



СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНОМАЛИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ПРОГНОЗЕ

В. В. Филатов

Рассмотрен подход к проблемам прогнозирования, связанный с использованием упорядоченности как критерия прогноза в геолого-геофизических задачах. Подход базируется на реконструкции аттракторов динамических систем, в результате воздействия которых образовались прогнозируемые геологические объекты. Поведение аттрактора является показателем степени упорядоченности участка земной коры. Кроме того, такой аттрактор, создавая фазовый портрет системы, показывает дополнительные латентные связи между параметрами, поведение которых он отражает. Использование этих связей позволяет оценить горизонт прогноза и по-новому сформировать прогнозный параметр.

Ключевые слова: упорядоченность, динамические системы, синергетика, странные аттракторы, фазовое пространство, теорема Такенса, геолого-геофизический прогноз, прогнозный параметр.

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF GEOPHYSICAL FIELDS ANOMALIES AND THEIR USE IN FORECASTING

V. V. Filatov

An approach related to the use of order as a forecast criterion in geologic-geophysical problems is considered. The approach is based on reconstructing attractors of dynamic systems by the action of which predictable geologic bodies were formed. The behavior of such attractor is an indicator of order characteristics of the Earth Crust's region. In addition this attractor creating a phase portrait of the system produces complementary latent connections between parameters of the dynamic system. The application of these connections allows estimating a forecast horizon and shaping the forecast parameter in a new fashion.

Keywords: order, dynamic systems, synergy, strange attractors, phase space, Takens's theorem, Lyapunov's indicators, geologic-geophysical forecast, forecast parameter.

Геолого-геофизический прогноз является сложной многоуровневой и многопараметрической задачей, решение которой требует привлечения разнообразных методов и данных. Как показывают многочисленные исследования, для решения такого рода задач может оказаться целесообразным использование подхода, базирующегося на принципах синергетики. Начиная с конца прошлого века этот подход приобретает все большую популярность в самых разных областях науки. Сформировалась новая парадигма нелинейной геологии, в основу которой легли синергетические положения о фундаментальной способности сильно неравновесных систем порождать высокоорганизованные структуры [2]. Развиваемый при этом подход базируется на изучении самоорганизации в нелинейных системах с использованием единства таких характеристик, как открытость или закрытость (изолированность), линейность или нелинейность, стабильность или неустойчивость, порядок или хаос, самоорганизация, диссипативность, фрактальность и т. д. Для их математического описания используются такие понятия, как параметры порядка, аттракторы, бифуркация, странные аттракторы, фракталы, хаос и порядок, неравновесность, диссипативные структуры, когерентность и др.

В частности, открытость означает свойство системы, при котором она имеет возможность непрерывного обмена веществом и энергией с окружающей средой. Причем возможности такого обмена существуют в каждой точке системы, а не только через фиксированные каналы. Очевидно, что большинство систем, рассматриваемых в геологии, относятся к категории открытых.

В соответствии с процессами обмена энергией для геологических систем можно определить два типа эволюции. При первом типе поведение системы характеризуется процессами разупорядочивания и хаотизации, протекающими согласно второму началу термодинамики о росте энтропии.

С этим типом эволюции связано понятие «диссипативные» (в пер. с англ. «рассеивающие») – так обозначаются открытые нелинейные системы, где преобладают процессы размывания, рассеивания неоднородностей.

Во втором типе мы наблюдаем усложнение и упорядочивание системы, обусловленное процессами самоорганизации. Понятие самоорганизации выражает способность сложных систем к упорядочению своей внутренней структуры. Самоорганизация в сложных и динамичных открытых системах возможна лишь при наличии достаточно большого числа взаимодействующих элементов, причем поведение взаимодействующих



щих элементов должно быть кооперативным и когерентным.

В соответствии с этим в работах [2, 3] выделяются два типа геологических объектов, возникших в результате:

- 1) *разрушения, накопления деформаций;*
- 2) *упорядочивания, самоорганизации изначально однородной, менее упорядоченной среды.*

Очевидно, что разные типы объектов подразумевают и различные подходы к формированию прогноза на основе палеорекострукции.

Но, по-видимому, такое разграничение не совсем справедливо. Любая система в своем развитии проходит два этапа. Согласно теории самоорганизации иерархически построенных систем, их структурированность и контрастность возрастают с повышением степени неравновесности системы и уменьшения энтропии [7]. Ее основные черты формируются в период максимального притока в систему внешней энергии, например на этапе формирования месторождения. После прекращения активного внешнего воздействия система стремится к состоянию термодинамического равновесия, что делает ее консервативной и способствует длительному сохранению внутренней структуры аномальных геофизических и геохимических полей.

Именно эта структура несет в себе отпечаток динамических особенностей формирования месторождения, и ее изучение позволяет по-новому подойти к проблеме прогноза.

Один из возможных способов исследования такой структуры основан на анализе аттрактора соответствующей динамической системы.

