

К.А. Машкин, О.Е. Рыскаль, А.Г. Коротченко, Р.Г. Гайнетдинов

ОАО НПП «ВНИИГИС», ООО НПП «ИНГЕО-Сервис»

А.И. Губина, Е.С. Зрячих

Пермский ГНИУ, ООО «ПИТЦ «Геофизика»

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТУРЫ ЦСП-ЗИНГКС-76
В БОКОВЫХ СТВОЛАХ СКВАЖИН
НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПЕРМСКОГО ПРИКАМЬЯ**

Рассмотрены возможности комплекса ядерно-геофизических методов, реализуемого аппаратурой ЦСП-ЗИНГКС-76. На примерах оценена эффективность определения текущей нефтенасыщенности терригенных и карбонатных коллекторов в сопоставлении с результатами испытаний скважин. Приведены рекомендации по использованию аппаратного комплекса в обсаженных скважинах малого диаметра.

Ключевые слова: обсаженные скважины, Пермское Прикамье, аппаратные разработки, боковые стволы, ядерно-геофизические методы, оценка характера насыщения коллекторов, определение текущей нефтенасыщенности.

Нефтегазовые месторождения Пермского Прикамья при высокой перспективности нефтегазоносности имеют сложное геологическое строение продуктивных отложений и преимущественно находятся на поздней стадии разработки. Актуальной задачей в этих условиях является оптимизация рентабельной добычи нефти на уже разрабатываемых месторождениях. Наиболее эффективной современной технологией, позволяющей повысить добычу нефти из пластов и коэффициент ее извлечения, является бурение боковых стволов из вырезанного участка обсадной колонны. Путем бурения боковых стволов в разработку вовлекаются ранее не задействованные участки пласта, а также трудноизвлекаемые запасы нефти, добыча которых ранее не представлялась возможной. Это направление в последние годы получило широкое развитие на месторождениях Пермского Прикамья.

С учетом существующих геолого-технических условий боковых стволов важной проблемой в настоящее время является повышение геологической информативности методов ядерной геофизики для решения задач выявления пропущенных залежей, оценки текущего состояния выработки коллекторов, положений контуров нефтеносности и уточ-

нения положений невыработанных участков залежей. Важной особенностью работ является то, что боковые стволы, как правило, имеют малый внутренний диаметр обсадной колонны (от 89 мм), поэтому технические характеристики геофизической аппаратуры должны соответствовать конструктивным особенностям скважин.

Основным методом для оценки текущей нефтегазонасыщенности пластов-коллекторов в обсаженных скважинах является углерод-кислородный (С/О) каротаж, что за последнее десятилетие доказано многочисленными геофизическими исследованиями эксплуатационных скважин на месторождениях России, Дальнего и Ближнего Зарубежья. Однако для применения этого метода существовало ограничение, связанное с диаметром прибора (100 мм), позволяющее проводить исследования только в стволах скважин с большим диаметром обсадной колонны (124 мм).

Невозможность изготовления аппаратуры С/О-каротажа малого диаметра до недавних пор была связана с отсутствием высокочастотных импульсных генераторов нейтронов малого диаметра (менее 70 мм), обеспечивающих проведение спектрометрического импульсного нейтронного гамма-каротажа (ИНГКС). Их производство началось в России только в последние годы - генераторы нейтронов ИНГ-063 диаметром 60 мм были разработаны для промышленного применения в ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л.Духова (г. Москва). Специалисты ОАО НПП «ВНИИГИС» малого предприятия ООО НПП «ИНГЕО-Сервис» после приобретения генератора нейтронов ИНГ-063 также приступили к разработке комплексной аппаратуры ЦСП-С/О-73 для одновременного выполнения С/О-каротажа, импульсного нейтронного гамма-каротажа (ИНГК), нейтронного активационного каротажа (НАК) и спектрометрического гамма-каротажа (СГК) в скважинах диаметром от 83 мм.

