

Интеллектуальные системы управления, анализ данных

© 2019 г. Б.А. СУЛЕЙМАНОВ, член-корр. НАН Азербайджана
(baghir.suleymanov@socar.az),
Н.И. ГУСЕЙНОВА, канд. техн. наук (nahide.huseynova@socar.az)
(НИПИ «Нефтегаз» SOCAR, Баку)

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИШЕРА И ШЕННОНА

Для временных рядов, составленных по объемам добываемой и закачиваемой продукции, выполняется расчет энтропий Фишера, Шеннона и других информационных показателей. По их динамике проводится ранняя диагностика временных границ стадийной эволюции месторождения и его отдельных зон, оценка соответствия состояния нефтедобычи планируемым воздействиям на пласт.

Предложенный метод реализован на примере данных нефтяного месторождения Фортис (Fortis). Анализ полученных результатов показал, что эксплуатация месторождения без учета динамики информационных показателей приводит к снижению добычи нефти, увеличению обводненности продукции, нерациональному режиму воздействия на пласт.

Ключевые слова: разработка месторождения, принятие решений, энтропия, количество информации, анализ временных рядов.

DOI: 10.1134/S0005231019050076

1. Введение

Нефтегазовое месторождение представляет собой сложную, неоднородную динамическую многоэлементную систему, внутренние взаимодействия в которой разнообразны, непостоянны, а иногда и случайны. По этой причине не всегда удается выделить причинно-следственные связи между ее элементами, что очень важно при выборе стратегии разработки месторождения, включающей в себя своевременное применение методов увеличения нефтеотдачи.

Для диагностирования текущего состояния пластовой системы месторождений нефти и газа используются различные подходы к анализу промысловых данных. Наиболее популярны гидродинамические и вероятностно-статистические методы [1, 2]. Однако круг задач, решаемых в нефтедобыче, требует использования новых методов, дающих дополнительные сведения о динамике пластовых процессов. Это позволяет принимать обоснованные технологические решения с учетом постоянно меняющегося состояния пластовой системы.

В настоящее время активно развиваются методы анализа временных рядов, основанные на положениях теории динамических систем, теории фрактальной размерности и теории информации. Подобные виды анализа применяются в экономике, метрологии, биологии и т.д. [3–14].

В представленной работе для анализа состояния разработки месторождения предлагается использовать подход, основанный на определении динамики энтропии временных рядов по Фишеру и Шеннону [7–12]. Результаты исследования предназначены для применения при обосновании принятия технологических решений, связанных с выбором стратегии воздействия на пласт и его целенаправленного корректирования на различных стадиях разработки месторождения.

2. Необходимые сведения из теории информации и математические выкладки

Коротко остановимся на понятиях и математических переходах, используемых в статье.

Информация – это сведения, являющиеся объектом хранения, передачи и преобразования, как правило, используемые для осуществления каких-либо управляющих воздействий. Для перенесения в пространстве и времени информация представляется в форме сообщений. Сообщение, вне зависимости от его содержания, всегда отображается в виде сигнала. Сигналы могут быть непрерывными и дискретными как по времени, так и по множеству значений [13, с. 8–9].

Временным рядом называется массив из N чисел, представляющих собой значения некоторой измеренной (наблюдаемой) динамической переменной $x(t)$ с некоторым постоянным шагом Δt по времени [5, с. 99].

Энтропия. В настоящее время существует множество определений этого понятия в том или ином контексте. В данной работе используется информационная энтропия – мера неопределенности или непредсказуемости, упорядоченности некоторой системы [5, с. 103]. Дифференциальная энтропия – энтропия для непрерывных случайных величин [6, с. 24–27].

Энтропия по Фишеру (Функция информации по Фишеру). Мера количества информации (по Фишеру) о параметре θ , содержащейся в одном выборочном наблюдении x из генеральной совокупности X , рассчитывается по формуле [2, с. 239]:

$$(1) \quad FIM(\theta) = E_{\theta} [U(x, \theta)^2],$$

где E_{θ} – знак математического ожидания; $U(x, \theta) = \frac{\partial L}{\partial \theta}$ и $U(x, \theta) = = \frac{\partial}{\partial \theta} \ln P(x, \theta)$ – функция вклада выборки в случаях соответственно непрерывной генеральной совокупности с функцией плотности $f_X(x, \theta)$ распределения $F_X(x)$ и дискретной генеральной совокупности с распределением вероятностей $P(x, \theta)$ ($\sum_x P(x, \theta) = 1$); $L = \sum_k (\ln f_X(x, \theta))$ – функция логарифмического правдоподобия; $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_k) \in \Theta$ – параметр распределения $F_X(x)$ случайной действительной величины x . В качестве параметра θ может быть

рассмотрена любая числовая характеристика этой случайной величины (математическое ожидание a , дисперсия σ и т.п.) или любая константа, явным образом входящая в выражение $F_X(x)$.

Распределение заданных временных рядов подчиняется нормальному закону Гаусса, если $F_X(x)$ характеризуется двумя параметрами $\theta_1 = a$, $\theta_2 = \sigma$ [15, с. 575]:

$$(2) \quad F_X(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x-a}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right],$$

где erf – функция ошибок.

Функция $f_X(x, \theta)$ при нормальном распределении [15, с. 575]:

$$(3) \quad f_X(x, a, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}.$$

Функция L при нормальном распределении для n независимых испытаний определяется следующим образом:

$$(4) \quad L_n = \sum_{k=1}^n \ln(f_X(x, a, \sigma)) = n \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right) - \sum_{k=1}^n \frac{(x_k - a)^2}{2\sigma^2}.$$

Функции вклада выборки при нормальном распределении:

$$U_1 = U(X, \theta_1) = \frac{dL}{d\theta_1} \quad \text{и} \quad U_2 = U(X, \theta_2) = \frac{dL}{d\theta_2}.$$

Для n независимых испытаний значения U_{1n} и U_{2n} определяются следующим образом:

$$(5) \quad U_{1n} = \frac{dL}{da} = \sum_k \frac{(a - x_k)}{\sigma^2},$$

$$(6) \quad U_{2n} = \frac{dL}{d\sigma} = -\frac{n}{\sigma} + \sum_k \frac{(x_k - a)^2}{\sigma^3}.$$

Определение вышеперечисленных функций с учетом времени. Все определяемые выше функции явным образом зависят от x , a и σ , а неявным образом от способа упорядочения вариационного ряда. Исходными данными в поставленной задаче служат временные ряды, следовательно, упорядочение данных изначально проведено по времени t . Зависимость $F_X(x(t))$ от времени неявная. Для учета фактора времени предлагается использовать полиномиальную зависимость, которая в общем виде имеет следующий вид [16, с. 17]:

$$(7) \quad p(t_i) = p_1 t_i^m + p_2 t_i^{m-1} + \dots + p_m t_i + p_{m+1}.$$

Степень полинома m выбирается так, чтобы зависимость $p(t)$ описывала $x(t)$ с наименьшей погрешностью. Аналогичный подход можно применить не

только при нормальном распределении данных, но и к любому типу распределения данных, неявно изменяющихся во времени.

Перепишем формулы (2) и (3) с учетом (7):

$$(8) \quad F_X(p(t)) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{p_1 t^m + p_2 t^{m-1} + \dots + p_m t + p_{m+1} - a}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right],$$

$$(9) \quad f_X(p(t), a, \sigma, t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p_1 t^m + p_2 t^{m-1} + \dots + p_m t + p_{m+1} - a)^2}{2\sigma^2}},$$

где $t_i = t$, $\theta_1 = a$, $\theta_2 = \sigma$, $\theta_3 = t$.

