



ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕУЧТЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ НИЗКООМНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КАРОТАЖНЫХ ДИАГРАММ

И. А. Мельник, Н. А. Шенбергер, О. Ф. Ковалева

Показана методика выявления низкоомных коллекторов на базе переинтерпретации данных стандартных методов геофизических исследований скважин и корреляционного анализа материалов ГИС. Определено уравнение приращенного УЭС, связанного с влиянием железо- и калийсодержащих минералов. Представлены примеры обнаружения низкоомных коллекторов.

Ключевые слова: низкоомный коллектор, статистический анализ, каротаж, приращенное удельное электрическое сопротивление.

DETERMINATION OF UNRECORDED ELECTRICAL CONDUCTIVITY CHARACTERISTICS IN THE LOW-RESISTIVITY RESERVOIRS WHEN INTERPRETING WELL LOGS

I. A. Melnik, N. A. Shenberger, O. F. Kovaleva

A method how to identify low-resistivity reservoirs based on the reinterpretation of standard logging methods and correlation analysis of logging data is shown. An equation of incremented resistivity influenced by iron- and potassium-containing minerals is obtained. Examples of low-resistivity reservoirs detecting are given.

Keywords: low-resistivity reservoir, statistical analysis, logging, incremented electrical resistivity.

Как правило, в полимиктовых песчаниках юрских отложений Западной Сибири коллектор с удельным сопротивлением (УЭС) менее 5–6 Ом·м считается водонасыщенным. Но бывают случаи, когда, например в результате процессов наложенного эпигенеза, связанного с вертикальной миграцией флюидов, могут образоваться пиритизированный электропроводящий слой либо дегидрированный хлорит, являющийся поставщиком катионов железа и понижающий УЭС продуктивного пласта до 3–5 Ом·м [3, 4].

В свою очередь, на УЭС оказывает влияние глинистость песчаника вследствие образования двойного электрического слоя (ДЭС) в приповерхностной области пространства пор, заполненного флюидами [9, 10]. На сопротивление пласта также могут влиять гидрослюды, деградирующие вследствие вторичных геохимических процессов и обогащающие ионами калия и магния пластовую воду [2, 11]. В приразломных зонах осадочных пород, где они претерпевают геохимические преобразования за счет миграции флюидов из глубинных слоев, при достижении флюидами ловушек вторичные преобразования пород носят площадной характер.

В любом случае, определяя УЭС такого коллектора традиционным способом, мы всегда будем получать его пониженные значения даже в нефтегазонасыщенном интервале. Этот коллектор с признаками углеводородов (УВ), интерпретируемый традиционным способом как водонасыщенный, будет называться низкоомным.

Повышение информативности технологий интерпретации материалов ГИС становится определяющим направлением в инновационных ис-

следованиях. В рамках поставленной проблемы были решены следующие задачи.

1. В основу разработанного метода положена идея дифференциации интегрального теплового нейтронного поля в песчанике (т. е. показание стационарного зонда нейтрон-нейтронного каротажа скважин по тепловым нейтронам – ННК_т) в зависимости от содержаний железа и калия. Это позволяет определять их относительную концентрацию после калибровки используемого алгоритма по средним содержаниям химических элементов в песчаниках исследуемого района и стратиграфического горизонта [5, 6, 8].

2. Разработан программный продукт корреляционного анализа (ПКА) содержаний железа и калия, глинистости и общей пористости с УЭС, который позволяет выявлять интервалы с аномально пониженным сопротивлением в продуктивном пласте [7].

3. Определено полуэмпирическое уравнение приращенного удельного сопротивления, обусловленного железом и калием, где приращенное УЭС вычисляется как вклад данных элементов в понижение УЭС исследуемого интервала [8].

Краткое описание технологий статистического анализа

Предлагаемый метод статистического анализа материалов ГИС основан на электрических свойствах УВ и токопроводящих минералов твердой фазы породы. Сопоставляя результаты оцифрованных диаграмм ГИС вдоль разреза скважины, можно вычленять интервалы в коллекторах с определенными корреляционными связями.