Из существующей в настоящее время аппаратуры к аналогам приборов С/О-каротажа относится комплексная аппаратура ЦСП-3ИНГКС-76, разработанная в ОАО НПП «ВНИИГИС» и ООО НПП «ИНГЕО-Сервис». В последние несколько лет она успешно опробована в боковых стволах скважин на нефтегазовых месторождениях Пермского Прикамья с целью определения коэффициента нефтенасыщенности и характера насыщения коллекторов, в том числе и при наличии пресного обводнения [1].

Аппаратура ЦСП-3ИНГКС-76 применяется в связке с прибором спектрометрического гамма-каротажа ЦСП-ГК-С-76. Она разработана для проведения комплекса ядерно-геофизических методов (ЯГМ) в обсаженных скважинах диаметром от 86 мм или в открытом стволе скважин диаметром от 100 мм. Прибор работает с низкочастотным импульсным генератором нейтронов ИНГ-10-20-120/150, оснащен двумя зондами ИНГК, зондом ИНГКС с регистрацией спектрометрии гамма-излучения радиационного захвата (ГИРЗ), нейтронным активационным зондом с регистрацией

спектра НАК и SGK. Наличие в приборе двух зондов ИНГК и зонда ИНГКС с регистрацией спектра ГИРЗ, определило название нового метода – трехзондовый спектрометрический импульсный нейтронный гамма-каротаж или сокращенно – ЗИНГКС.

Применение низкочастотного генератора нейтронов позволяет регистрировать только спектр ГИРЗ на низких энергиях, в то время как гамма-излучение неупругого рассеяния (ГИНР) на высоких энергиях нейтронов отсутствует. Соответственно, отсутствуют энергетические линии углерода и кислорода, использование которых лежит в основе оценки нефтенасыщенности по методу C/O-каротажа. Таким образом, прибор реализует стандартную технологию 2ИНГК (2ИННК); спектрометрию ГИРЗ для оценки элементного состава горных пород, включая массовые содержания водорода и хлора; нейтронный активационный каротаж (НАК) с целью выделения водонасыщенных и нефтенасыщенных зон по активации кислорода, а также SGK с регистрацией радиоактивных элементов U, Th, K и записью интегрального ГК.

В таблице приведены технические характеристики прибора ЦСП-ЗИНГКС-76 в связке с прибором спектрометрического каротажа ЦСП-ГК-С-76 с перечнем функциональных возможностей, измеряемых параметров, решаемых задач и рекомендуемых областей применения.

**Технические и функциональные характеристики аппаратуры
ЦСП-ЗИНГКС-76 в связке с ЦСП-ГК-С-76**

Технические характеристики	Измеряемые параметры	Решаемые задачи	Область применения
Макс. рабочая температура – 120 °С. Макс. давление – 100 МПа. Мин. диаметр скв. – 86 мм (обсаженные), 100 мм (открытый ствол). Внешний диаметр – 76 мм. Длина – 4500 мм. Скорость записи – до 120 м/час.	Содержание элементов: O, H, Si, Ca, Cl, Fe, Al, Mg, Na, B, Gd, Ra, U, Th, K. Нейтронные характеристики: тау (τ), сигма (Σ). Водородосодержание. Регистрация кривых: - 2ИНГК; - спектр ГИРЗ; - НАК; - ГКС.	Литологическое расчленение разреза. Выделение коллекторов. Оценка пористости. Оценка глинистости. Определение ВНК, ГНК, ГВК. Оценка нефте- и газонасыщенности коллекторов. Выделение интервалов заводнения пресной и минерализованной водой, РГХА.	Открытый ствол. Эксплуатационные обсаженные скважины, в т.ч. боковые стволы малого диаметра, хвостовики.

Принципиальным отличием аппаратуры ЦСП-ЗИНГКС-76 от существующих аналогов является то, что она за один спуск-подъем позволяет получать нейтронные характеристики по стандартному двухзондовому импульсному нейтронному гамма-

каротажу, спектральные характеристики для оценки элементного состава скелета горной породы и флюида, включая кислород для разделения пресной воды и углеводородов.