Соответственно

$$(10) \quad \begin{aligned} L_n &= \sum_{k=1}^n \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(p_1 t_k^m + p_2 t_k^{m-1} + \dots + p_m t_k + p_{m+1} - a)^2}{2\sigma^2}} \right) = \\ &= n \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right) - \sum_{k=1}^n \ln \left(e^{-\frac{(p_1 t_k^m + p_2 t_k^{m-1} + \dots + p_m t_k + p_{m+1} - a)^2}{2\sigma^2}} \right). \end{aligned}$$

Так как распределение характеризуется тремя параметрами $\theta_1 = a$, $\theta_2 = \sigma$, $\theta_3 = t$, имеем:

$$U_1 = U(X, \theta_1) = \frac{dL}{d\theta_1}; \quad U_2 = U(X, \theta_2) = \frac{dL}{d\theta_2}; \quad U_3 = U(X, \theta_3) = \frac{dL}{d\theta_3}.$$

В поставленной задаче основной интерес представляет U_3 . Для n независимых испытаний значение U_3 имеет вид

$$(11) \quad \begin{aligned} U_{3n} &= \frac{dL}{dt} = \frac{d \left(n \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right) - \sum_k \frac{(p_1 t_k^m + p_2 t_k^{m-1} + \dots + p_m t_k + p_{m+1} - a)^2}{2\sigma^2} \right)}{dt} = \\ &= \sum_k \frac{(p_1 t_k^m + p_2 t_k^{m-1} + \dots + p_m t_k + p_{m+1} - a)(p_1 m t_k^{m-1} + p_2(m-1)t_k^{m-2} + \dots + p_m)}{\sigma^2}. \end{aligned}$$

Далее в соответствии с формулой (1) определяем $FIM(\theta_3)$ по параметру $\theta_3 = t$.

Энтропия по Шеннону (Мера количества информации по Шеннону). Мера количества информации, предложенная Шенноном, рассматривает не само сообщение, а информацию о нем. Мерой неопределенности системы принята энтропия H_X . Для значений временного ряда с функцией плотности распределения $f_X(p(t))$ используется следующая формула [12, с. 15]:

$$(12) \quad H_X = - \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(p(t)) \log f_X(p(t)) dt.$$

Мощность энтропии определяется по формуле

$$(13) \quad N_X = \frac{1}{2\pi e} e^{2H_X}.$$

В случае дискретной генеральной совокупности с распределением вероятностей $q_i = P(x_i)$:

$$(14) \quad H_X = -\sum(q_i \log(q_i)),$$

где q_i – вероятность i -го события, одного из n возможных событий ($i = 1, \dots, n$) ($\sum q_i = 1$).

Для равновероятных событий:

$$q_i = \frac{m}{N}, \quad i = 1, \dots, N,$$

где m – количество появлений события, N – общее количество состояний. Для событий временного ряда, имеющих разную вероятность появления:

$$q_i = \frac{x_i^H}{\sum X^H},$$

где x_i^H – элемент нормализованного ряда X^H [17, с. 7].

Количество информации по Фишеру I_f и Шеннону I_{sh} для каждого элемента временного ряда, заключенное в сообщении, измеряется уменьшением неопределенности в системе под действием этого сообщения, поэтому определяется как приращение энтропии, вычисляемое как разность между двумя последовательными значениями соответствующего временного ряда:

$$(15) \quad \text{по Фишеру} \quad I_f = FIM(t_{i+1}) - FIM(t_i),$$

$$(16) \quad \text{по Шеннону} \quad I_{sh} = H_X(t_{i+1}) - H_X(t_i),$$

где $FIM(t_i)$ и $FIM(t_{i+1})$, $H_X(t_i)$ и $H_X(t_{i+1})$ – соответственно значения энтропий Фишера и Шеннона до и после получения сообщения.

Скорость изменения энтропии используется для анализа неоднородности распределения информации временного ряда и определяется как отношение приращения энтропии к приращению времени:

$$(17) \quad \text{по Фишеру} \quad DI_f = \frac{FIM(t_{i+1}) - FIM(t_i)}{t_{i+1} - t_i},$$

$$(18) \quad \text{по Шеннону} \quad DI_{sh} = \frac{H_X(t_{i+1}) - H_X(t_i)}{t_{i+1} - t_i}.$$

3. Постановка задачи

Требуется разработать метод оценки временных границ стадийной эволюции месторождения на основе адаптированного для временных рядов алгоритма расчета информационных показателей.

Промысловые данные с математической точки зрения представляют собой временной ряд. В качестве входного потока данных в систему, к которой будут применены теоретико-информационные критерии, используются данные

об объеме закачки в пласт жидкости (газа) $Z(T) = \{z_1, \dots, z_n\}$, а в качестве выходных данных – данные об объеме добычи $X(T) = \{x_1, \dots, x_n\}$ (нефть (газ)), $Y(T) = \{y_1, \dots, y_n\}$ (вода), где $T = \{t_1, \dots, t_n\}$ – даты замера исходных данных.

По рассчитанной динамике количества информации Фишера и Шеннона построить и проанализировать план Шеннона – Фишера (графики $FIM(H)$ или $I_f (I_{sh})$) и выявить закономерности, показывающие единство изменения информационных показателей и показателей нефтедобычи на примере реальных данных.

4. Алгоритм решения задачи на примере реальных данных

Задача решается на примере промысловых данных нефтяного месторождения Фортис (Fortis) за 27 лет ($n = 324$). Динамика этих параметров представлена на рис. 1.

1. Стандартной процедурой проверки определяется распределение заданных временных рядов. Выявлено, что распределения подчиняются нормаль-

