



СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ ОТЛОЖЕНИЙ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ В МЕЖСКВАЖИННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В.Д. Немова¹, М.А. Бордюг², А.В. Ревяко¹

¹Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт,

²ЗАО "Моделирование и мониторинг геологических объектов",

105118, Москва, Шоссе Энтузиастов, 36, Россия, e-mail: nemova@mimgo.ru

В статье отражены особенности проведения сейсмического прогноза свойств отложений баженовской свиты в межскважинном пространстве. При помощи сейсмогеологического моделирования установлена возможность современной сейсморазведки "почувствовать" изменения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов баженовской свиты. В результате лабораторных литологических и петрофизических исследований керна определено строение разреза баженовской свиты, выявлено отличие нефтематеринских пород от потенциальных коллекторов. Полученные данные легли в основу формирования четкой задачи для интерпретации сейсморазведки. Сейсмический прогноз свойств баженовской свиты на реальном месторождении, выполненный с использованием результатов сейсмогеологического моделирования, доказал состоятельность предлагаемого подхода.

Баженовская свита, лабораторные исследования, коллекторы нефти, литология, петрофизика, сейсмический прогноз, сейсмогеологическое моделирование

SEISMIC-GEOLOGICAL MODELLING FOR CHARACTERISATION OF THE BAZHENOVKA FM. RESERVOIR IN THE INTER-WELL SPACE

V.D. Nemova¹, M.A. Bordug², A.V. Reviako¹

¹All-Russian Research Geological Oil Institute, Federal State Unitary Enterprise,

²Modelling and Monitoring of Geological Objects JSC,

36, Shosse Entuziastov, Moscow, 105118, Russia, e-mail: nemova@mimgo.ru

The paper concerns the applicability of seismic surveys to characterise the Bazhenovka Fm. reservoir rocks in the inter-well space. Seismic-geological modelling is used to check whether the available seismics can feel well-to-well porosity and permeability variations. Reference information on the Bazhenovka section structure with discriminated source and reservoir rocks is inferred from laboratory lithological and petrophysical studies of core samples. The results allow formulating precisely the objectives for interpretation of seismic data. The method is tested at a real oilfield, and the characteristic of the Bazhenovka reservoir with the use of seismic-geological modelling is proven to be efficient.

Bazhenovka Fm., laboratory core studies, lithology, rock physics, reservoir, seismic reservoir characterisation, seismic-geological modelling

Нефтеносность баженовской свиты исследуется на протяжении нескольких десятилетий, но до сих пор многие детали строения толщи не ясны. Это связано прежде всего с трудностью отбора представительного керна из-за наличия в отложениях баженовской свиты аномально высокого пластового давления. Следствием недоизученности данной толщи является низкая степень подтверждаемости сейсмических прогнозов свойств баженовской свиты в межскважинном пространстве, что, в свою очередь, обусловлено отсутствием четкой геологической задачи для сейсмического прогноза.

В последние годы благодаря применению технологий отбора изолированного керна получены принципиально новые фактические данные об отложениях баженовской свиты. Строение толщи схематично можно представить следующим образом (рис. 1): в глинисто-кремнистых породах с высоким содержанием органического вещества (ОВ) располагаются более плот-

ные слои вторично преобразованных радиоляритов [Немова, 2012, 2012/2013]. Вмещающие породы характеризуются тонкослоистой текстурой, в большинстве своем они непроницаемы, обладают нефтематеринскими свойствами. Коллекторы, имеющие промышленное значение, в них не выявлены. Эти породы очень выдержаны по составу и свойствам, образуют слои толщиной 3–8 м.

Радиоляриты встречаются как в виде отдельных слоев толщиной 0,01–0,5 м, так и в виде "радиоляритовых пачек" переслаивания с глинисто-кремнистыми породами. Толщина таких пачек варьирует от 1 до 8 м (см. рис. 1). Слои радиоляритов толщиной более 40 см образуют геологические тела, имеющие широкое площадное распространение. Они могут проследиваться в скважинах одного или соседних месторождений по данным ГИС, а радиоляритовые пачки толщиной более 2,5 м уверенно прослеживаются на протяжении сотен километров.