Метод нейтронного активационного каротажа (НАК) является оригинальной разработкой, не имеющей аналогов для исследования ближней зоны пласта. Все ранее созданные модификации аппаратуры предназначались только для обнаружения заколонных перетоков в обсаженных скважинах. Специально подобранные аппаратные характеристики и технологические параметры регистрации НАК позволили получать спектры с высокоразрешающей способностью, что в дальнейшем послужило основанием для разработки методики интерпретации активационных характеристик для изучения разрезов скважин. Скорость каротажа и длина зондового расстояния спектрального модуля активации подобраны таким образом, чтобы достаточно надежно в скважине регистрировалось излучение как от кислорода, так и от кремния, ядерные реакции от которых имеют разные периоды полураспада. При этом определяются параметры, отражающие как литологическую характеристику разреза скважины (что подтверждает достаточную глубинность метода для изучения разрезов скважин), так и характер насыщения порового пространства или ближней зоны (при недостатке глубинности и нерасформировании зоны проникновения).

Применение целого ряда методов ядерной геофизики в одном приборе направлено на решение следующих задач с более высоким качественным уровнем:

- определение характера насыщения пластов-коллекторов методом ИНГК с учетом влияния литологии;
- выделение газоносных пластов и оценка состава углеводородов в пластах-коллекторах за счет различного влияния «дефицита минерализации» по показаниям метода ИНГК и спектрального состава ГИРЗ метода ИНГКС;
- оценка элементного состава горных пород, в том числе массовых содержаний хлора и водорода, связанных с минерализацией пластового флюида;
- определение коэффициента нефтенасыщенности коллекторов через текущую минерализацию пластового флюида при отсутствии пресных закачек;
- выделение интервалов поступления пресных вод в нефтенасыщенные пласты при поддержании пластового давления по наличию зоны активации кислорода в воде;
- выделение радиогеохимических аномалий;
- определение направления перетока флюида при нарушении целостности цементного кольца [2].

Таким образом, использование скважинного прибора ЦСП-ЗИНГКС-76 направлено на решение тех же задач, что и аппаратуры С/О-каротажа. В условиях отсутствия спектра ГИНР, в котором выделяется пик углерода, регистрируется спектр нейтронной активации, в котором выделяется пик кислорода, и с использованием этой информации выполняется оценка текущей нефтенасыщенности при низкой или произвольной минерализации пластовых или закачиваемых вод. Кроме того, регистрация спектра ГИРЗ позволяет повысить информативность стандартного метода импульсного нейтронного каротажа за счет регистрации элементного состава горных пород.

Объем проведенных исследований аппаратурой ЦСП-ЗИНГКС-76 на месторождениях Пермского Прикамья за период 2012-2013 годов составил более 40 скважин, большинство из которых - боковые стволы, обсаженные эксплуатационной колонной 102х6,5 мм. Исследования проводились спустя 2-10 суток с момента обсадки ствола скважин одновременно с проведением АКЦ.

Анализ эффективности результатов исследований выполнен путем сопоставления выданных заключений по оценке коэффициента нефтенасыщенности и характера насыщения коллекторов с результатами свабирования и освоения продуктивных пластов. На основании таких сопоставлений делался вывод о соответствии (или несоответствии) выданных заключений полученному составу притока пластового флюида с анализом предполагаемых причин таких несоответствий.

В целом, данные по комплексной интерпретации параметров методов ЗИНГКС, НАК и СГК, полученные в результате исследований аппаратурой ЦСП-ЗИНГКС-76 (в связке с ЦСП-ГК-С-76), показали хорошее соответствие результатам свабирования и освоения продуктивных пластов на месторождениях, в том числе и разрабатываемых с закачкой вод низкой минерализации. Относительно времени проведения исследований после цементирования стволов межскважинного пространства можно сделать вывод о том, что недельный срок для коллекторов с неглубокой зоной проникновения, к которым относятся терригенные коллекторы с межзерновой структурой порового пространства, достаточен для обеспечения необходимой глубинности исследования в зоне пласта-коллектора с расформировавшейся или частично расформировавшейся зоной проникновения. В карбонатных коллекторах с трещинной и порово-трещинной структурой порового пространства глубинность зоны проникновения промывочной жидкости возрастает. Для коллекторов этого типа с целью сокращения влияния зоны проникновения на результаты исследований ядерно-геофизическими методами рекомендуется увеличить сроки выполнения исследований до 10-14 суток после проведения обсадки стволов скважин. Однако, как показал анализ сопоставления характера притоков при свабировании и последующем освоении