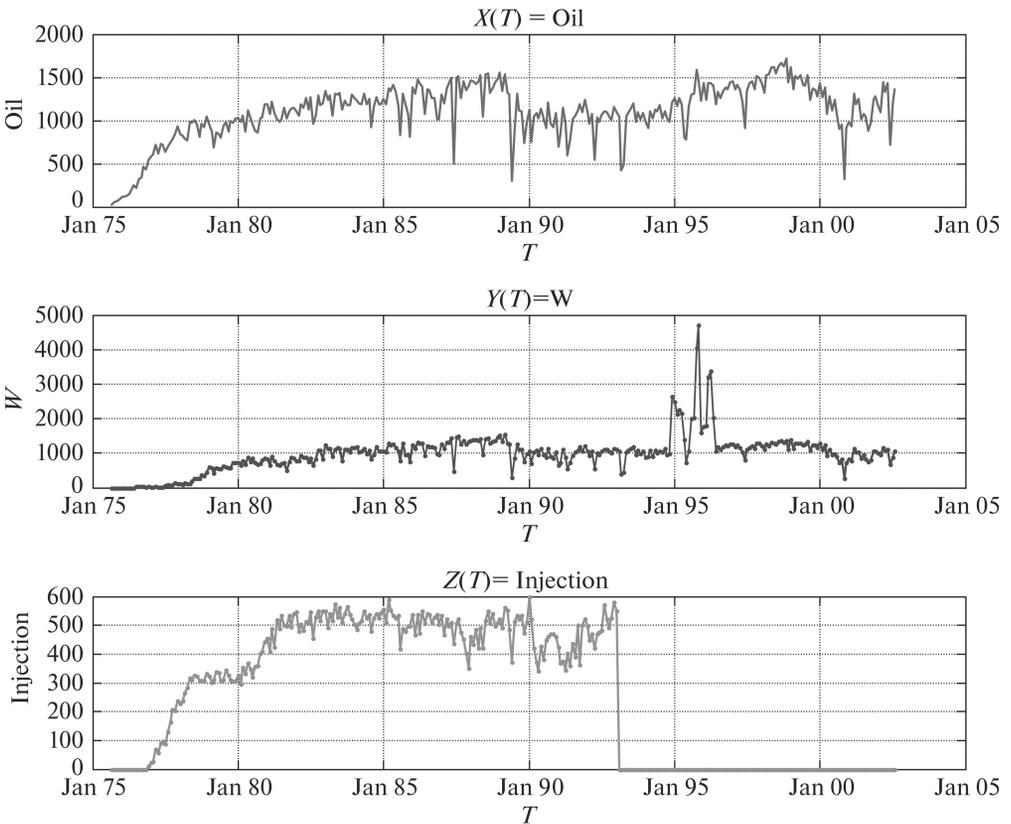


Рис. 1. Динамика дебита нефти $X(T)$, воды $Y(T)$ и объема закачиваемой воды $Z(T)$ на месторождении Фортис.

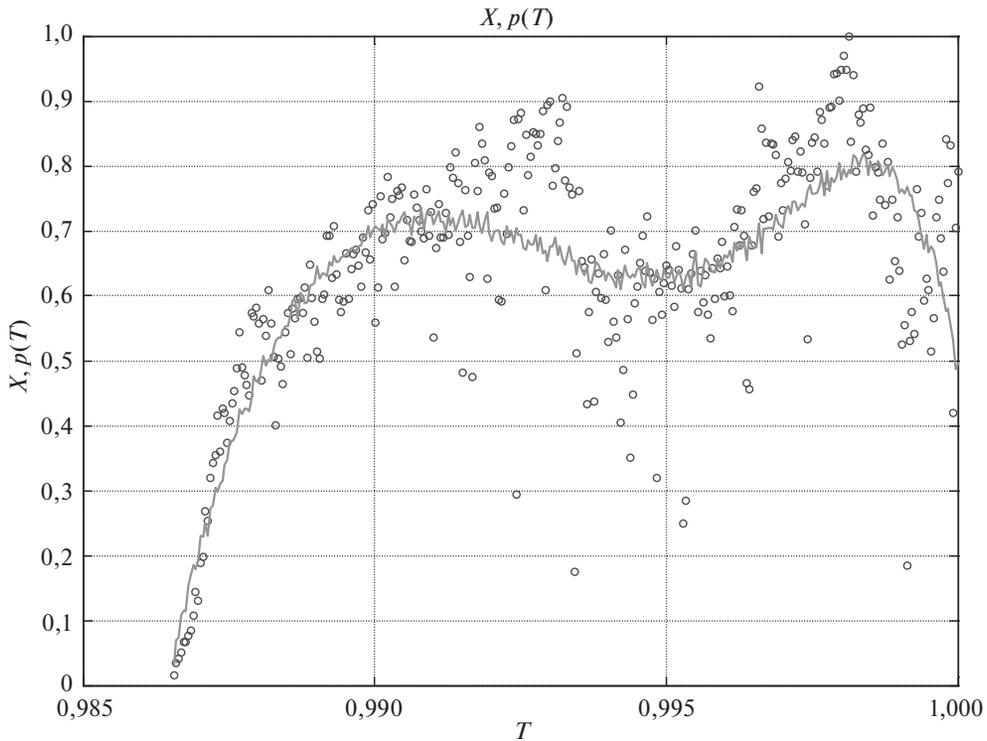


Рис. 2. Распределение ряда $X(T)$ (o) и его полиномиальной аппроксимации во времени (-).

ному закону Гаусса. Значения в представленных рядах являются дискретным представлением сигнала непрерывной природы и имеют разную вероятность появления, что существенно влияет на оценку энтропии. Поэтому для расчетов используются формулы с функцией распределения плотности вероятности. Для каждого из временных рядов $X(T)$, $Y(T)$, $Z(T)$ выполняются следующие расчеты:

а. После нормирования проводится полиномиальная аппроксимация распределения во времени (рис. 2). Рассчитываются математические ожидания и дисперсии: $a_X = 0,6425$, $\sigma_X = 0,0344$; $a_Y = 0,2080$, $\sigma_Y = 0,0136$; $a_Z = 0,4361$, $\sigma_Z = 0,1528$.

б. По формулам (8), (9) определяются $F_X(p(t))$, $F_Y(p(t))$, $F_Z(p(t))$, $f_X(p(t), a, \sigma, t)$, $f_Y(p(t), a, \sigma, t)$, $f_Z(p(t), a, \sigma, t)$. По формулам (10), (11) определяются L и U_t (рис. 3). По формулам (1), (12), (13) для каждого ряда определяется FIM , H и N (рис. 4).

в. По формулам (15), (16) определяются I_f и I_{sh} (рис. 5 и рис. 6), по формулам (17), (18) определяется динамика DI_f и DI_{sh} . Пример графика DI_f для ряда $Y(T)$ представлен на рис. 7.

2. Строится план Фишера – Шеннона. Пример графика для ряда $X(T)$ приведен на рис. 4. График $FIM(H)$ в полулогарифмических координатах для ряда $X(T)$, представлен на рис. 8.

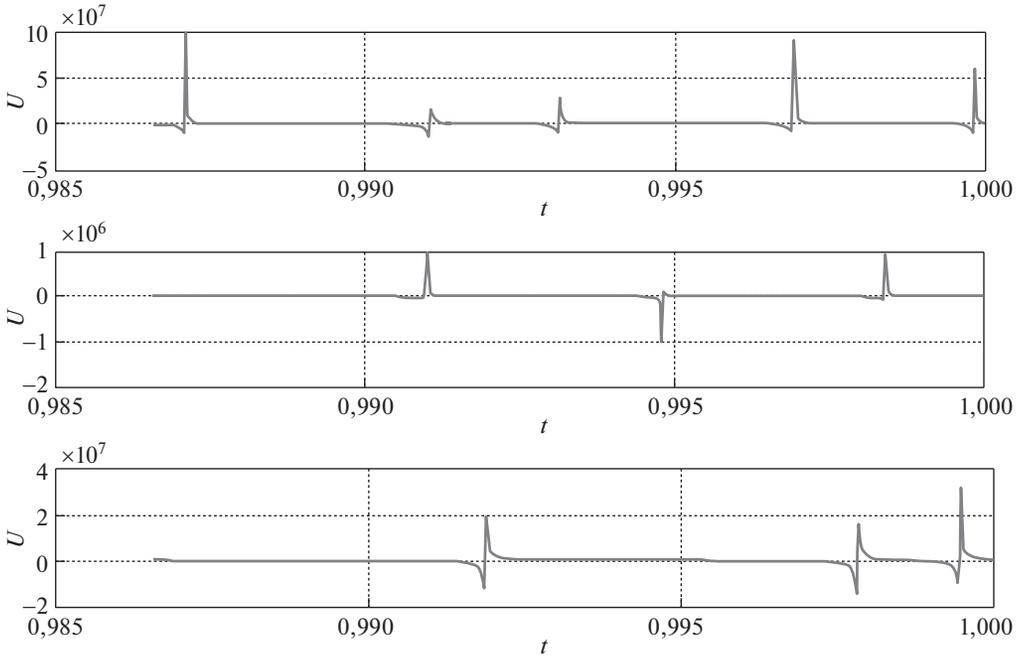


Рис. 3. Функция вклада выборки U_t для рядов $X(T)$, $Y(T)$, $Z(T)$.