Например, хорошо известно, что углеводороды – отличные изоляторы, и поэтому показания корреляционной зависимости кажущего электрического сопротивления (ρ) с открытой пористостью (w) должны быть положительными. В свою очередь, в исследуемых интервалах коллекторов-песчаников при сопоставлении содержаний железа и калия либо глинистости с УЭС их корреляционная зависимость может оказаться обратно пропорциональной. Это позволяет классифицировать данный интервал как низкоомный.

Система (w, c) представляет собой двумерную случайную величину с определенной степенью статистической связи и корреляции, выражаемой коэффициентом (k). Поэтому, вычислив коэффициент корреляции открытой пористости и УЭС (при условии $k_{(w,p)} > 0,6$) путем скользящей линии точек вдоль оси скважины, можно сопоставить эти значения по глубине и вычислить вероятность определения нефтенасыщенности интервала по следующей зависимости:

$$\rho = \sum_{j=1}^J \left\{ \left[\sum_{i=1}^n k_i^2 \right] / n \right\} / J,$$

где i – индекс, отражающий количество задающих точек скользящей линии; j – количество шагов.

В данном случае вероятность ρ – это статистический параметр, показывающий среднее значение аппроксимации по двум степеням свободы для положительной зависимости пористости и УЭС. Чем больше математическая величина вероятности (ρ), тем больше вероятность, что исследуемый интервал насыщен УВ. Назовем этот параметр вероятностью насыщения УВ.

Рассмотрим нефтенасыщенный низкоомный коллектор в трехкомпонентной модели с различными типами проводимости, где электрическая проводимость пласта в основном задается остаточным раствором воды (объемной проводимостью электролита в породе $1/\rho_3$) и электрическим слоем минеральной компоненты с катионной проводимостью. Матрица и углеводороды служат изолятором. При параллельном подключении получаем

$$1/\rho = (1-\varphi)/\rho_c + \varphi/\rho_M,$$

где интересующее нас неучтенное (обусловленное Fe и K) электрическое сопротивление будет представлять величину $\rho_{сн}$ с различной долей заполненного порового пространства ($1 - \phi$). В случае традиционной интерпретации $\phi = 1$ имеем $1/\rho = 1/\rho_3$.

Используя только материалы ГИС, невозможно определить долю вторично преобразованного минерала и, соответственно, искомую долю порового пространства. К тому же электропроводящие железо- и калийсодержащие минералы находятся в смешанном электрическом соединении в объеме глинистого слоя (сам слой с поровой водой также в смешанном состоянии). Поэтому электрическое соединение данных минералов будет сме-

шанным (как параллельным, так и последовательным). Таким образом, строим петрофизическую модель электропроводности коллектора с приращенным УЭС:

$$\rho = \rho_M + \Delta\rho_i(C_i). \quad (1)$$

Введем следующее ограничение: пусть низкоомность углеводородного пласта определяется ионами калия и железа, полученными в результате преобразованной доли глинистой компоненты. Обусловленное УЭС можно записать как зависимость от концентрации катионов (эквивалентная концентрация раствора) преобразованного слоя и подвижности i -х зарядов:

$$\rho_{сн}^i = \rho_i \sim 1/C_{ki} u_i.$$

Концентрация зарядов (катионов) в первую очередь зависит от содержания данного элемента в породе C_j , затем от степени диссоциации ионов s , водонасыщенности K_B и степени извилистости g породы (для полимиктовых песчаников $g = 2$). Диффузия зарядов во внешнем силовом поле подчиняется соотношению Эйнштейна. Подвижность u эквивалентна выражению $u \approx \lambda/mv$, где λ – средняя длина свободного пробега заряда, v – скорость заряда. На подвижность зарядов u (при неизменной напряженности поля) влияют эффективная масса заряда m_i (различна для железа и калия), температура пласта T , открытая пористость w и степень извилистости. На основании сказанного запишем полуэмпирические выражения для концентрации и подвижности зарядов

$$C_{ki} \sim k_2^g C_i^\alpha,$$

$$u_i \sim w^g \exp(-j/T) / m_i.$$

В первом выражении степенной показатель $\alpha \approx f(s)$ эквивалентен функции степени диссоциации ионов калия или железа, во втором – коэффициент j прямо пропорционален энергии активации заряда и зависит от напряженности электрического поля и литологии горной породы (для полимиктовых песчаников $j \approx 75$ °C) [1].