Особенности открытых динамических систем

Отметим некоторые особенности открытых динамических систем, которые необходимо учесть при формировании нового подхода? связанного с синергетикой.

1. Прежде всего, это нелинейность – фундаментальное свойство любой открытой системы, предполагающее непрерывность выбора альтернатив ее развития. Нелинейная система обязательно многомерна, многовариантна и не поддается классическим методам описания, что порождает потребность в выработке методов, которые отвечали бы условиям конкретной задачи. В математике нелинейными называют уравнения, которые имеют несколько качественно различных решений и, соответственно, множество путей эволюции, описываемой этими уравнениями. Именно такими являются реальные геодинимические системы. Подавляющее большинство взаимодействий в природных геологических процессах необратимы и нелинейны – отклик не прямо пропорционален действию.

Процессы, описываемые подобными системами, детерминированно-хаотические. Высокая чувствительность к заданию начальных условий

в таких процессах приводит к тому, что их развитие невозможно предсказать на длительный промежуток времени.

Чувствительность к заданию начальных условий в нелинейных динамических системах не позволяет делать прогнозов развития «по прямой линии». Будущее не укладывается в рамки простой «геометрии». Наглядной иллюстрацией этого является несложный численный эксперимент, поставленный с системой уравнений Лоренца, моделирующей простейшую модель конвекции воздуха (она играет важную роль в динамике атмосферы).

Из рис. 1 видно, как «деформируется» с течением времени область в фазовом пространстве (пространстве параметров), соответствующая близким начальным условиям и имеющая в начальный момент шарообразную форму. Первоначально однородный объем в результате перемешивания приобретает весьма сложную форму, которая становится неоднородной, «дырявой», т. е. фрактальной. Спустя некоторое время начальная область независимо от размеров, формы и расположения изменится таким образом, что ее кусочки можно будет обнаружить в любой зоне в пределах возможного изменения параметров.

Отсюда видно, что прогноз, особенно количественная оценка или конкретное предсказание, учитывая невозможность получения абсолютно точных начальных условий, будет **ненадежным**. Так же обстоит дело с реконструкцией прошлого. Хотя, казалось бы, здесь проблем быть не должно. *Раз точки удаляются одна от другой при движении вперед, они должны сближаться при движении назад.* Так оно и есть. Однако направлений, по которым может происходить схождение или расхождение в фазовом пространстве, *не одно, а несколько.* При движении и вперед, и назад точки могут сближаться по одной части направлений, но расходиться по другой. Чтобы реконструировать прошлое, кроме самой динамической системы нужна достаточная по количеству и надежная по качеству информация из этого прошлого. Следует отметить, что на разных участках исторического процесса степень его хаотичности **различна** и может даже падать до нуля (ситуация, когда все существенное предопределено). Естественно, что *чем менее хаотична система, тем проще реконструируется ее прошлое.*

2. Наглядно об эволюции системы можно судить по виду аттрактора. Понятие «аттрактор» (от лат. «притягивать») означает некоторую совокупность условий, при которых выбор путей эволюции разных систем происходит по сходящимся траекториям и в конечном итоге как бы притягивается к одной точке. Эволюция открытых систем часто описывается так называемым странным аттрактором. При состояниях системы, характеризующихся странным аттрактором, становится