3. На основе приведенных ниже принципов, справедливых для любого временного ряда, проводится интерпретация полученных результатов:

а. Если $H = 0$ и $FIM = 0$, то состояние пластовой системы месторождения не меняется. Чем меньше неопределенностей в рассматриваемой системе, тем меньше состояний она способна реализовать (H убывает). Чем больше неопределенности в системе, тем больше состояний она способна реализовать (H возрастает). Максимально возможное значение энтропия принимает в случае, когда все возможные состояния равновероятны.

б. FIM характеризует изменение дисперсии функции вклада выборки временного ряда, поэтому интерпретируется как мера неопределенности отклонения значений ряда от среднего на каждой новой стадии развития месторождения. Это хорошо видно из графика функции вклада выборки (рис. 3). На графике есть экстремумы функции разной амплитуды (скачки), последовательно следующие друг за другом. Их наличие позволяет распознать условия для возможного перехода пластовой системы к следующей стадии развития.

в. План Фишера – Шеннона показывает, как изменение внутреннего состояния системы, проявляющееся в количественном изменении показателей, характеризует условия перехода системы от одной стадии развития к другой. Данная зависимость имеет ступенчатый характер. Каждая ступень соответствует периоду действия стадии развития системы.

г. Наличие экстремумов в зависимости I_f (I_{sh}) интерпретируется как наступление предпереходного состояния, ведущего к смене стадии разработки

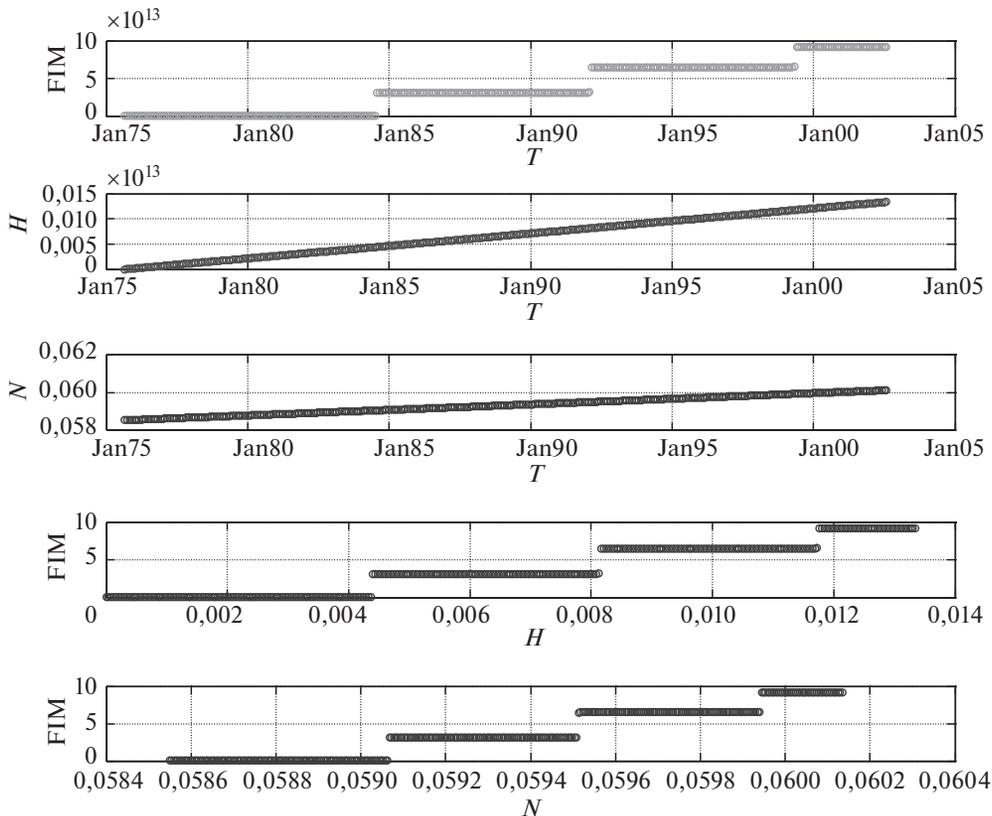


Рис. 4. Изменение энтропий Фишера и Шеннона во времени и план Фишера – Шеннона для $X(T)$.

месторождения. Причем начало этого периода совпадает по времени с изменением DI_f . Большое значение имеет знак, величина и характер изменения DI_f и DI_{sh} , по которым можно судить о темпах, фазе и направлении эволюции пластовой системы в текущий момент. Если значения, принимаемые этими функциями, увеличиваются с течением времени, то система стремится к своему наиболее вероятному состоянию с увеличением энтропии – в пласте происходят релаксационные процессы. Если же значения DI_f и DI_{sh} уменьшаются, то система входит в фазу самоорганизации, в ней возникает и развивается некая новая упорядоченность. Если же DI_f и DI_{sh} не изменяются во времени, то система находится в фазе застоя.

д. Более детальный анализ предпереходного периода стадии разработки позволяет использование полулогарифмических координат. При таком графическом представлении временного ряда выделяются малейшие изменения в режиме поступления информации и выявляются закономерности, которые не позволяет обнаружить декартова система координат. Так, динамика $I_f(T)$, представленная в полулогарифмических координатах, позволяет не только распознать переход к новой стадии непосредственно по данным разработки,

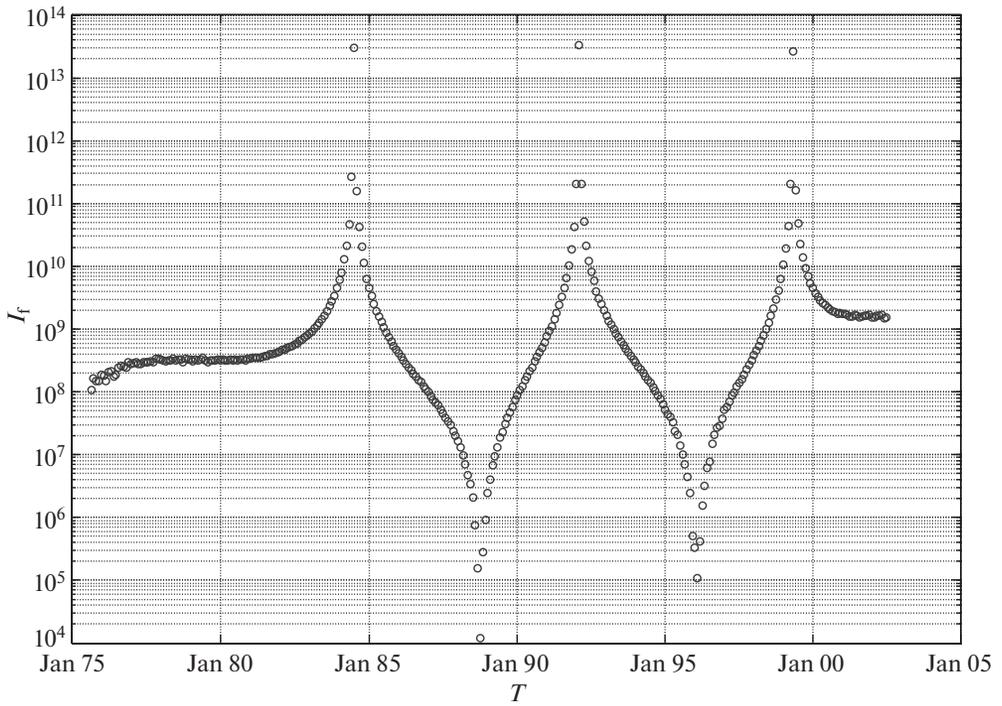


Рис. 5. Динамика изменения количества информации Фишера I_f .