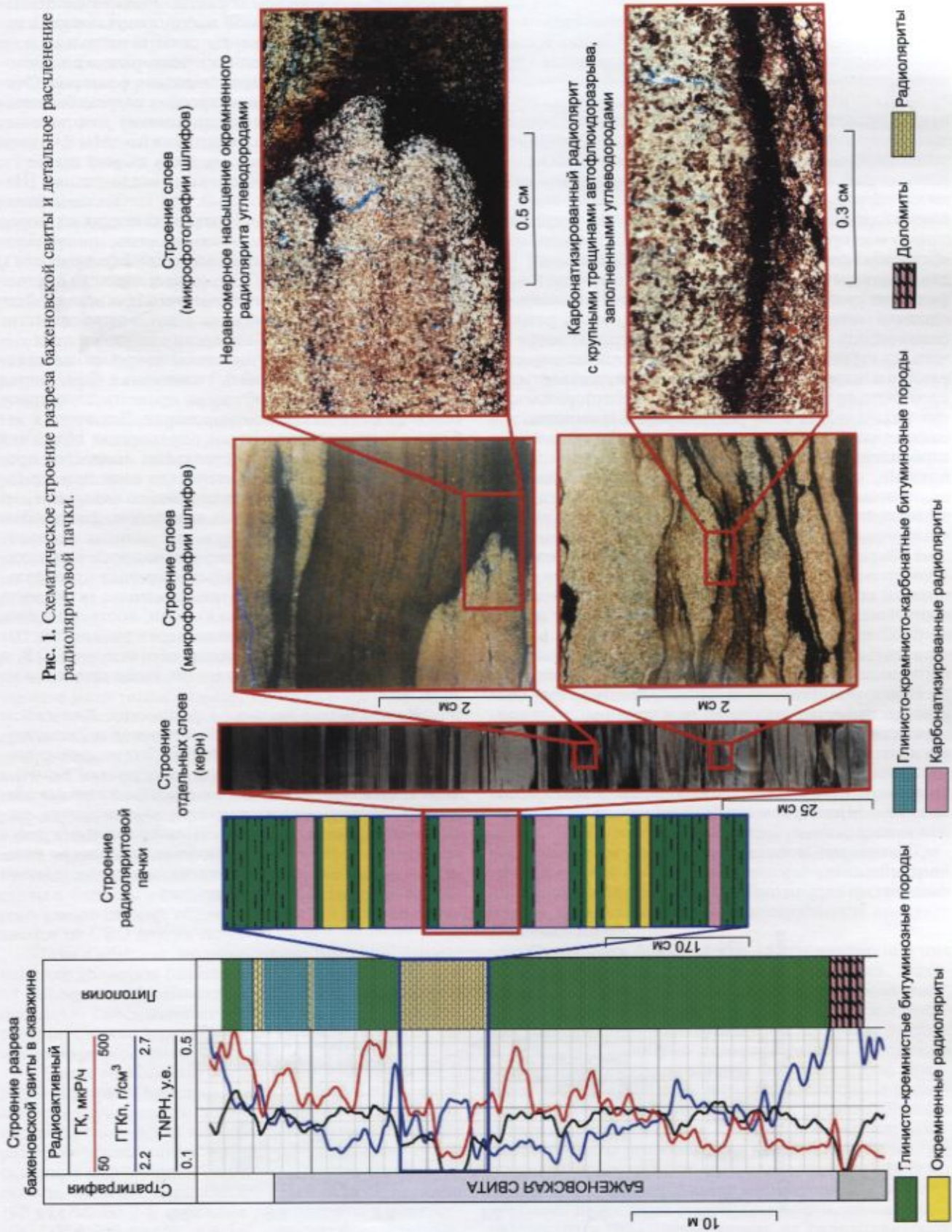


Рис. 1. Схематическое строение разреза баженовской свиты и детальное расчленение радиоларитовой пачки.