Рис. 1. Деформация фазового объема в системе Лоренца

№ 4(16) ♦ 2013

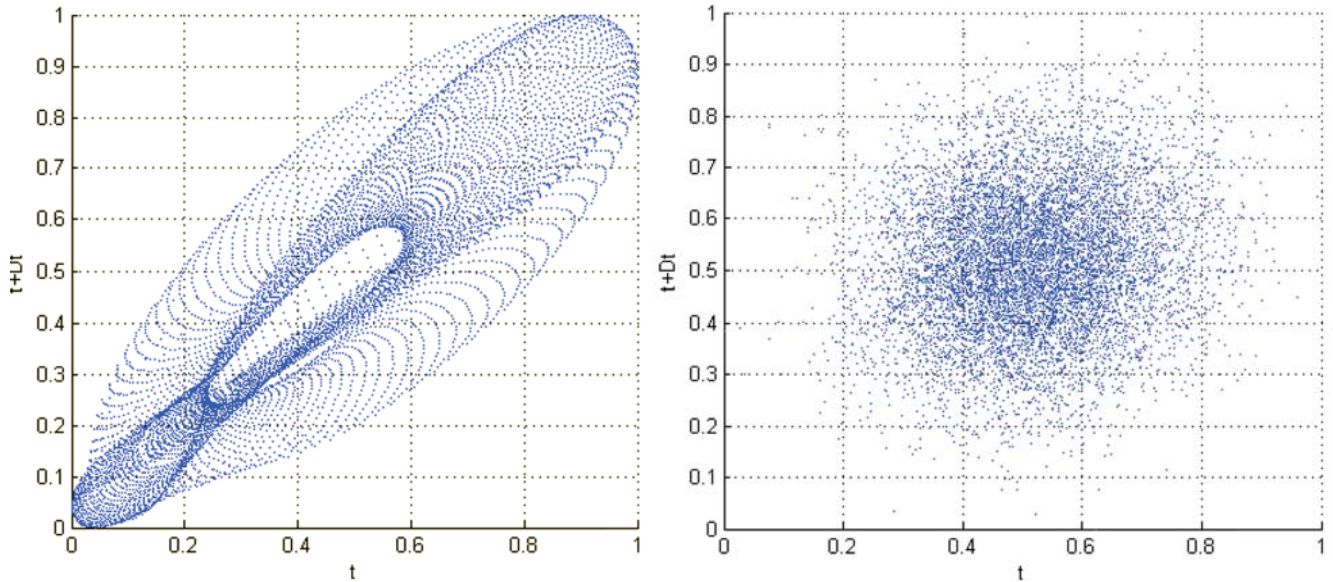


Рис. 2. Пример представления различных данных в виде портрета реализации в реконструированном фазовом пространстве

невозможным определить положение частиц (их поведение) в каждый данный момент, хотя мы и уверены, что они находятся в зоне аттрактора (см. рис. 1). «Фазовый портрет странного аттрактора – это не точка и не предельный цикл, как это имело место для устойчивых, равновесных систем, а некоторая область, по которой происходят случайные блуждания» [5]. С помощью алгоритмов странного аттрактора наука выходит на описание изменений в климате, погодных процессов, движения некоторых небесных тел, поведения многих элементарных частиц, явлений тепловой конвекции и т. д.

3. И наконец, весьма важно для синергетического миропонимания понятие фрактальности (самоподобия). Фракталами обозначают явления масштабной инвариантности, когда последующие формы самоорганизации систем напоминают по своему строению предыдущие.

В теории динамического хаоса, тесно прилегающей к задачам синергетики, фракталы играют большую роль. Например, структура всех странных аттракторов фрактальная, а их фрактальная размерность позволяет получать дополнительную информацию об эволюции динамических систем.

Как уже отмечено, предлагаемый подход к задаче прогнозирования базируется на изучении особенностей эволюции геодинамических систем, отражающихся в поведении соответствующих аттракторов.

Первый вопрос, который при этом возникает, связан с возможностью реконструкции аттрактора динамической системы, в результате гипотетического воздействия которой образовались прогнозируемые геологические объекты.

Теорема Такенса и задача реконструкции аттракторов динамических систем

Современная техника моделирования нелинейных систем основана на решении обратной задачи [1, 2], в которой наблюдаемые скалярные временные ряды рассматриваются как нелинейные проекции фазовой траектории неизвестной диссипативной динамической системы на произвольную координату. Тогда, при некоторых условиях, наложенных на систему, проекция позволяет восстановить копию аттрактора в пространстве R^m подходящей размерности.

Метод реконструкции аттрактора из скалярных временных рядов был предложен как эвристический в [9] и стал строгим благодаря теореме Такенса. В его работе [11] доказано, что почти для всех гладких динамических систем по имеющейся временной реализации одной наблюдаемой динамической переменной можно сконструировать новый аттрактор, основные свойства которого будут такими же, как у исходного. Более точно, все его динамические свойства; размерность, энтропию и ляпуновские показатели можно вычислить по реконструкции.



В простейшем случае анализировать реконструированный аттрактор можно по схеме, суть которой сводится к следующему.

Если изображение выглядит как бесструктурная область, заполненная точками, то это означает, что размерность системы N велика по сравнению с величиной m либо анализируемый сигнал имеет природу случайного шума. Если же сигнал генерируется динамической системой с относительно невысокой размерностью фазового пространства, то наблюдается картинка с характерной выраженной внутренней структурой [6]. Отличие в представлении данных в реконструированном фазовом пространстве видно из рис. 2.

Более того, существуют способы численной реконструкции динамической системы, в результате эволюции которой и возникает смоделированный аттрактор. Остановимся кратко на одном из вариантов такой реконструкции.

Допустим, размерность фазового пространства модели m известна (оценка этой размерности может быть получена с помощью метода корреляционных интегралов [6]). Построим набор векторов состояния системы, отвечающих последовательным точкам траектории:

$$y(n) = (y_m(n), y_{m-1}(n), \dots, y_1(n)).$$

Соотношения, связывающие компоненты вектора состояния в два последовательных дискретных момента времени, можно представить в таком виде [6]:

$$\begin{cases} y_1(n+1) = y_2(n), \\ y_2(n+1) = y_3(n), \\ \dots \\ y_{m-1}(n+1) = y_m(n), \\ y_m(n+1) = f(y_1(n), y_2(n), \dots, y_m(n)). \end{cases} \quad (1)$$

Использование выражений (1) при известной функции f , определяющей связи между параметрами, позволяет прогнозировать эволюцию системы. Ищем функцию f , исходя из минимизации некоторого функционала, который может быть сконструирован различными способами. Критерием выбора, например, может служить возможность моделирования эволюции известных систем.