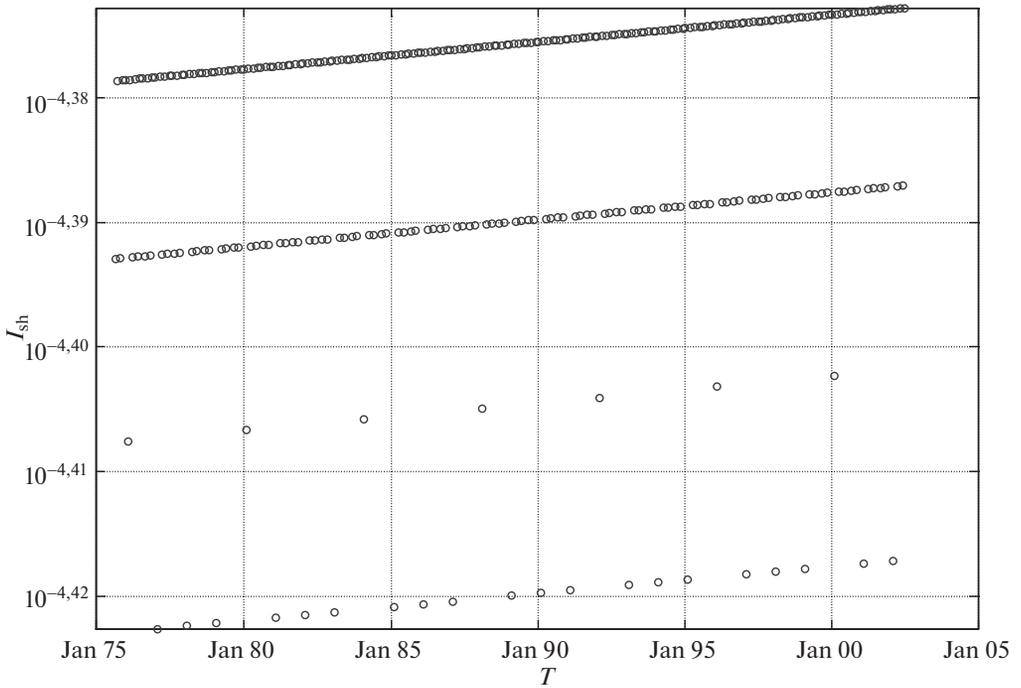


Рис. 6. Динамика изменения количества информации Шеннона I_{sh} .

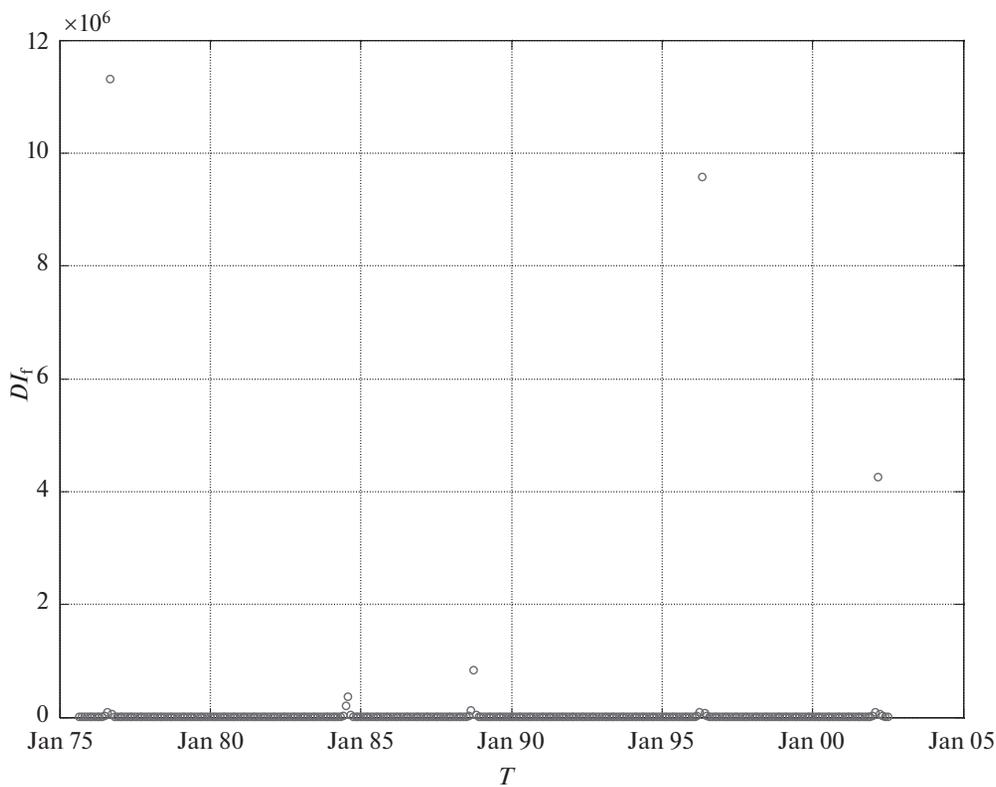


Рис. 7. Скорость поступления информации по Фишеру DI_f для ряда $Y(T)$.

но и выделить предпереходные периоды. Динамика $I_{sh}(T)$ в полулогарифмических координатах показывает, что все значения делятся на 4 группы, каждая из которых характеризует состояние системы и имеет свою закономерную частоту появления. Наиболее часто встречаются значения верхней амплитуды. Это позволяет прогнозировать динамику неопределенности системы и выявить, какие состояния она способна реализовать. График зависимости $I_f(T)$ от $I_{sh}(T)$ в полулогарифмических координатах показывает, насколько состояние системы соответствует той или иной стадии. Массовое скопление точек выделяет временные участки, когда состояние пластовой системы меняется в рамках одной стадии.

4. Проводится совместный сравнительный анализ результатов расчета и визуализации информационных характеристик по Фишеру и Шеннону для рядов $X(T)$, $Y(T)$, $Z(T)$ на выделенном временном участке. На примере реальных данных покажем порядок проведения информационного анализа разработки месторождения:

По результатам расчета, проведенного по накопленной истории разработки месторождения (рис. 1–8), выделяются временные границы пройденных стадий разработки месторождения. По изменению функции U_t выбирается временной период для более детального анализа состояния разработки ме-