В толще баженовской свиты коллекторы формируются преимущественно в слоях радиоляритов. На фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) этих коллекторов влияют три основных фактора: вторичные преобразования радиоляритов, формирование трещин автофлюидоразрыва, тектонические разрывные нарушения.

Детальный анализ постседиментационных изменений радиоляритов позволил выявить следующие закономерности. Частичное растворение и доломитизация окремненных радиоляритов увеличивают емкость пород, а замещение их микрозернистым кальцитом на ранних этапах литогенеза в целом снижает коллекторский потенциал. Отмечено, что в пределах одного месторождения можно установить закономерности постседиментационных преобразований радиоляритов, протекающие на различных стратиграфических уровнях их распространения. Например, на одном из месторождений выявлено, что в разрезе баженовской свиты радиоляриты располагаются на четырех стратиграфических уровнях, три из которых сложены вторичными известняками, четвертый – кремнистыми доломитами. На другом месторождении три маломощных слоя радиолярита окремнены, а в составе радиоляритовой пачки доминируют слабо карбонатизированные окремненные разности. Установлено, что в зависимости от локальных условий протекания процессов постседиментационных преобразований радиоляритов ФЕС их коллекторов могут как улучшаться, так и ухудшаться в пределах одного слоя. Окремнение, карбонатизация, доломитизация, формирование трещин автофлюидоразрыва, в зависимости от относительного времени и интенсивности протекания процесса, могут также по-разному влиять на ФЕС коллекторов. Поэтому морфология радиоляритов и морфология коллектора баженовской свиты – это не одно и то же. Выделить и закартировать распространение слоев и пачек радиоляритов, безусловно, значительно проще, чем установить закономерности развития в них коллекторов, а ведь именно это является главной задачей сейсмического прогноза для отложений баженовской свиты. Таким образом, исследования вторичных преобразований радиоляритов на каменном материале необходимо проводить на каждом месторождении индивидуально.

Некоторые исследователи связывают высокую продуктивность баженовской свиты с наличием тектонических нарушений. Однако на месторождениях

Западной Сибири выявлены случаи как положительного, так и отрицательного влияния разломов на ФЕС коллекторов баженовской свиты. Уже сейчас понятно, что в своей абсолютной массе продуктивность отложений баженовской свиты связана не только и не столько с локальными зонами тектонической дислоцированности, а с целым рядом иных факторов. Считается, что прогнозировать строение разреза баженовской свиты, используя традиционные для поровых коллекторов методики, невозможно. Мы считаем иначе и постараемся доказать это в данной статье.

На основе ранее проведенных исследований [Немова и др., 2012] установлено, что коллекторы баженовской свиты отличаются от вмещающих их пород по структурно-текстурным особенностям, минеральному составу, физическим, в том числе акустическим и плотностным, свойствам. Это создает хорошие предпосылки для проведения сейсмического прогноза свойств баженовской свиты в межскважинном пространстве на основе акустической инверсии волнового поля.

Чтобы установить, может ли современная сейсморазведка “почувствовать” изменения ФЕС пород баженовской свиты, необходимо провести двухмерное сейсмогеологическое моделирование. Для этого в лабораторных условиях нами определены объемная плотность и значения интервальных скоростей продольной и поперечной акустических волн при термобарических условиях, моделирующих пластовые, на образцах керна, насыщенных керосином, для каждого литотипа [Там же]. В результате данных исследований установлено, что интервальное время прохождения акустических волн через вторично преобразованные радиоляриты значительно меньше (а скорость распространения акустических волн, соответственно, выше), чем при прохождении через тонкослоистые глинисто-кремнистые породы, обогащенные ОВ, а объемная плотность радиоляритов выше примерно на 20 % (рис. 2).