скважин, даже при недорасформировавшейся зоне проникновения расхождения с результатами испытаний пластов находятся на уровне соседних градаций и не имеют существенных противоречий по составу пластового флюида.

В качестве примеров на рисунках 1-3 показаны результаты интерпретации методов ЗИНГКС, НАК и СГК в различных геолого-технических условиях боковых стволов скважин Пермского Прикамья. Оценка характера насыщения проведена с использованием параметров ЗИНГК (τ , σ), ГИРЗ (параметр минерализации M_{cl}), НАК (параметр Q_{aktiv}), СГК (U , Th , K). Интерпретация проводилась на основе использования математического моделирования теоретических кривых для полностью водонасыщенных пластов (M_w , Q_{aktiv_w}) и нормирования их с зарегистрированными кривыми M_{cl} , Q_{aktiv} в интервалах водонасыщенных пластов и в пластах-неколлекторах. С учетом пористости эффект нефтенасыщенности пересчитан в коэффициент нефтенасыщенности KN_{ING} и дан прогноз характера насыщения коллекторов в колонке «Насыщение текущее».

На рис. 1 показаны результаты оценки характера насыщения коллекторов в терригенном разрезе в боковом обсаженном стволе скважины. Исследования методами ЗИНГКС, НАК, СГК проведено через 15 суток после вскрытия разреза на полимерном растворе. По результатам проведенного свабирования в интервале перфорации 1880-1890 м в бобриковском горизонте скважина вышла на фонтан нефти, при совместном освоении пластов в интервалах 1880-1890 м и 1930-1934 м был получен приток нефти с обводнением в 20%. По результатам интерпретации характер насыщения верхних пластов – нефть, ниже отмечается закономерное снижение нефтенасыщенности до «нефть+вода» и далее – «вода+нефть», что подтверждено характером полученного притока.

На рис. 2 приведены результаты интерпретации методов ЗИНГКС, НАК, СГК в терригенно-карбонатном разрезе, вскрытом на нефтяном растворе. В результате образовавшейся зоны проникновения электрический каротаж в открытом стволе отразил высокое удельное электрическое сопротивление, на основании которого насыщение коллекторов было определено как «нефть». Результаты применения методов ЗИНГКС, НАК, СГК, зарегистрированных в обсаженном стволе, после частичного расформирования зоны проникновения, через 6 суток после проведения электрического каротажа в открытом стволе, показали пониженную нефтенасыщенность коллекторов по сравнению с данными открытого ствола с преимущественным характером насыщения «вода+нефть». По результатам освоения скважины получен приток флюида с обводнением 94%, который практически подтвердил характер насыщения коллекторов, полученный методами ЗИНГКС, НАК, СГК.

На рис. 3 представлен разрез скважины в интервале залегания карбонатных горных пород верхнего турнея Т1 сложного и неоднородного строения. При достаточно однородной общей пористости коллектора (9-10%) наблюдается сильная дифференциация показаний как электрического каротажа, проведенного в открытом стволе, так и показаний методов ЗИНГКС, НАК, СГК (параметры минерализации и активации кислорода, величина τ). Анализ элементного состава также показал неоднородность горных пород по содержанию кремния (Si). Присутствие кремния и изменчивость его содержания в карбонатных горных породах указывает на окремнение, которое, как известно, снижает проницаемость коллектора. В открытом стволе этой скважины был проведен гидродинамический картаж (ГДК) и опробование пластов (ОПК) прибором АГИП-К, а также зондирование электрическим сканером БКС-73. Результаты всего комплекса исследований указывают на структурную неоднородность коллектора в виде присутствия как поровой, так и порово-трещинной структуры. Таким образом, выявленные литологическая и структурная неоднородность позволили объяснить характер геофизических кривых, указывающих на меняющиеся фильтрационные свойства и глубину зоны проникновения фильтрата бурового раствора и, как следствие, скорость расформирования зоны проникновения.

