_i) < k \cdot \ell_i + C_2(\ell_{\min}), \end{cases}$$



где  $k$  - коэффициент наклона функции  $y = k \cdot \ell_i + C_2(\ell_{\min})$ , касательной к функции  $C_2 = C_2(U, \ell)$  в точке  $\ell = \ell_N$ .

Поле, представленное на рис. 8 подвергалось полосовой фильтрации 22-мя полосовыми фильтрами, отличающихся полосой частот. Ниже приведены 4 результата фильтрации (рис. 6,7,8,9), соответствующие 4-м полосовым фильтрам со своей полосой пропускания и график зависимости критерия  $J_A$ , посчитанного для каждого из 22-х результатов фильтрации.

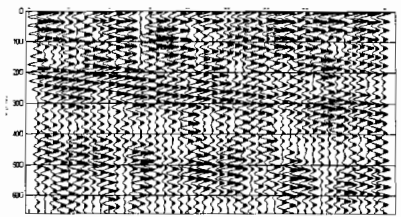


Рис. 6. Результат фильтрации при  $\sigma = 9$

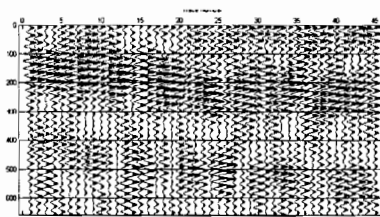


Рис. 7. Результат фильтрации при  $\sigma = 10$

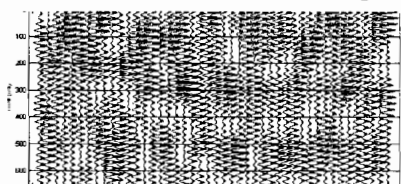


Рис. 8. Результат фильтрации при  $\sigma = 11$

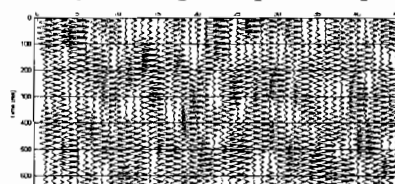


Рис. 9. Результат фильтрации при  $\sigma = 12$

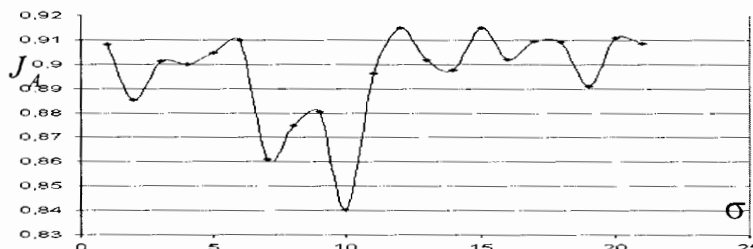


Рис. 10. Зависимость оценки результат фильтрации по критерию  $\mathfrak{J}$  от номера фильтра.

Оценка (рис. 10) по критерию (14) дает глобальный минимум для фильтра с номером 10. Полоса частот фильтра с номером 10 максимально соответствует спектру полезного сигнала, представленного на рис. 3.

Рассмотрение кривых, подобных той, которая приведена на рисунке 10, дает эксперту дополнительную информацию при принятии решения об оптимальности выбираемых им значений параметров обработки поля, а также создает предпосылки к автоматическому нахождению оптимальных значений параметров обработки.

**В пятой главе «Управление неопределенностью взаимосвязей между параметрами поля и параметрами среды на основе нечетких множеств» обосновывается третье защищаемое положение.**

Изложена методика установления взаимосвязей между геолого-геофизическими параметрами на основе аппарата нечетких множеств для возможно-

сти переоценки взаимосвязей и прогнозов, сделанных на основе корреляционных зависимостей, для более полного учета нечеткой структуры отношений между параметрами и возможностью прогнозирования с оценкой меры неопределенности прогноза.

Методика нечеткого моделирования применительно к анализу экспериментальных данных состоит в следующем.

1. Фазификация отношения между данными – их представление в виде функции принадлежности одной переменной при условии принятия конкретного значения другой. Итогом служит функция принадлежности для нечеткого отношения между парой переменных, позволяющая оценить меру истинности любого прогнозируемого значения переменной по экспериментальным данным (рис. 11).