Введем коэффициент пропорциональности Q и перепишем уравнение зависимости удельного сопротивления изучаемого коллектора для i -го элемента от его концентрации:

$$\rho_i = Q m_i (w k_2)^{-g} \exp(j/T) C_i^{-\alpha}. \quad (2)$$

В свою очередь, среднее УЭС породы исследуемого интервала с минерализованным раствором (при отсутствии влияния железа и калия на электрическую проводимость) зависит от минерализации пласта M , т. е.

$$\langle \rho_M \rangle = q m_M \langle w k_2 \rangle^{-g} \exp(j/T) M^{-h}, \quad (3)$$

где эффективную массу ионов можно приравнять к средней атомной массе солей NaCl и KCl ($m_3 \approx 3$ а. е.), а степенной показатель $h = \text{const}$ (для песчаников $h = 0,79$) [1].



В уравнении (3) введен коэффициент пропорциональности q , отражающий характеристики зонда (d), который, в свою очередь, оказался зависим еще и от глубины (q с глубиной увеличивается). В результате статистического анализа определен степенной коэффициент ($r = 3$) зависимости q от абсолютной глубины H , т. е. $q = dH^r$, где $d = \text{const}$. Эмпирическим способом выявлена зависимость коэффициента извилистости от глубины (m)

$$g = 2 - 2 \cdot 10^{-2} H^{0.5}.$$

В этом случае при вычислении d применение полученных выражений позволило значительно снизить разброс коэффициента пропорциональности d ($\sigma_d/d = 80\%$) и исключить влияние корреляции $d(H)$. Среднее значение $\langle d \rangle = 2,4 \cdot 10^{-13}$ Ом·г/(л·а. е.).

Согласно предлагаемому методу корреляционного анализа мы исследуем обратные корреляционные зависимости $\rho_i(C_i)$ изучаемого пласта. Следовательно, для данного коллектора в уравнении (2) все параметры постоянны (усреднены), кроме относительной концентрации элемента и степенного показателя $C_i^{-\alpha}$. В таком случае мы можем сопоставить коэффициент пропорциональности в (2) с произведением $Q = qM^{-h}$ и получить равенство, соответствующее эмпирической зависимости

$$\rho_i = (m_i/m_M) \langle \rho_M \rangle C_i^{-\alpha}. \quad (4)$$

При отсутствии диссоциированных зарядов калия и железа коэффициент $\alpha = 0$, и в этом случае $C_i^{-\alpha} = 1$.

Таким образом, в силу аддитивной природы электрического сопротивления и смешанного соединения электропроводящих минералов приращенное удельное сопротивление пласта определяется как сумма приращенных сопротивлений среды для зарядов калия и железа при условии совпадения их пространственных интервалов:

$$\begin{aligned} \Delta\rho(C_\Sigma) &= \Delta\rho_{Fe} + \Delta\rho_K = \\ &= \langle \rho_M \rangle \left\{ (m_{Fe}/m_M)(1 - C_{Fe}^{-\alpha}) + (m_K/m_M)(1 - C_K^{-\alpha}) \right\}. \end{aligned}$$

Построив степенную корреляционную зависимость изучаемого интервала ($\rho_i = bC_i^{-\alpha}$), мы определяем степенной коэффициент α . Логично предположить, что его можно вычислить следующим образом:

$$\alpha = af(s).$$

В отрицательно-степенной выборочной зависимости УЭС от содержания элемента (i) параметром аппроксимации $R_{i,p}^2$ определяется статистическое соответствие выборочных данных уравнению тренда (4). Чем значительнее влияние данного элемента на определяемое УЭС, тем больше аппроксимация тренда, т.е. R^2 может служить показателем степени диссоциации ($f(s) \approx R^2$). Функцию степени диссоциации ионов определим следующим образом:

$$f(s) = \begin{cases} R^2, & \text{если } k_{i-p} < -0,6, \\ 0, & \text{если } k_{i-p} \geq -0,6. \end{cases}$$

Показатель $\alpha = af(s) = aR^2$ отражает степень диссоциации ионов исследуемого интервала при одновременном учете статистической погрешности.