Таким образом, теорема Такенса открывает пути для реконструкции аттрактора, который позволяет выявить дополнительные латентные связи между параметрами динамической системы и, соответственно, открывает дополнительные возможности для прогноза.

Кроме того, как видно из теоремы, реконструкция аттрактора возможна по одному временному ряду. Рассмотрим, насколько реальна такая реконструкция с помощью приведенного алгоритма на примере странного аттрактора Ресслера.

Система Ресслера [10] предложена на основе динамики химических реакций и описывается системой трех нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z, \\ \frac{dy}{dt} = x + ay, \\ \frac{dz}{dt} = b + (x - r)z, \end{cases}$$

где a, b, r – параметры системы.

При $a = b = 0,2, r = 5,7$ динамика системы приобретает хаотический характер. Традиционный вид аттрактора Ресслера показан на рис. 3.

Пусть задано наблюдение одной координаты системы. Если это координаты x или y , то с помощью системы (1) аттрактор восстанавливается вполне удовлетворительно (рис. 4)

Критерием устойчивости такого восстановления может служить «глубина» прогноза поведения аттрактора, т. е. возможность прогнозирования такого поведения на определенное количество шагов.

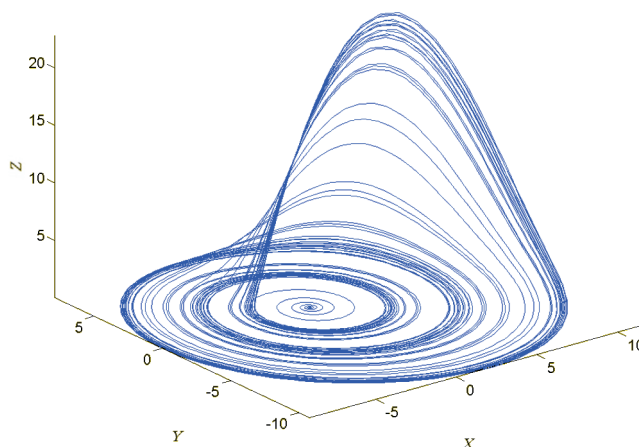


Рис. 3. Аттрактор Ресслера

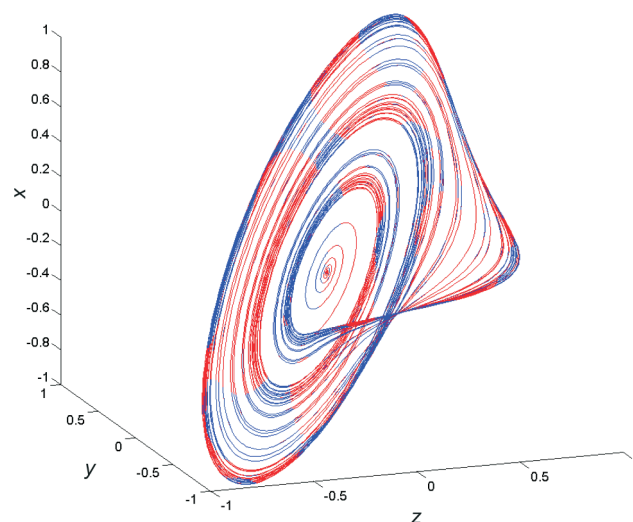


Рис. 4. Сопоставление исходного (синий) и реконструированного по координате x (красный) аттракторов Ресслера

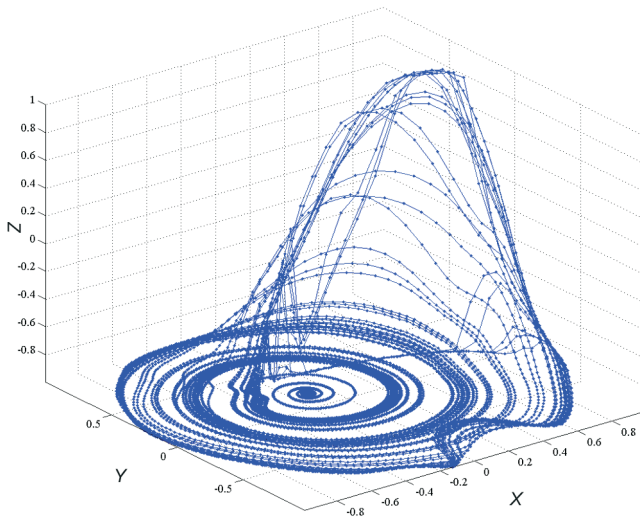


Рис. 5. Прогнозное поведение аттрактора Ресслера, реконструированного по координате x (глубина прогноза 30 шагов)