Фазификация нечеткого отношения  $R(X \rightarrow Y)$

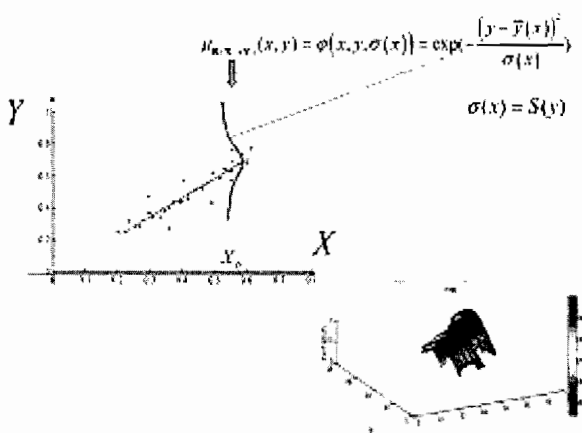


Рис.11. Нечеткое отношение между Y и X и его фазификация

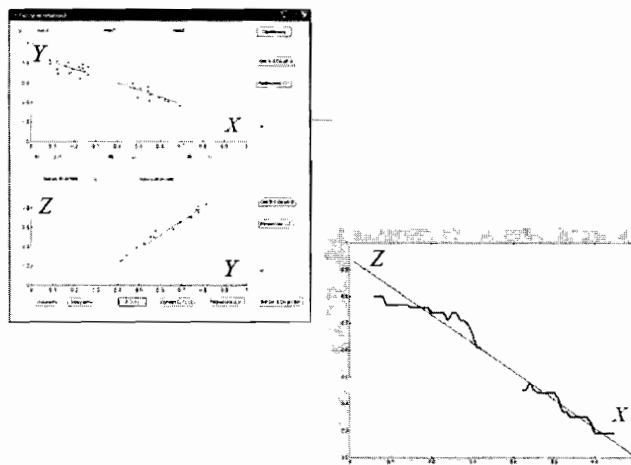


Рис.12. Сравнение результатов построения зависимостей по линиям регрессии и по предлагаемой методике нечеткого моделирования

2. Нечеткая композиция по Мамдани для случая систем данных с общими переменными. Алгоритм позволяет построить функцию принадлежности для нечеткого отношения между переменными, в которых исключены промежуточные – переходные переменные (обозначены  $y \in Y$ ). Итогом служит функция принадлежности для нечеткого отношения между парами данных с исключенными промежуточными параметрами, позволяющая оценить меру истинности любого прогнозируемого значения конечной переменной  $z$  по начальной  $x$ , отражающую истинную информацию, содержащуюся в экспериментальных данных.

3. Дефазификация установленных нечетких отношений, обеспечивающая переход от нечетких к четким зависимостям с оценкой меры неопределенности.

Эта методика была программно реализована с целью проведения экспериментов, демонстрирующих простоту и одновременную эффективность замены принципов поиска корреляционных связей на принципы нечеткого моделирования.

На рисунке 12 показаны результаты построения зависимостей для прогноза значения характеристики  $Z$  по значениям характеристики  $X$ . Видно, что использование регрессионных зависимостей не дает автоматически учесть тот факт, что зависимость между  $Z$  и  $X$  определена не для всех  $X$ . Напротив, зависимость, построенная по методике нечеткого моделирования, позволяет этот факт контролировать и оценивать меру доверия (или меру неопределенности).

### **Заключение**

В данной работе рассматривался вопрос управления качеством системы реконструкции физико-геологической модели среды. Делался акцент на необходимости управления качеством результатов формальных преобразований поля и процессами установления взаимосвязей между параметрами среды и поля, а также прогнозирования значений.

В результате системного анализа процессов обработки поля было установлено, что качество преобразования связано с понятием регулярности поля. Была продемонстрирована возможность возникновения стохастического резонанса в виде усиления регулярных компонент поля при его дополнительном зашумлении специально наводимым шумом определенной интенсивности. С целью ответить на вопрос – в какой мере поле регулярно – потребовалось ввести специальную шкалу измерения меры регулярности. Был выполнен анализ различных мер, в результате которого было отдано предпочтение инвариантной мере хаотичности. Хаотический режим является переходным между регулярным и нерегулярным режимами отображения динамической системы в поле. Поэтому, его мера естественным образом способна отображать переход из режима с большей хаотичностью/нерегулярностью, в режим с меньшей хаотичностью/регулярностью.

В качестве меры хаотичности поля была принята оценка корреляционного интеграла в реконструированном по отсчетам поля псевдо-фазовом пространстве.