Именно резкие различия в физических, в том числе акустических, свойствах радиоляритов и глинисто-кремнистых пород создают предпосылки успешного прогнозирования ФЕС отложений баженовской свиты в межскважинном пространстве сейсмическими методами. Кроме того, важно помнить, что свойства глинисто-кремнистых пород очень выдержанные и редко меняются в пределах месторождения, поэтому на изменения сейсмического разреза преимущественно влияют “метаморфозы” слоев радиоляритов.

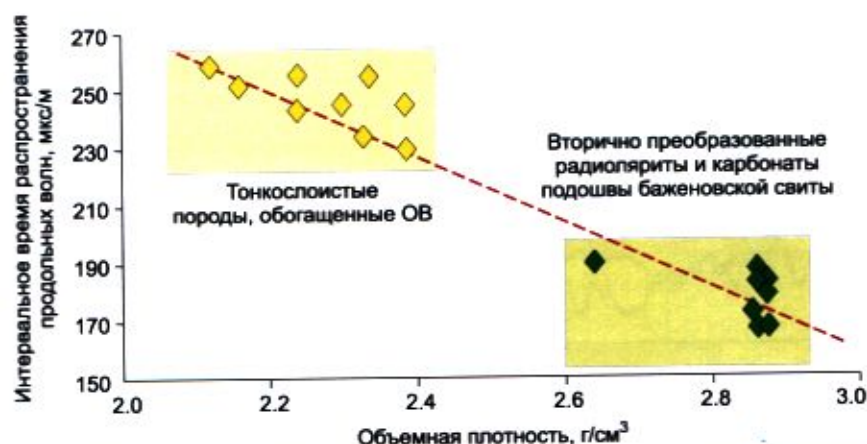


Рис. 2. Зависимость значений интервальных скоростей от объемной плотности пород в баженовской свите.

Первая задача сейсмогеологического моделирования – установить, при какой толщине радиоляритовых прослоев их можно будет распознать среди глинисто-кремнистых пород. Для ответа на этот вопрос проведем сейсмогеологическое моделирование.

Для моделирования создаем пять синтетических акустических кривых, которые отражают строение разреза баженновской свиты, содержащей один слой радиолярита, расположенный в центральной части толщи. В первой скважине слой радиолярита отсутствует, во второй толщина слоя радиолярита составляет 1 м, в каждой последующей скважине толщина увеличивается на 2 м: 3–5–7 м соответственно. Для подстилающих и перекрывающих баженновскую свиту пород принимаем значение интервального времени (DT) равным 260 мкс/м, для глинисто-кремнистых пород баженновской свиты – 340 мкс/м, а для слоя радиолярита – 220 мкс/м.

Используя свертку модельных акустических кривых с теоретическим импульсом Рикера с несущей частотой 40 Гц, создаем синтетический временной разрез через скважины 1–2–3–4–5 (рис. 3, а). На полученном временном разрезе видно, что в скважинах 1 и 2, где толщина радиоляритовых слоев составляет 0 и 1 м, в интервале баженновской свиты отсутствует дополнительная положительная фаза. А при толщине радиоляритового слоя более 3 м на временном разрезе в интервале баженновской свиты появляется дополнительная положительная фаза, которая формируется от кровли плотных слоев – радиоляритов. Причем это видно как на идеализированном (см. рис. 3, а), так и на сильно зашумленном (см. рис. 3, б) временных разрезах, что указывает на устойчивость данных изменений.

Полученные из синтетического временного разреза в интервале отложений баженновской свиты спектрально-временные образы (СВО) (см. рис. 3, в), отвечающие пяти типам разреза, также различаются между собой. Естественно, что для проведения реального прогноза столь дробная типизация разрезов скважин не применяется. Разрезы скважин 1 и 2 стоит объединить в I тип разреза с толщиной радиоляритового слоя менее 1 м. Скважину 3 можно отнести ко II типу разреза, где толщина радиоляритов составляет 2–4 м, а скважины 4 и 5 – к III типу разреза, в котором толщина радиоляритов превышает 5 м. Такого рода типизация позволяет объединить разрезы баженновской свиты с близкими свойствами в один тип, СВО которого имеют схожий облик и при этом уверенно отличаются от СВО других типов разреза.