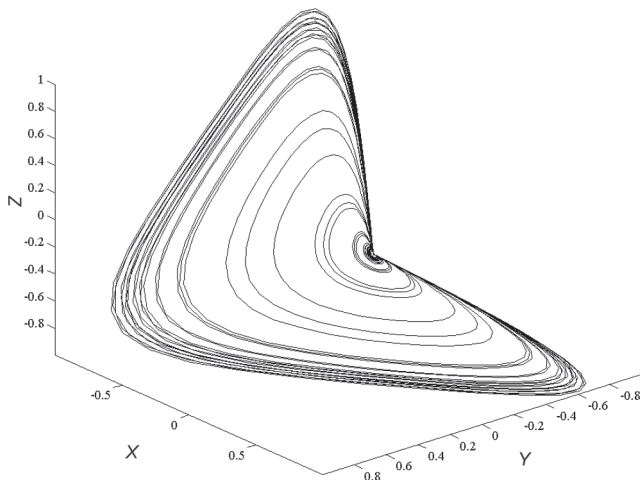


Рис. 6. Аттрактор Ресслера, реконструированный по координате z

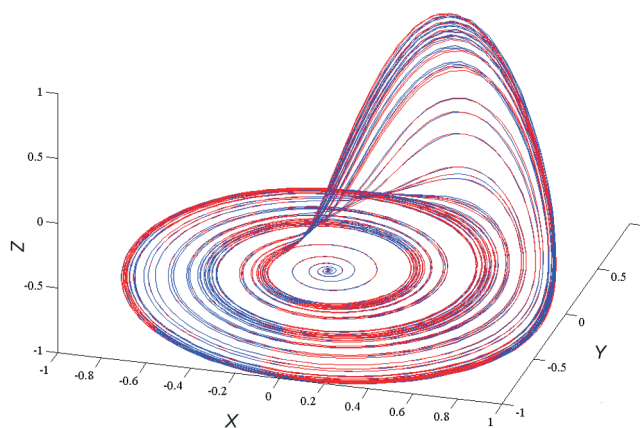


Рис. 7. Сопоставление исходного (синий) и реконструированного по координате x (красный) аттракторов Ресслера (глубина прогноза 30 шагов)

В рассмотренном случае прогноз на 30 шагов приводит к явному отклонению реконструированного аттрактора от исходного (рис. 5). Но если в качестве скалярного ряда выбрать наблюдения по координате z , то полученный в результате ре-

конструкции аттрактор внешне существенно отличается от исходного (рис. 6), хотя в соответствии с теоремой Такенса и наследует его основные динамические свойства.

Таким образом, для адекватной с точки зрения связей между параметрами системы реконструкции существует проблема выбора подходящего временного ряда.

По-видимому, наиболее рациональным решением этой проблемы является использование совокупности m скалярных рядов $\{y_i^j\}_{j=1, \dots, m}$, определяемой с помощью факторного анализа и метода корреляционных интегралов из общей совокупности измеренных параметров.

При этом мы получаем m систем типа (1) в каждой из которых для получения аттрактора используется только одна составляющая. Устойчивость реконструкции аттрактора в этом случае существенно повышается. Так, на рис. 7 показаны прогнозные значения с шагом 30, полученные по указанной схеме, в сравнении с исходным аттрактором Ресслера. Из сравнения с рис. 5 видно преимущество такого варианта реконструкции. Соответственно этот подход дает и достаточно устойчивые связи между различными параметрами.

Итак, по измеренным значениям совокупности геолого-геофизических данных реально реконструировать определенное состояние аттрактора геодинамической системы и с помощью полученного функционала прогнозировать если не грядущее состояние системы в целом, то возможные значения любого из параметров по распределению остальных.

Учитывая отсутствие мониторинговых наблюдений, характеризующих реальной геологический процесс, аттракторы приходится строить по комплексу площадных данных, которые представляют собой своеобразный слепок установившегося состояния системы. Вариант формирования временных рядов по таким данным приведен в работе [8].

Упорядоченность как критерий прогноза

Необходимо отметить один существенный факт. Помимо того что поведение аттрактора является показателем самоорганизации системы, оно иллюстрирует еще одно важное свойство геологических систем. В работе, исследующей основные принципы строения самоорганизованных рудных комплексов [3], сформулировано положение, которое может иметь большое значение для развития прогнозно-поисковой технологии: *месторождения – наиболее упорядоченные участки земной коры.*

Вообще, понятие «упорядоченность», «порядок», равно как и «хаос», в абсолютном смысле не имеют строгого определения. Но в прикладных задачах важно не абсолютное определение, а умение сравнивать относительную степень хаоса



точности (или упорядоченности) различных состояний систем.

С этой точки зрения указанное на рис. 2 отличие в поведении аттракторов можно рассматривать как признак упорядоченности системы. И именно так можно трактовать схему использования аттракторов. Чем геометрия многомерного аттрактора более четкая, тем более тесно связаны параметры системы и, соответственно, выше степень ее упорядоченности.

Можно предложить еще целый ряд критериев относительной упорядоченности, рассматриваемых в физике открытых систем, например, таких как сравнение значений показателей Ляпунова, энтропии Крылова – Колмогорова – Синяя, а также фрактальных размерностей рассматриваемых систем. Но на этих критериях в данной работе останавливаться не будем.