Примеры определения низкоомных коллекторов

На территории Томской области было изучено 170 скважин с целью выявления низкоомных коллекторов, пропущенных при традиционной интерпретации материалов ГИС. Характерно, что более 70 % обнаруженных интервалов с признаками УВ находятся в меловом комплексе отложений. На примере нескольких десятков скважин юрско-меловых объектов покажем результаты сопоставления теоретических исследований с данными лабораторного и геофизического изучения водонефтенасыщенных песчаных коллекторов.

С использованием дел скважин были отображены данные УЭС определенных интервалов ($\rho_{экс}$). В свою очередь, с применением методов интерпретации ГИС по стандартным зависимостям изучаемого региона и стратиграфического горизонта вычислялись такие параметры, как минерализация, температура, водонасыщенность и открытая пористость. Далее полученные значения подставлялись в уравнение (3) и по формуле $\rho_{теор} = 2,5 + \langle \rho_э \rangle$ определялись теоретические величины УЭС. Результаты сопоставления показали их хорошую сходимость (рис. 1).

В нашем случае представляет интерес исследование степени зависимости обратной корреляции УЭС и открытой пористости (вычисляется $R_{w,p}^2$, при условии $k_{w,p} < -0,6$) водонасыщенных объектов от его минерализации (M). Если такая связь существует, она подтверждает то, что параметр аппроксимации данной корреляционной связи есть функция электрических характеристик минерализованной воды (электрического тока, напряжения). Причем связь должна быть нелинейная, так как при минерализации пласта менее 30 г/л на электропроводность песчаника оказывает сильное воздействие двойной электрический слой глин. Это связано с диффузионным насыщением ионами приповерхностной зоны в зависимости от повышения минерализации с соответствующим увеличением силы тока глинистой компоненты. При сильной минерализации (более 30 г/л) происходит ионное насыщение проводящего слоя с дальнейшим уменьшением проводимости ДЭС глин. И в этом случае основной компонентой проводимости будет объемная, т. е. поровая, проводимость тока, следовательно, с увеличением минерализации параметр аппроксимации УЭС и пористости увеличится.

На рис. 2 высказанные утверждения проиллюстрированы на примере полученных зависимостей. Видно, что с увеличением минерализации до 30 г/л параметр аппроксимации для пористости с УЭС ($R_{w,p}^2$) уменьшается, а для ДЭС ($R_{К_{тп},p}^2$)

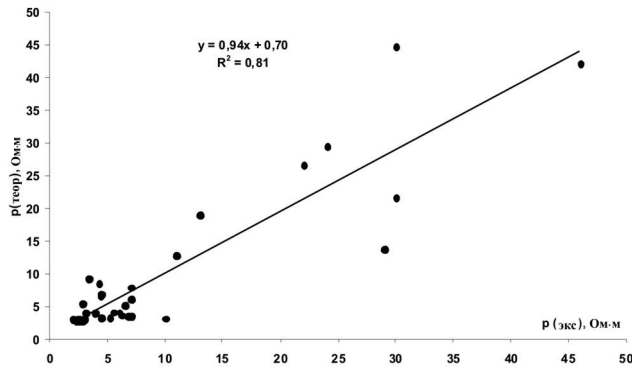


Рис. 1. Сопоставление средних УЭС исследуемых интервалов теоретических значений ($\rho_{\text{теор}}$) и величин вычисленных стандартными методами ГИС ($\rho_{\text{экс}}$)

пропорционально увеличивается. В другом случае, при минерализации от 30 до до 60 г/л $R_{w,p}^2$ пропорционально увеличивается, а влияние ДЭС уменьшается (нет зависимости от минерализации). Статистические исследования показали, что при минерализации от 20 до примерно 35–40 г/л $R_{K_{гп},p}^2 > R_{w,p}^2$, т. е. для данного интервала минерализации электрическая компонента проводимости слоя глин значительнее таковой поровой проводимости.

Для нефтегазонасыщенных интервалов были вычислены приращенные УЭС относительно вычисленных традиционным способом $\Delta\rho/\rho_3$. Рассмотрены корреляционные зависимости π с $\Delta\rho/\rho_3$.