Эта скважина также интересна тем, что исследования методами ЗИНГКС, НАК, СГК в ней были проведены дважды - в открытом стволе и после обсадки. Открытый ствол исследован через трое суток после вскрытия разреза, обсаженный – через четверо суток после первичного каротажа, то есть сразу же после проведения АКЦ. Результаты оценки характера насыщения по результатам расчета коэффициентов нефтенасыщенности (KN_ING_1 – открытый ствол, KN_ING_2 – обсаженный) практически совпадают, что указывает на сохранение ситуации в ближней зоне пласта и присутствие зоны проникновения бурового раствора в столь короткие периоды времени после вскрытия разреза скважины. Незначительное повышение нефтенасыщенности отмечается в обсаженном стволе в коллекторах с повышенной пористостью (в верхней части разреза), то есть в коллекторах с преимущественно межзерновой структурой порового пространства, обеспечивающей меньшую глубину зоны проникновения по сравнению с трещинной структурой.

Эти факторы были учтены при составлении заключения по результатам проведенных исследований, где было указано о возможном занижении коэффициентов текущей нефтенасыщенности за счет присутствия зоны проникновения. Результаты дальнейшего освоения этих отложений показали обводненность в 21,2% при расчетном значении КНтек от 30 до 60%, то есть подтвердили вывод о занижении коэффициента нефтенасыщенности за счет влияния зоны проникновения.

Полученные результаты при проведении опытно-производственных работ в боковых стволах скважин месторождений Пермского Прикамья показывают высокую эффективность комплекса методов ЗИНГКС, НАК, СГК при решении задач оценки характера насыщения коллекторов в различных геолого-технических условиях. На основании выполненных исследований рекомендуется:

- в боковых стволах скважин, обсаженных колонной диаметром от 86 мм, а также в открытом стволе скважин диаметром от 100 мм использовать для оценки характера насыщения коллекторов комплекс методов ЗИНГКС, НАК, СГК, выполняемый аппаратурой ЦСП-ЗИНГКС-76 в связке с ЦСП-ГК-С-76;

- для повышения достоверности результатов интерпретации обеспечивать по возможности наиболее благоприятные условия вскрытия пластов с минимальной глубиной проникновения фильтрата бурового раствора в пласт;

- при оценке характера насыщения учитывать особенности формирования зоны проникновения в пластах различного строения порового пространства и ее влияние на результаты исследований.

В качестве преимуществ аппаратуры ЦСП-ЗИНГКС-76 по сравнению с аппаратурой, реализующей методы ИНГК и С/О-каротажа, которая очень широко используется как в Западной Сибири, так и в других регионах, можно отметить:

- возможность получения за одну спускоподъемную операцию нескольких независимых друг от друга параметров, характеризующих как литологический состав, так и характер насыщения коллекторов;

- большую по сравнению с методом С/О-каротажа глубину исследований, позволяющую проводить работы как в обсаженном, так и в открытом стволе при вскрытии разреза на полимерных растворах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Машкин К.А., Рыскаль О.Е., Коротченко А.Г. и др.* Расширение области применения ядерно-геофизических методов в сложных геолого-технических условиях // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2012. Вып. 4 (214). С. 19-28.

2. *Перельгин В.Т., Машкин А.И., Машкин К.А., Рыскаль О.Е. и др.* Ядерно-геофизические методы в модификации углерод-кислородного и трехзондового импульсного нейтронного спектрометрического каротажа // «Нефть. Газ. Новации» Научно-технический журнал. Самара. 2013. № 2. С. 47-50.