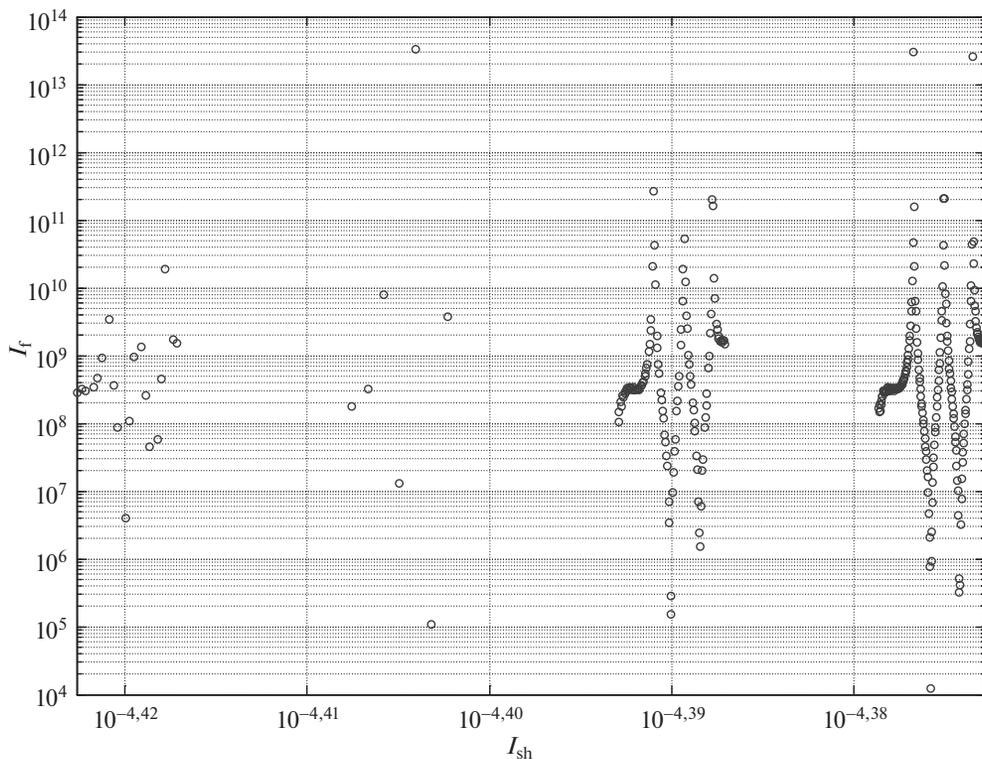


Рис. 8. Зависимость между I_f и I_{sh} в полулогарифмических координатах для ряда $X(T)$.

сторождения. Это позволяет уточнить сложившуюся в пласте ситуацию с целью принятия решений для воздействия на пласт, актуального именно для рассматриваемого периода времени и состояния пластовой системы. Весь временной период разделяется на локальные временные участки, для которых повторно проводятся расчеты вышеперечисленных информационных характеристик. В качестве примера рассмотрим временной промежуток, охватывающий период 1974–1986 гг.

Анализ показывает, что в этот период времени $U(X, t)$ ряда $X(T)$ имеет один скачок, который состоит из минимума и максимума, следующих друг за другом. Назовем тип такого скачка «минимум – максимум». Заранее обговорим, что в зависимости от полученного в расчете экстремума могут быть и другие типы скачков: «минимум», «максимум», «максимум – минимум». Время появления скачка соответствует окончанию периода неуклонного роста нефтедобычи и формированию условий для перехода к ее следующей стадии. Модуль амплитуды точки минимума превышает модуль амплитуды точки максимума почти в 2 раза. $U(Y, t)$ ряда $Y(T)$ имеет два скачка типа «минимум – максимум». Первый скачок соответствует времени появления воды в добываемой продукции, второй является предвестником увеличения объема добываемой воды. $U(Z, t)$ ряда $Z(T)$ имеет один скачок типа «мини-

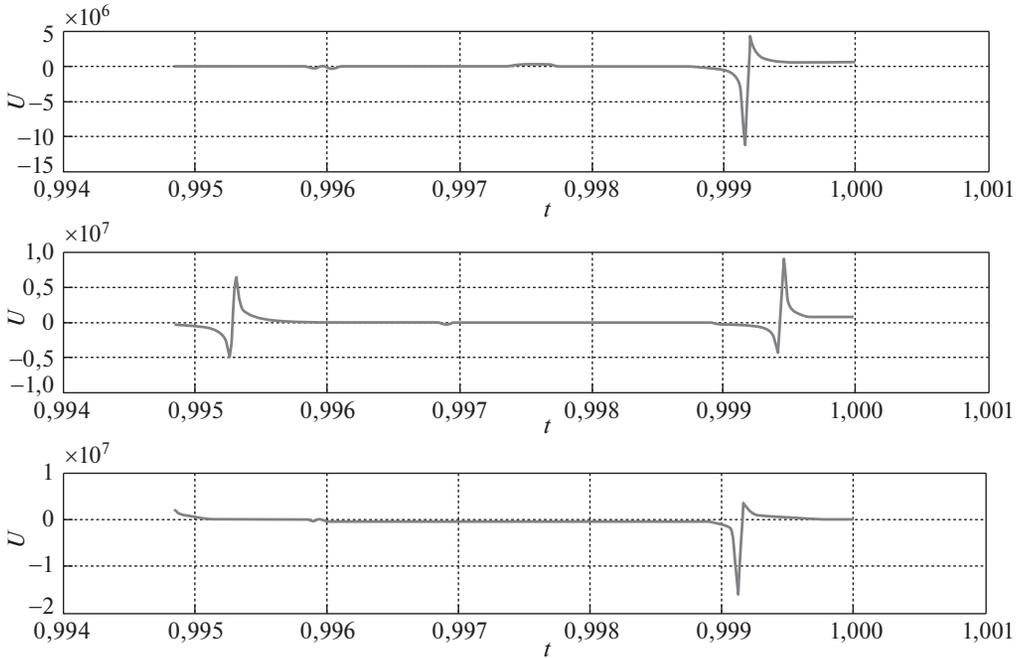


Рис. 9. Функция вклада выборки U_t по ряду $X(T)$, $Y(T)$, $Z(T)$.

мум», совпадающий с периодом стабилизации процесса закачки воды в пласт (рис. 9).

Анализ информационного плана Фишера – Шеннона (рис. 10) для каждого ряда показал, что переход к новой стадии нефтедобычи на месторождении начался намного раньше (первая декада 1984 г.), чем это показал расчет, основанный на истории разработки (конец 1984 – начало 1985 г.) (рис. 4). Изменение DI_f предсказывает начало переходного процесса уже в конце 1983 г. (рис. 11,а). Аналогичная ситуация складывается и с добычей воды. Первые признаки воды в продукции появляются во втором полугодии 1976 г., и только в 1977 г. этот процесс активизируется. DI_f по временному ряду $Y(T)$ увеличивается в конце 1974 г. В этот же период происходит смена режима закачки воды в пласт, о чем свидетельствуют разрыв на плане Фишера – Шеннона и изменение соответствующей скорости поступления информации. Динамика $I_f(T)$ в полулогарифмических координатах показывает, что первая стадия разработки месторождения по добыче нефти и воды состоит из трех частей, а предпереходный период ко второй стадии разработки начался в начале 1982 г. (рис. 12,а,б). Однако режим закачки воды в пласт, который должен меняться в зависимости от состояния пласта и его стадий разработки, состоит из двух частей, причем изменение режима закачки воды в пласт наблюдается только в начальной стадии разработки и далее не соответствует динамике информационных показателей, составленных по данным добычи воды и нефти (рис. 12,в). В результате на месторождении происходит постепенное уве-