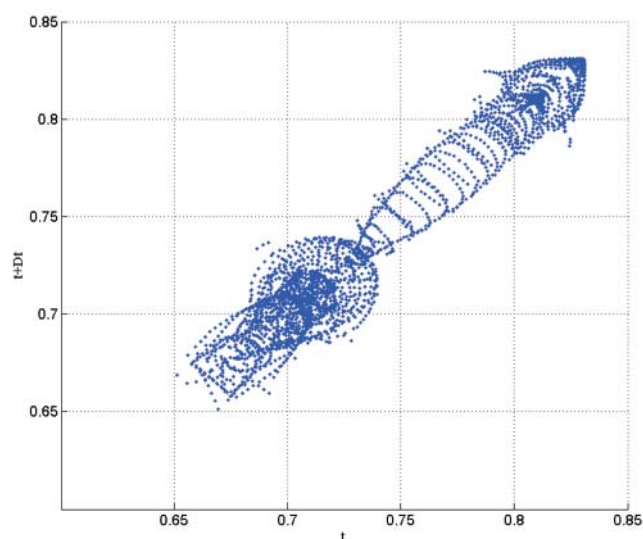


Рис. 8. Аттрактор в фазовом пространстве, реконструированный по реальным данным

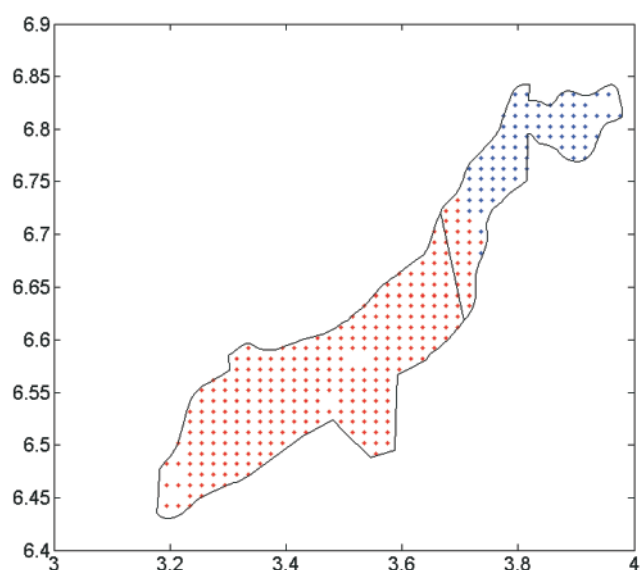


Рис. 9. Сравнение структурных элементов, выделяемых по фазовым кластерам в пределах известной площади (красные и синие точки), с реальным разбиением площади (черная линия) на различные месторождения в условных координатах

Использование предложенной схемы прогноза

Аттракторы, построенные по реальным данным, могут иметь достаточно причудливую форму (рис. 8), обусловленную структурными особенностями геолого-геофизических данных, по которым строился аттрактор. Даже аттрактор, реконструированный по одному параметру, может отражать такие особенности. Так, на рис. 8 показан аттрактор, реконструированный по площадным данным, полученным над месторождением углеводородов, разделенном на два отдельных месторождения. В аттракторе можно достаточно уверенно выделить две части, в каждой из которых точки фазового пространства связаны по-своему. Можно назвать такие области «фазовыми кластерами».

Этим кластерам соответствуют области на площади измерений, которые можно сравнить с реальным выделением на этой площади двух различных месторождений (рис. 9). Провести такое разбиение по исходному распределению измеренных параметров практически невозможно.

Итак, мы видим, что геометрия аттрактора имеет достаточно тесные связи с реальной геологией.

В качестве другого примера, иллюстрирующего предлагаемую схему, рассмотрим модельную задачу прогноза залежей углеводородов на известном участке.

Соответствующий прогнозный параметр для определения положения залежи углеводородов формировался путем моделирования многомерного аттрактора гипотетической динамической системы, связывающей изменение различных геолого-геофизических данных в пределах месторождения. Трехмерный вариант такого аттрактора, связывающий три параметра (наблюдаемое гравитационное поле dG , комплексный геофизический показатель Q и содержание урана по данным аэроспектрометрии U) показан на рис. 10.

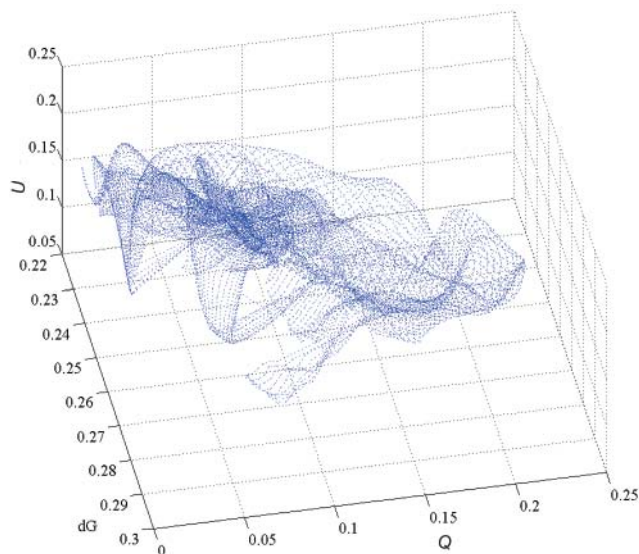


Рис. 10. Аттрактор, связывающий значения трех геофизических параметров, измеренных на исследуемом участке