Было показано, что корреляционный интеграл дает относительную оценку уровня шума для поля. Этот факт использовался в двух направлениях развития методов поддержки принятия решения, влияющего на качество результата того или иного преобразования поля и нахождения оптимальных значений параметров преобразований.

Первое направление было связано с построением изображений поля, отражающих классификацию его компонент посредством оценивания соотношения сиг-

нал/шум. Были разработаны: фильтр на основе стохастического резонанса и эволюционный хаотический фильтр.

Второе направление было связано с построением функций корреляционного интеграла, которые отражали соотношение сигнал/шум не для отдельно выбираемых в скользящем окне фрагментов поля, а для всего рассматриваемого поля в целом. Поскольку существуют преобразования, изменяющие в поле соотношение сигнал/шум, то это изменение сказывается на поведении функции корреляционного интеграла. Таким образом, результаты преобразований поля ранжируются по выбранному критерию качества и появляется возможность поиска оптимальных значений критерия, по которым устанавливаются оптимальные значения параметров преобразования или фильтрации.

Критериальный подход, примененный А.И. Кобруновым для доопределения обратных задач геофизики, определяет естественную нечеткость результата и находит свое развитие в задачах обработки поля, при доопределении формальных и эталонирующих преобразований поля. Концепция нечеткости находит свое применение в задачах установления взаимосвязей между геолого-геофизическими параметрами и прогноза и, в целом, позволяет организовать контроль относительной достоверности получаемых результатов до их проверки на практике и тем самым снизить риски принятия управленческих решений, ссылающихся на достоверность модельных построений.

### **Основные научные результаты**

Впервые выполнена постановка и исследование задачи системной организации процесса реконструкции моделей сложно-построенных сред на основе принципов критериальности и нечеткости.

Сформулированы принципы и развита методика определения критериев оптимальности параметров фильтрации сейсмических данных для оценки и управления качеством их обработки на основе трансформации результата обработки в псевдофазовое пространство и расчета в нем функции корреляционного интеграла.

Исследованы нелинейные эффекты стохастического резонанса позволяющего выявить регулярные компоненты сигнала с использованием специально сконструированного нелинейного фильтра.

Показано, что нелинейная эволюционная хаотическая фильтрация в эффективном времени приводит к возникновению синергетического эффекта, позволяющего обнаруживать регулярные компоненты сигнала.

Разработаны принципы и методика прогнозирования значений характеристик геологической среды на основе применения аппарата нечетких множеств для повы-

шения объективности и достоверности прогнозов параметров с оценкой меры возможности того или иного прогноза.

### **Основные практические результаты**

закljučаются в том, что разработанные принципы системного анализа, методы и рекомендации обеспечивают возможность повышения информационной эффективности комплекса геофизических работ и, в частности:

- предлагаемые в работе фильтры помогают принимать решение о местонахождении регулярных компонент сигналов в сильно зашумленных геофизических полях и дополняют традиционные методы обнаружения сигнала;
- предлагаемые в работе критерии обеспечивают возможность численной оценки результата произвольной фильтрации и преобразований для контроля качества обработки геофизических полей;
- предлагаемая в работе методика нечеткого моделирования обеспечивает учет и управление множественностью вариантов установления взаимосвязей между геолого-геофизическими параметрами при прогнозировании их значений с численной оценкой меры истинности;
- результаты работ закладывают основы дальнейших исследований в области системного анализа геофизических данных.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

Статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Кобрунов А.И., Григорьевых А.В. Методы нечеткого моделирования при изучении взаимосвязей между геофизическими параметрами // Геофизика. – 2010. – № 2. – С. 17-23
2. Кобрунов А.И., Григорьевых А.В. Об эффективных параметрах хаотичности и принципах их использования при обработке геофизических данных // Геофизика. – 2009. – № 5. – С. 3-9

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

1. Григорьевых А.В. О принципах анализа осложненных помехами сигналов и полей в процессе поиска полезной информации в среде. // VIII международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех- 2007» (21-23 марта 2007 г.; Ухта): Материалы конференции. – Ухта, 2007. – ч. 1. – С.100-102.
2. Григорьевых А.В. Исследование степени хаотичности сейсмической записи // Научно-практический семинар молодых специалистов и ученых филиала ООО