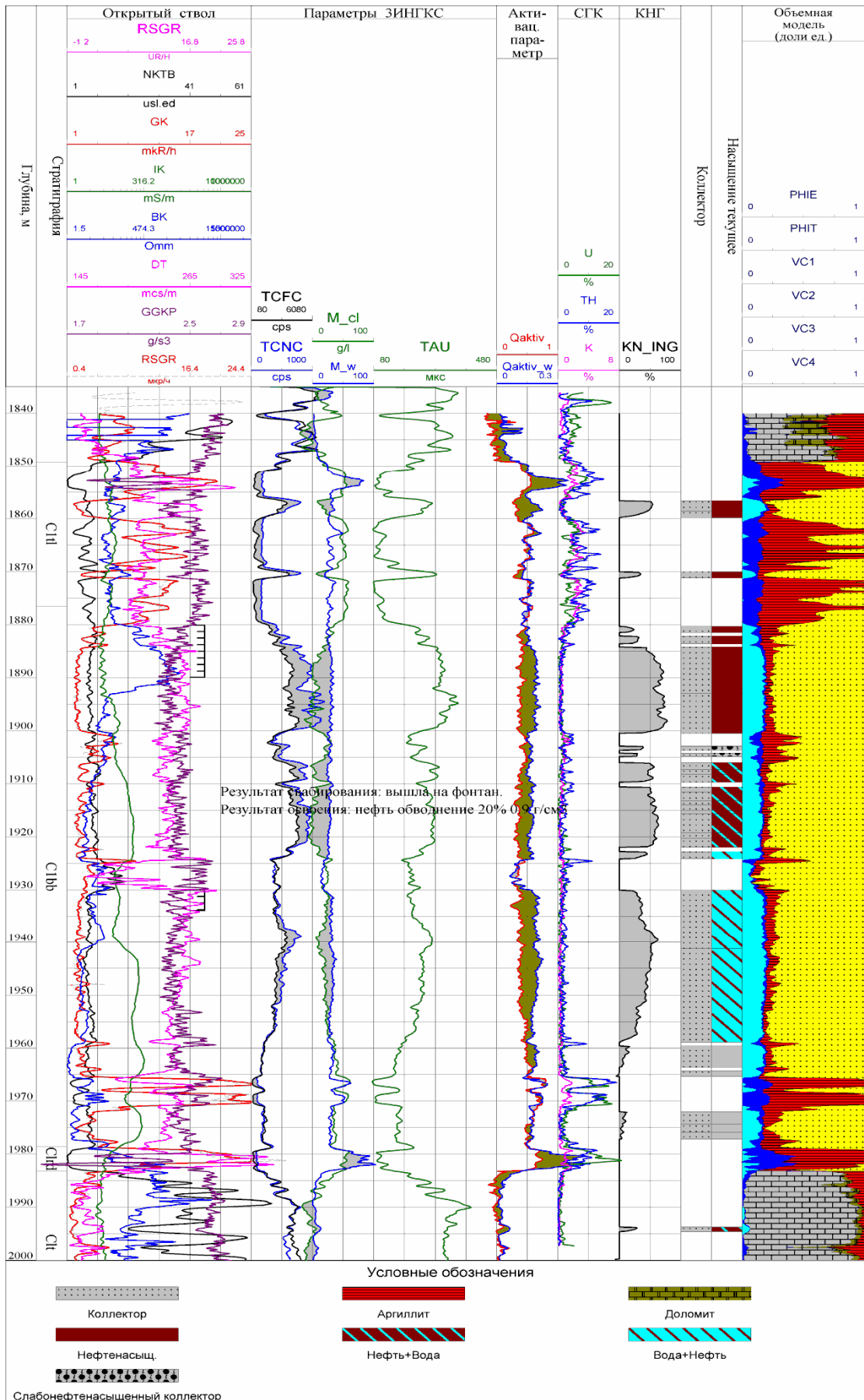


Рис. 1. Результаты интерпретации методов ЗИНГКС, НАК, СГК в терригенном разрезе