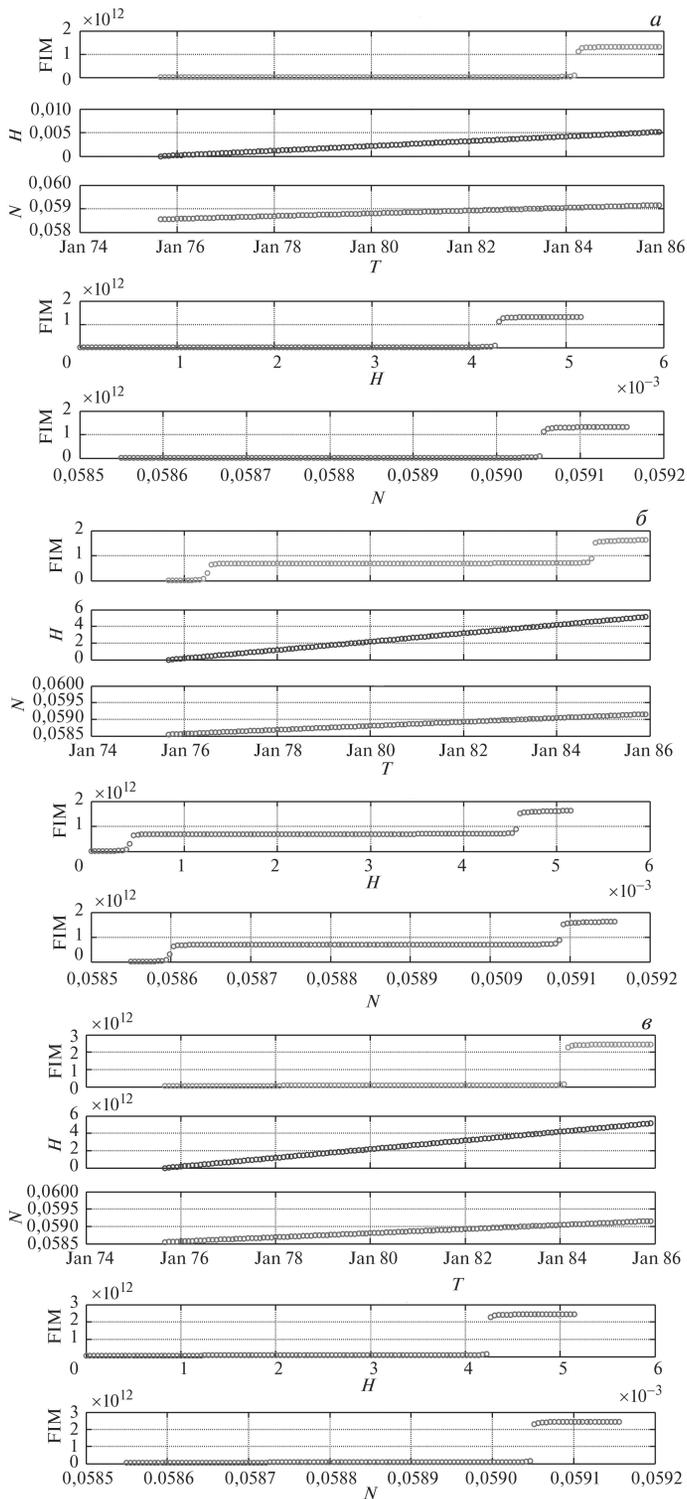


Рис. 10. План Фишера – Шеннона. *a* - для ряда $X(T)$; *б* - для ряда $Y(T)$; *в* - для ряда $Z(T)$.

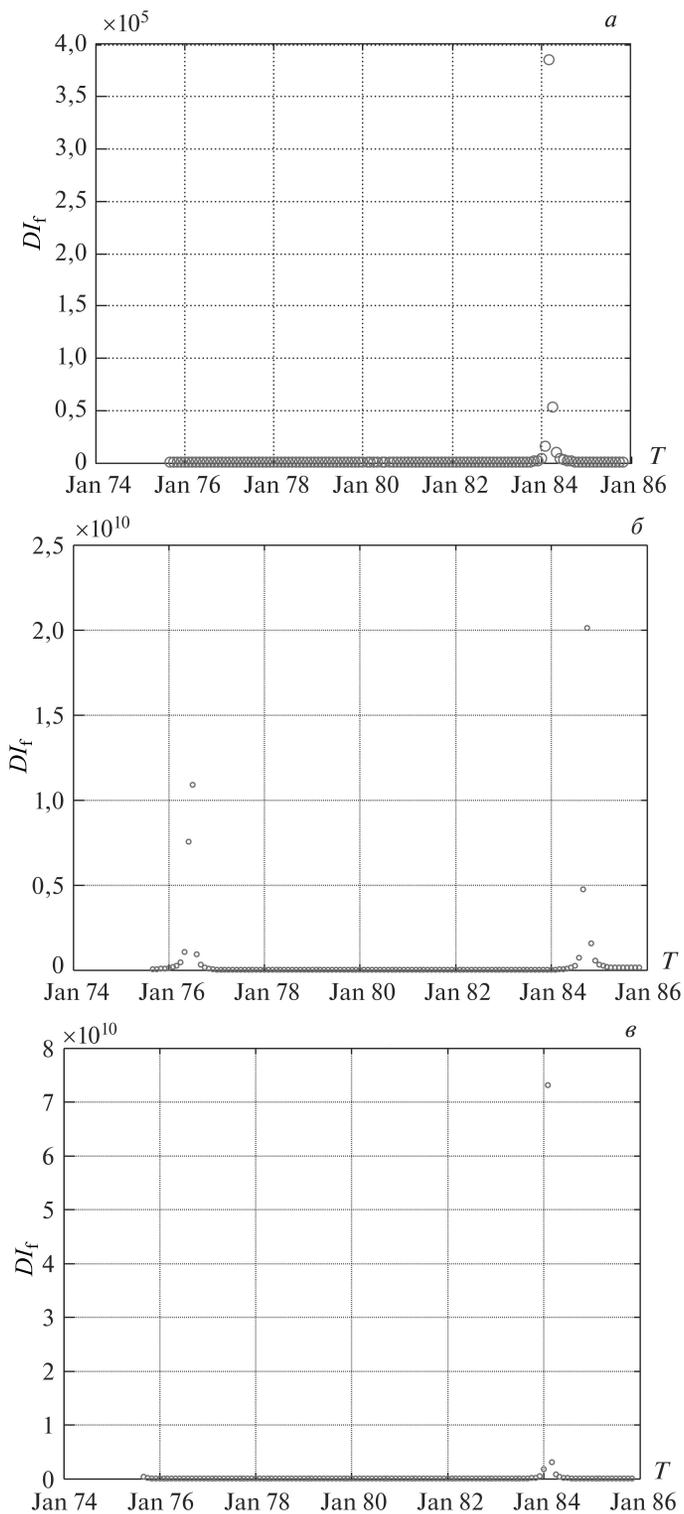


Рис. 11. Динамика DI_f . *a* – для ряда $X(T)$; *б* – для ряда $Y(T)$; *в* – для ряда $Z(T)$.