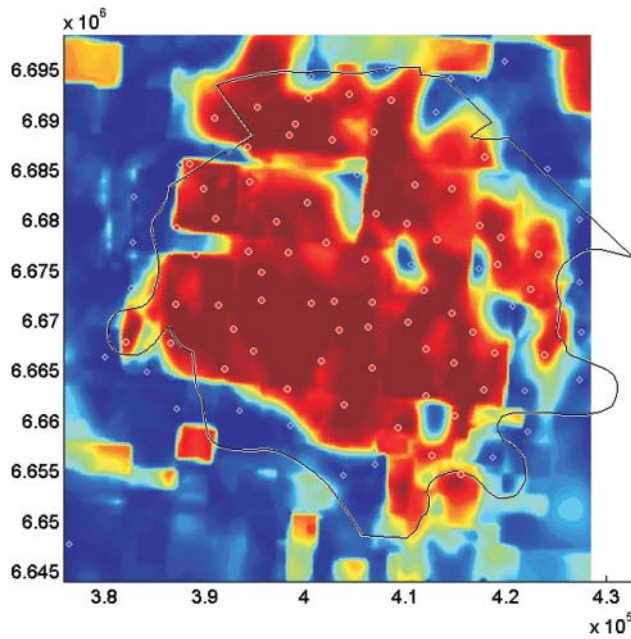


Рис. 11. Прогноз залежей углеводородов на модельном участке (в условных координатах). Красные кружки – продуктивные скважины, синие – непродуктивные, черная линия – традиционные контуры известного месторождения

Распределение численных значений полученного прогнозного параметра приведено на рис. 11 в сравнении с данными по известным скважинам.

Значения параметра меняются от -1 (неблагоприятный прогноз) до $+1$ (наличие залежи). Как видно из рис. 11, распределение прогнозного параметра достаточно хорошо описывает положение продуктивной части коллектора.

При наличии на площади более детальной информации по скважинам предложенная схема позволяет прогнозировать по совокупности геофизических данных такие параметры, как, например, суточный дебит нефти. На рис. 12 показаны результаты сопоставления прогноз-

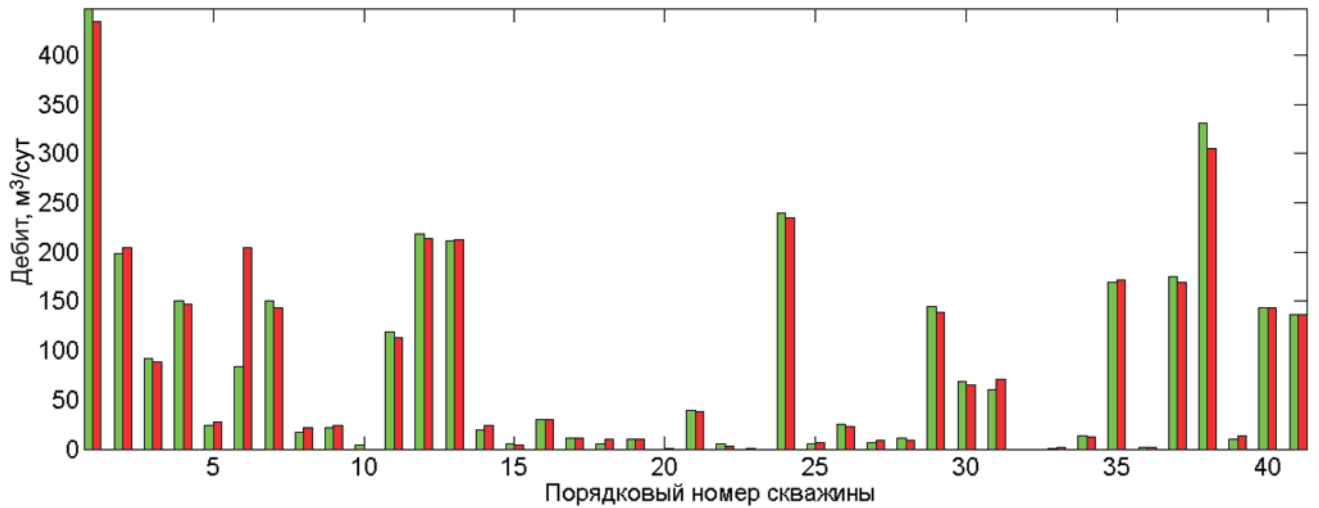
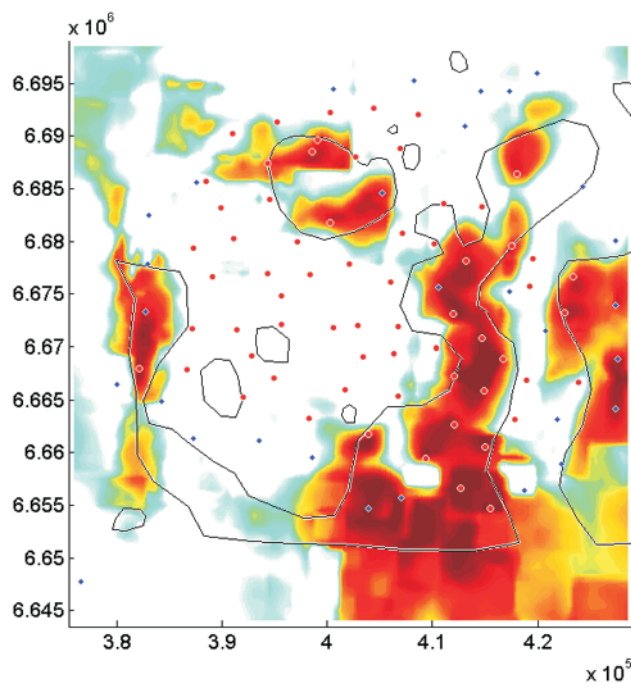