Таким образом, моделирование показало, что изменение толщины радиоляритовых слоев отражается на сейсмической волновой картине, следовательно, с помощью сейсмических методов можно проводить районирование отложений баженновской свиты по толщине радиоляритовых слоев.

Теперь необходимо доказать, что изменения ФЕС радиоляритовых прослоев также возможно закартировать сейсмическими методами. Для этого создаем три новых синтетических акустических кривых. Различия разрезов заключаются в ФЕС радиоляритов. В 1-й скважине радиоляриты обладают монолитными свойствами, значение акустического каротажа (DT) равно 190 мкс/м. Во 2-й скважине радиоляриты проницаемы, DT = 220 мкс/м, а в 3-й – высокопроницаемые, DT = 250 мкс/м. Толщину слоя радиолярита делаем одинаковой во всех скважинах – 3 м. Для подсти-

лающих и перекрывающих баженновскую свиту пород DT = 260 мкс/м, для глинисто-кремнистых пород баженновской свиты DT = 340 мкс/м.

Используя свертку модельных акустических кривых с теоретическим импульсом Рикера с несущей частотой 40 Гц, создаем синтетический временной разрез через скважины 1–2–3. На полученном временном разрезе видно, что все типы геологического разреза отличаются друг от друга, это же подтверждается визуальным анализом СВО скважин 1, 2, 3 (рис. 4). Это доказывает, что с помощью сейсмических методов можно проводить районирование отложений баженновской свиты по ФЕС радиоляритовых слоев, обладающих повышенной акустической жесткостью, относительно вмещающих пород.

Сравнивая результаты проведенного сейсмогеологического моделирования, можно утверждать, что изменение толщины радиоляритов вносит более значимые изменения в сейсмическую волновую картину, чем вариации их ФЕС. Однако в пределах одного месторождения, если речь идет о “классических” разрезах баженновской свиты, изменения толщин отдельных слоев (пачек) свиты чаще всего незначительны: от скважины к скважине – на 0,5–2 м. Поэтому основное влияние на сейсмическую волновую картину баженновской свиты в реальной ситуации оказывают именно изменения ФЕС радиоляритов.

Результаты сейсмического моделирования доказали теоретическую возможность картирования свойств отложений баженновской свиты в межскважинном пространстве сейсмическими методами. Безусловно, преобладающая частота сейсмического сигнала в 40 Гц, которая использовалась при моделировании, в реальных условиях может быть достигнута только в случае высокой тщательности проведения полевых работ и выбора оптимальных условий возбуждения и приема сейсмических волн. Однако оптимальные условия далеко не всегда достижимы на практике, что затрудняет или снижает качество картирования свойств баженновской свиты в межскважинном пространстве. В случае же высокого качества сейсмических материалов результаты подобного прогноза могут быть весьма информативны. В качестве подтверждения данного тезиса на практике приведем результаты прогноза свойств этой толщи, выполненного на одном из месторождений Широного Приобья Западной Сибири методом решения обратной динамической задачи с использованием акустической инверсии волнового поля в программном продукте Humpson-Russell.

Отложения баженновской свиты месторождения изучены в кернах с помощью литологических, геохимических и петрофизических методов, кроме того, проанализированы данные промыслово-геофизических исследований в интересующем интервале разреза. В результате выявлено строение разреза отложений баженновской свиты на данном месторождении. Доказано, что продуктивные интервалы связаны с радиоляритовой пачкой толщиной 6–8 м, расположенной в центральной части свиты. Помимо нее в кровле баженновской свиты располагается карбонатная пачка, а в подошве присутствуют прослои доломитов (аналог пласта КС₁), где также могут формироваться самостоятельные природные резервуары нефти, обладающие различными ФЕС, отделенные от радиоляритовой пачки глинисто-кремнистыми покрывками с хорошими изолирующими свойствами. Таким образом, в