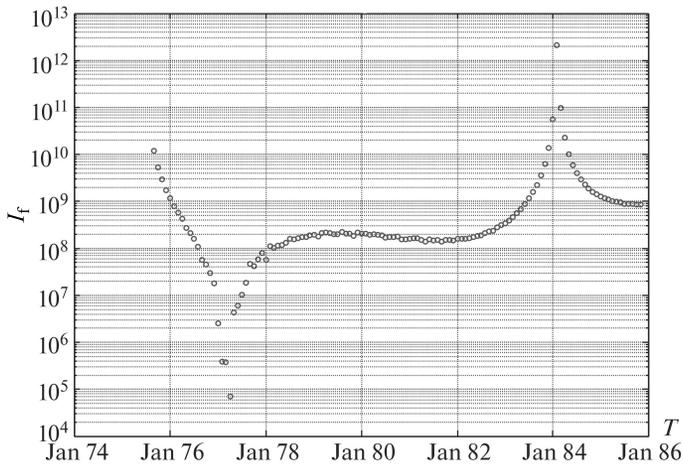
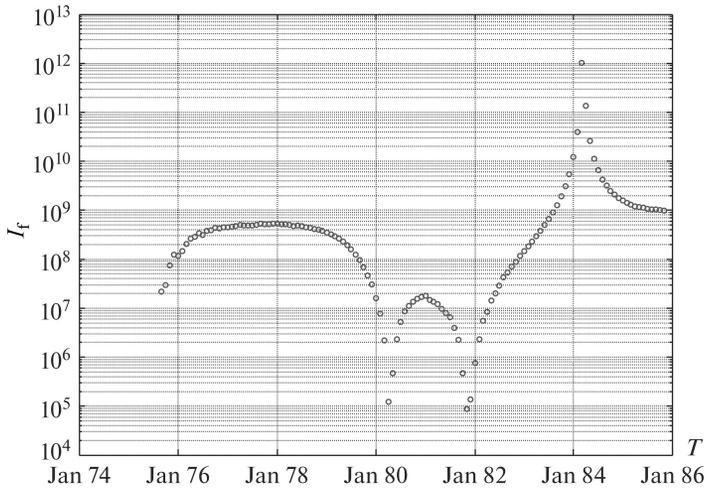
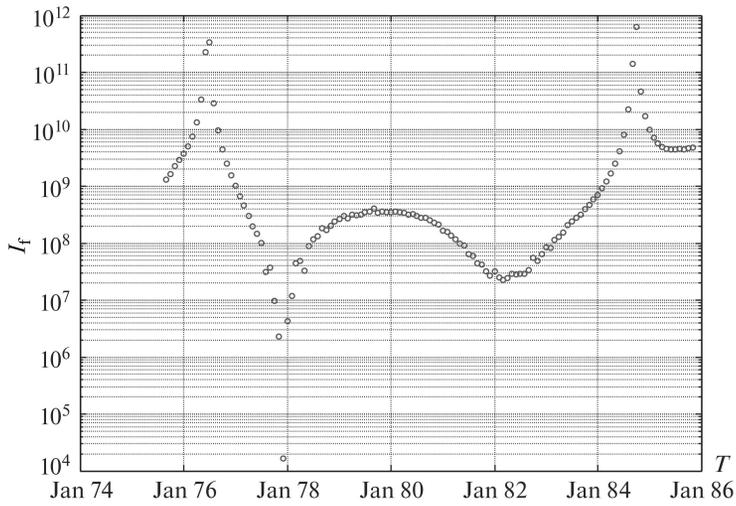


Рис. 12. Динамика $I_f(T)$ в полулогарифмических координатах. a – для ряда $X(T)$; b – для ряда $Y(T)$; c – для ряда $Z(T)$.

личение количества добываемой воды в продукции. Закономерно, что в 1987 г. закачка воды в пласт была уменьшена, но необходимый момент был упущен (рис. 1). Связано это с тем, что распознать переход месторождения на новую стадию непосредственно по данным разработки сложно, потому что кривая добычи нефти и воды в этот период мало отклоняется от ожидаемой и имеет небольшие значения дисперсии. Совместный сравнительный анализ I_f и I_{sh} для рядов $X(T)$, $Y(T)$, $Z(T)$ позволяет выбрать режим воздействия на пласт в соответствии с динамикой нефтедобычи и содержанием воды в добываемой продукции текущей стадии разработки.

5. Заключение

Предложен метод анализа состояния разработки месторождений, основанный на расчете энтропии Фишера и Шеннона и других информационных показателей для временных рядов, составленных по данным нормальной эксплуатации скважин.

Совместный анализ динамики информационных показателей, рассчитанных по данным временных рядов значений дебита нефти, воды и объема закачиваемой воды позволяет произвести раннее диагностирование временных границ стадийной эволюции как месторождения в целом, так его отдельных зон, оценить соответствие воздействия на пласт с состоянием разработки месторождения. При анализе не требуются сведения об изменении физико-механических и литологических свойств пород и насыщающих их флюидов.

Анализ разработки месторождения Фортис с использованием предложенного информационного метода показал, что эксплуатация месторождения без учета динамики информационных показателей приводит к снижению добычи нефти, увеличению обводненности продукции и нерациональному режиму воздействия на пласт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Роч П.* Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
2. *Закс Ш.* Теория статистических выводов. М.: Мир, 1975.
3. *Suleimanov B.A., Ismayilov F.S., Dyshin O.A., Huseynova N.I.* Fractal Analysis of Oil – Water Displacement Front // SOCAR Proc. 2011. No. 4. С. 36–43.
4. *Сулейманов Б.А., Дышин О.А.* Статистическое моделирование жизненного цикла разработки нефтяного месторождения // Нефтепромысловое дело. 2013. № 5. С. 10–18.
5. *Лоскутов А.Ю., Козлов А.А., Хазанов Ю.М.* Энтропия и прогноз временных рядов в теории динамических систем // Изв. вузов «ПНД». 2009. Т. 17. № 4. С. 98–113.
6. *Цветков О.В.* Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.
7. *Romera E., Dehesa J.S.* The Fisher–Shannon Information Plane, an Electron Correlation Tool // J. Chem. Phys. 2004. V. 120. No. 19. P. 8906–8912.
8. *Pierini J.O., Lovallo M., Alberto E.* Fisher-Shannon Analysis of the Time Variability of Remotely Sensed Sea Surface Temperature at the Brazil-Malvinas Confluence // Oceanologia. 2016. V. 58(3). P. 187–195.

9. *Lovallo M., Lopez C., Marti J., Abella R.* Using the Fisher-Shannon Method to Characterize Continuous Seismic Signal During Volcanic Eruptions: Application to 2011-2012 El Hierro (Canary Islands) eruption Terra Nova-June 2014.
10. *Vignat C., Bercher J.F.* Analysis of Signals in the Fisher-Shannon Information Plane // *Phys. Lett. A.* 2003. V. 312. P. 27–33.
11. *Lanorte A., Lasaponara R., Lovallo M.* Fisher-Shannon Information Plane Analysis of SPOT/VEGETATION Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Time Series to Characterize Vegetation Recovery after Fire Disturbance // *Int. J. Appl. Earth Observat. Geoinform.* 2014. V. 26(1). P. 441–446.
12. *Telescal L., Lovallo M.* Analysis of Time Dynamics in Wind Records by Means of Multifractal Detrended Fluctuation Analysis and Fisher-Shannon Information Plane // *J. Statist. Mechanics: Theory Experiment.* 2011. Article P07001.
13. *Фурсов В.А.* Лекции по теории информации. Самара: Изд-во СГАУ, 2006.
14. *Фарафонов В.Г., Фарафонов Вяч.Г., Устимов В.И., Бутенина Д.В.* Теория вероятностей и математическая статистика. Ч. 2. СПб.: ГУАП, 2009.
15. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968.
16. *Потемкин В.Г.* Система инженерных и научных расчетов Matlab 5.x. Т. 2. М.: «Диалог» МИФИ, 1999.
17. *Бекман И.Н.* Информатика. Курс лекций. Москва-Рим: 2009.
<http://profbeckman.narod.ru/InformLeks.files/Inf08.pdf>

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Г. Кушнером.

Поступила в редакцию 09.12.2017

После доработки 09.10.2018

Принята к публикации 08.11.2018