Анализ показал возможность объединения интервалов в две группы по положительным и отрицательным зависимостям $\rho(\Delta\rho/\rho_3)$. Оказалось, что группирование происходит не столько по пластам, сколько по скважинам. Например, положи-

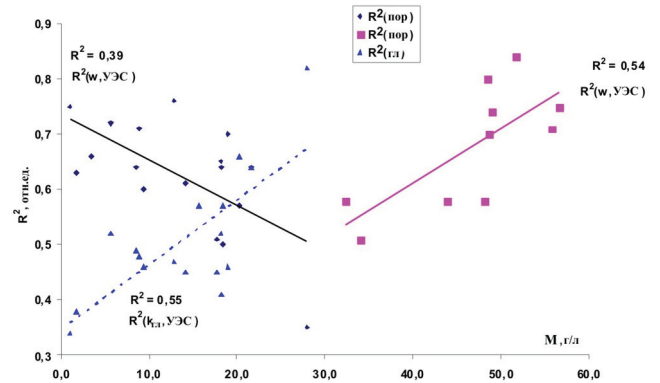


Рис. 2. Зависимости параметров аппроксимации открытой пористости $R^2(w, \rho)$ и глинистости $R^2(K_{гп}, \rho)$ с УЭС от минерализации (M) водонасыщенных пластов

и нефтегазонасыщенный интервалы. При граничном значении $\rho_{гп} = 5,6$ Ом·м эффективность составляет 83 %. Кривая сопротивлений водонасыщенной породы пересекла ось абсцисс в точке 11 Ом·м: если относительное приращение УЭС превышает зону неоднозначности $\Delta\rho/\rho_3 > 100$ %, то можно с полной уверенностью (с достоверностью более 95 %) говорить о присутствии УВ в исследуемом интервале.

В качестве примера приведем результаты вычислений относительного приращенного УЭС ($\Delta\rho/\rho_3 \cdot 100$ %), вероятности насыщения УВ в некоторых песчаных интервалах на участках слабоизученной территории Томской области (см. таблицу).

Результаты исследований и вычисления по Южно-Пыжинской скважине ($\rho = \rho_3 + \Delta\rho = 6,5 + 3,2 = 9,7$ Ом·м $> \rho_{гп} = 7,0$ Ом·м) с вероятностью насыщения УВ $p = 53$ % $> p_{гп} = 42$ %) подтверждаются результатами испытаний, но в остальных скважинах изученные интервалы не испытыва-

Результаты переинтерпретации материалов ГИС

Скважина	Интервал, м	Индекс пласта	ρ	Δ	$P, \%$	Результаты испытания
Южно-Пыжинская 1	2962,7–2968,8	Ю ₁₄	6,5/7,0	49,0	53,0	12 % нефти
Вертолетная 362	1596–1613,6	ПК _{16–17}	2,6/6,0	129,0	49,0	Не испытан
Вертолетная 360	2719,8–2725,4	Ю ₅	5,2/6,0	161,0	52,0	«
Посковская 1	1750,8–1762,4	А _{9–10}	6,8/8,0	58,0	57,0	«

тельная корреляция $\rho(\Delta\rho/\rho_3)$ (18 интервалов) прослеживается для скважин Посковской 1, Чачанских 1, 2, Вертолетной 362, Мартовской ОГТ 430; отрицательная корреляция (17 интервалов) – для Ажарминской 450, Южно-Пыжинской 1, Вертолетной 360, Толпаровской 2. Видно, что скважины одной площади могут находиться в различных группах. Очевидно, вторичные процессы, влияющие на УЭС пластов и, соответственно, на результат знака корреляции, в большей степени зависят от вертикальной миграции флюидов и заметно сказываются на электрических характеристиках пород всего разреза.

Было определено граничное значение УЭС пласта Ю₁, разделяющего отложения на водо-

лись, так как определенное традиционными методами интерпретации ГИС УЭС пласта заметно ниже его граничного значения. Но, к примеру, для пласта Ю₅ Вертолетной скв. 360 приращенное сопротивление $\rho = 13,6$ Ом·м, что на 126 % больше граничного. В этом случае исследуемый интервал с точки зрения инновационного метода интерпретации будет считаться продуктивным.

Выводы

Таким образом, на основании разработанной технологии по материалам комплекса ГИС появляется возможность выявлять пропущенные при стандартной интерпретации низкоомные нефтегазонасыщенные интервалы.