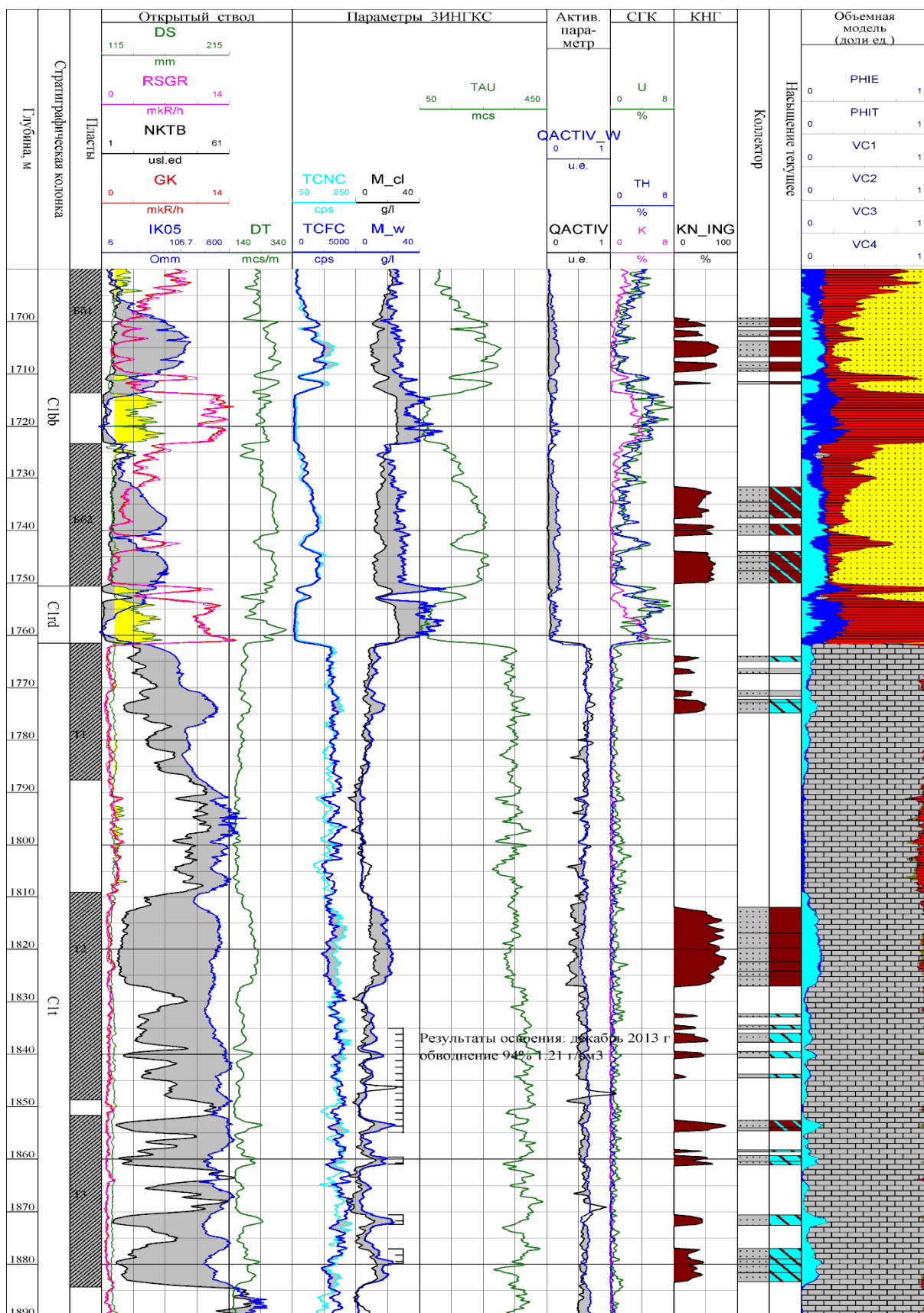


Рис. 2. Результаты интерпретации методов ЗИНГКС, НАК, СГК в терригенно-карбонатном разрезе, вскрытом на нефтяном растворе