Рис.12. Сопоставление прогнозных данных (красный) и реального (зеленый) суточного дебита нефти по скважинам



ных и реальных параметров дебита по системе скважин.

Использование предлагаемой методики позволяет прогнозировать и другие параметры, влияющие, в частности, на дебитность скважин в пределах месторождения. Одним из таких факторов является засоленность, существенно изменяющая фильтрационно-емкостные параметры коллектора.

На рис. 13 приведен прогноз распределения зон засоленности на том же модельном участке, построенный с помощью описанной методики по комплексу геофизических данных, а для сравнения показаны контуры участков с засоленностью более 5 %, полученные по скважинным данным и результатам изучения керн.

Рис. 13. Прогноз распределения зон засоленности в районе известного месторождения, построенный по комплексу геофизических данных (в условных координатах). Черные контуры – реальные границы участков с засоленностью более 5 %, красные кружки – продуктивные скважины, синие – непродуктивные



Выводы

Использование факторов упорядоченности внутренней структуры наблюдаемых геолого-геофизических данных, отражающихся в поведении реконструированных аттракторов геодинамических систем, позволяет повысить эффективность построения прогнозных моделей. Такое повышение происходит за счет использования дополнительных критериев отбора признаков и дополнительных соотношений, базирующихся на динамических характеристиках.

Предлагаемый подход позволяет отличать совокупности данных, возникших в результате воздействия некоторой геодинамической системы от случайной совокупности данных. Универсальность подхода подтверждается примерами его применения в различных задачах прогнозирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воронов, В. К.** Современная физика : Учебное пособие [Текст] / В. К. Воронов, А. В. Подоплелов. – М. : КомКнига, 2005. – 512 с.
2. **Горяинов, П. М.** Самоорганизация минеральных систем [Текст] / П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк. – М. : ГЕОС, 2001. – 312 с.
3. **Климонтович, Ю. Л.** Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем [Текст] Ю. Д. Климонтович // Успехи физических наук. – 1996. – № 166. – С. 1231–1243.

4. **Котельников, Г. А.** Теоретическая и прикладная синергетика [Текст] / Г. А. Котельников. – Белгород : Изд-во БелГТАСМ ; Крестьянское дело, 2000. – 162 с.

5. **Кузнецов, С. П.** Динамический хаос (курс лекций) [Текст] / С. П. Кузнецов. – М. : Изд-во физ.-мат. лит., 2001. – 296 с.

6. **Летников, Ф. А.** Синергетика геологических систем [Текст] / Ф. А. Летников. – Новосибирск : Наука, 1992. – 228 с.

7. **Самоорганизация** рудных комплексов. Синергетические принципы прогнозирования и поисков полезных ископаемых [Текст] / Г. Ю. Иванюк, П. М. Горяинов, Я. А. Пахомовский [и др.]. – М. : ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2009. – 392 с.

8. **Филатов, В. В.** Синергетические аспекты интерпретации геолого-геофизических данных [Текст] / В. В. Филатов, О. Ю. Светозерский. – М. : ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2010. – 136 с

9. **Geometry** from a time series [Text] / N. H. Packard, J. P. Crutchfield, J. D. Farmer, R. S. Shaw // Phys. Rev. Lett. – 1980. – Vol. 45. – P. 712–716.

10. **Ressler, O. E.** Chemical Turbulence: Chaos in a Small Reaction-Diffusion System [Text] / O. E. Ressler // Z. Naturforsch. – 1976. – Vol. 31. – P. 1168–1172.

11. **Takens, F.** Detecting strange attractors in turbulence [Text] / F. Takens // Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics / Eds D. A. Rand, L.-S. Young. – Berlin : Springer-Verlag, 1980. – Vol. 898. – P. 366–381.

© В. В. Филатов, 2013