Метод корреляционного анализа и полученные результаты его обработки позволяют связать статистические параметры аппроксимации (степени влияния на УЭС) и $R_{k,p}^2$ (при $k < -0,6$) со степенью диссоциации ионов глинистых железосодержащих минералов (либо с плотностью тока электронов в пиритах, лимонитах и т. д.) и с толщиной ДЭС.

Анализ показал, что при минерализации водонасыщенного объекта от 20 до примерно 40 г/л влияние ДЭС на УЭС пласта более значимо, чем открытой пористости. Поэтому без учета данной компоненты при разделении на продуктивный и водонасыщенный интервал значительно увеличивается зона неоднозначности.

Результаты статистического анализа УЭС в зависимости от содержания железа, калия, глинистости и ФЕС породы указывают на необходимость учета поверхностной электрической проводимости связанной как с ДЭС, так и с электропроводящими минералами. Неучтенное влияние на проводимость породы электропроводящих минералов, образованных в результате процессов наложенного эпигенеза, априори повышает граничную величину УЭС.

Учет приращенного УЭС исследуемого интервала позволяет решить проблему низкоомных коллекторов. Если $\rho = \rho_m + \Delta\rho_i(C_i)$ больше $\rho_{гр}$ и вероятность насыщения УВ $p > p_{гр}$, то с достоверностью более 50 % можно утверждать, что в исследуемом интервале имеются УВ. В свою очередь, превышение зон неоднозначности для определяемых ρ и p с достоверностью более 95 % доказывает продуктивность низкоомной толщи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волков, Э. Я.** Обоснование закономерностей геофизических параметров ГИС для интерпретации по методике распознавания образов [Текст] / Э. Я. Волков // Методы автоматизированной оценки пористости и водонасыщенности в терригенных коллекторах. – Тюмень : ЗапСибНИГНИ, 1987. – С. 51–62.
2. **Грим, Р. Э.** Минералогия и практическое использование глин. – М. : Мир, 1967. – 510 с.
3. **Ежова, А. В.** Методы определения нефтенасыщенности низкоомных коллекторов на месторождениях Западно-Сибирской провинции [Текст] / А. В. Ежова // Геологическое строение и нефтегазоносность отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты. – Новосибирск : СНИИГиМС, 2006. – С. 153–157.
4. **Зарипов, О. Г.** Влияние литологии пород-коллекторов на удельное электрическое сопротивление пластов [Текст] / О. Г. Зарипов, В. П. Соич // Геология и геолого-разведочные работы. – 2001. – № 9. – С. 18–21.
5. **Мельник, И. А.** Технология повышения информативности данных ГИС с целью выделения зон наложенного эпигенеза в песчаниках-коллекторах [Текст] / И. А. Мельник // Вестн. ТГУ. – 2007. – № 12. – С. 223–227.
6. **Мельник, И. А.** Расчет концентраций железа и калия в коллекторах-песчаниках на базе стандартных методов ГИС : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [Текст] / И. А. Мельник. – № 2008613040, 25 июня 2008 г.
7. **Мельник, И. А.** Повышение информативности нейтронного каротажа с целью выделения зон наложенного эпигенеза [Текст] / И. А. Мельник. – Деп. в ГИАБ, МГУ. – 2008. – № 1. – 11 с.
8. **Мельник, И. А.** Технология оценки геофизической информации по влиянию содержания железа и калия на электросопротивление низкоомных коллекторов : Автореф. дис. ... к. г.-м. н. [Текст] / И. А. Мельник. – Томск, 2008. – 26 с.
9. **Ошлакова, А. С.** Анализ геофизических и эксплуатационных данных низкоомных коллекторов [Текст] / А. С. Ошлакова // Изв. ТПУ. – 2011. – Т. 315, № 1. – С. 68–72.
10. **Пархоменко, Э. И.** Электрические свойства горных пород [Текст] / Э. И. Пархоменко. – М. : Наука, 1965. – 154 с.
11. **Пирсон, С. Дж.** Учение о нефтяном пласте [Текст] / С. Дж. Пирсон. – М. : ГНТИНиГТЛ, 1961. – 570 с.

© И. А. Мельник, Н. А. Шенбергер,
О. Ф. Ковалева, 2012