- «ВНИИГАЗ»-«Севернипигаз», посвященного 60-летию ВНИИГАЗа (20-23 мая 2008 г.; Ухта): Тезисы докладов. – Ухта, 2008. С. 33-34.
3. Григорьевых А.В. Количественная оценка меры хаотичности сигналов и полей // Применение новых технологий в газовой отрасли: опыт и преимущество (30 сент.-1 окт. 2008 г.): Тезисы докладов. – М.: ВНИИГАЗ, 2008. – С. 250-251.
  4. Григорьевых А. В. Моделирование в Seislab // IX международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2008» (19-21 марта 2008 г.): Материалы конференции: В 3 ч., Ч. 1. – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 103-106
  5. Григорьевых А.В., Художилова А.Н. Исследование эффекта стохастического резонанса // IX международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2008» (19-21 марта 2008 г.): Материалы конференции: – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 151-153.
  6. Григорьевых А.В. Кобрунов А.И. Построение эффективной характеристики сложно-построенной среды на основе определения эффективного параметра разрушения сигнала // 35-я сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (29 янв.-3 февр. 2008 г.; Ухта): Материалы семинара. – Сыктывкар, 2007. – С. 65-66.
  7. Кобрунов А.И., Григорьевых А.В. К вопросу о построении эффективных моделей по геофизическим полям // 35-я сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (29 янв.-3 февр. 2008 г.; Ухта): Материалы семинара. – Сыктывкар, 2007. – С. 125-128.
  8. Григорьевых А.В. Кобрунов А.И. Геометрический принцип построения эффективных моделей по геофизическим полям // 36-я сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей (26-31 января 2009 г.; Казань): Материалы семинара / Сост. Н.Н. Равилова. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2009. – С. 110-112.
  9. Григорьевых А.В. Метод поиска слабоконтрастных аномалий в существенно-нерегулярных данных // X международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2009» (18-20 марта 2009 г.; Ухта): Материалы конференции: В 4 ч., Ч. 1. – Ухта, 2009. – С. 162-166.
  10. Григорьевых А.В. Построение моделей эффективного параметра при интерпретации геофизических данных // X международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2009» (18-20 марта 2009 г.; Ухта). Материалы конференции: В 4 ч., Ч. 2 – Ухта, 2009. – С. 172-176.

11. Григорьевых А.В. Seislab как среда для тестирования алгоритмов обработки геофизических полей // 37-я сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (25-29 января. 2010 г.; Москва): Материалы семинара. – Москва: ИФЗ РАН, 2010. – С.116-120.
12. Кобрунов А.И., Григорьевых А.В. Принципы фильтрации на основе стохастического резонанса. // 37-я сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (25-29 января. 2010 г.; Москва): Материалы семинара. – Москва: ИФЗ РАН, 2010. – С.181-185.
13. Кобрунов А.И., Григорьевых А.В., Художилова А.Н. Нечеткие модели в задачах корреляционно-регрессионного анализа. // 37-я сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (25-29 января. 2010 г.; Москва): Материалы семинара. – Москва: ИФЗ РАН, 2010.
14. Григорьевых А.В., Кобрунов А.И. Стохастический резонанс в задачах фильтрации геофизических полей // VI Международного семинара ГОУ ВПО ВГТУ «Физико-математическое моделирование систем»: Материалы семинара. – Воронеж, 2010. – Ч. 2, – С. 127-131.
15. Григорьевых А.В., Кобрунов А.И. Формальный критерий оценки качества обработки сейсмической информации // II научно-практическая конференция молодых специалистов и ученых «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (6-7 октября, 2010.; Москва): Тезисы докладов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. – 13 С.
16. Григорьевых А.В., Кобрунов А.И. Формальный критерий оценки качества обработки сейсмической информации // VII научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Инновации в нефтегазовой отрасли - 2010» (28 июня – 02 июля 2010 г.; Ухта). Тезисы докладов. – Ухта: Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, 2010. – 13 С.
17. Григорьевых А.В., Кобрунов А.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613402 SRFilter (Зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 21 мая 2010 г.).
18. Григорьевых А.В., Кобрунов А.И. О критериях оптимальности для неоптимальных фильтров. // 38-я сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (24-28 января. 2011 г.; Пермь): Материалы семинара. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – С. 79-83.

Подписано к печати 09.03.2011 г.

Заказ № 1000

Объем 1,5 п.л. Формат бумаги А5

Тираж 150 экз.

---

Отпечатано в филиале ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта  
По адресу 169300, г. Ухта, ул. Севастопольская, 1а, Тел. 75-16-85