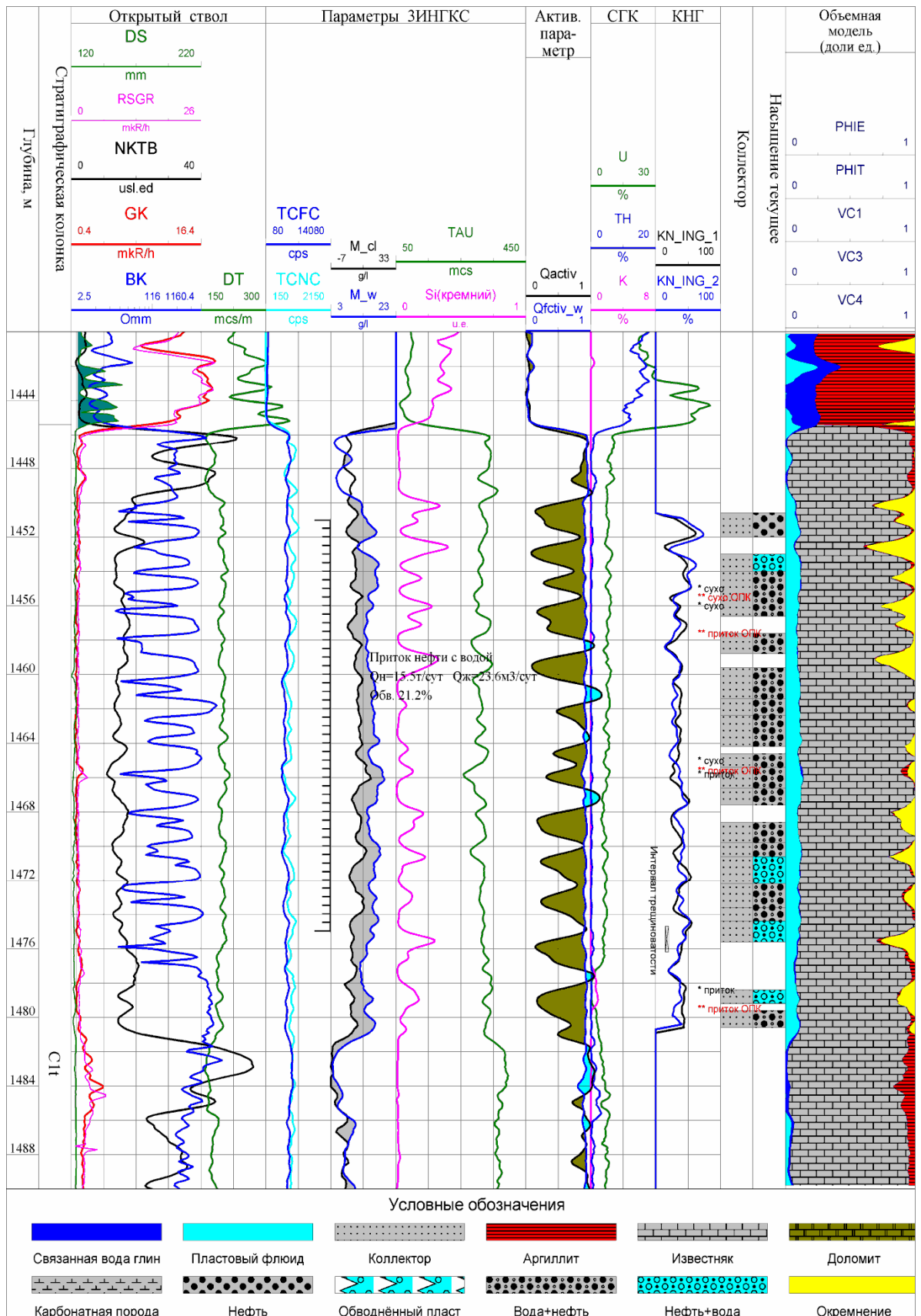


Рис. 3. Сопоставление результатов оценки характера насыщения в открытом и обсаженном стволах скважины в карбонатных отложениях верхнего турнея