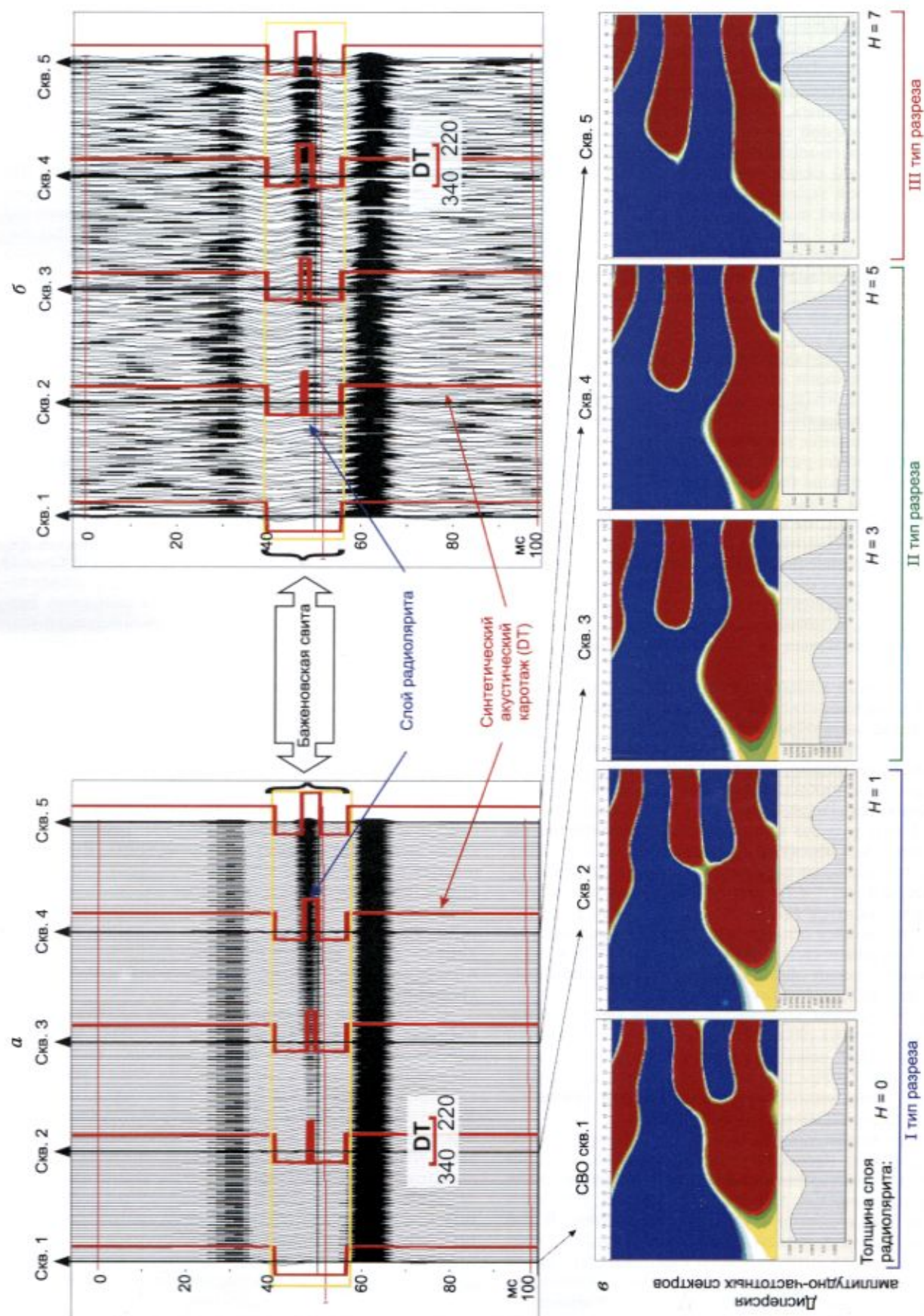


Рис. 3. Синтетические временные разрезы: без посторонних шумов (а) и с 50 % случайных помех (б). СВО и амплитудно-частотные спектры разрезов скважин в интервале баженовской свиты (а).

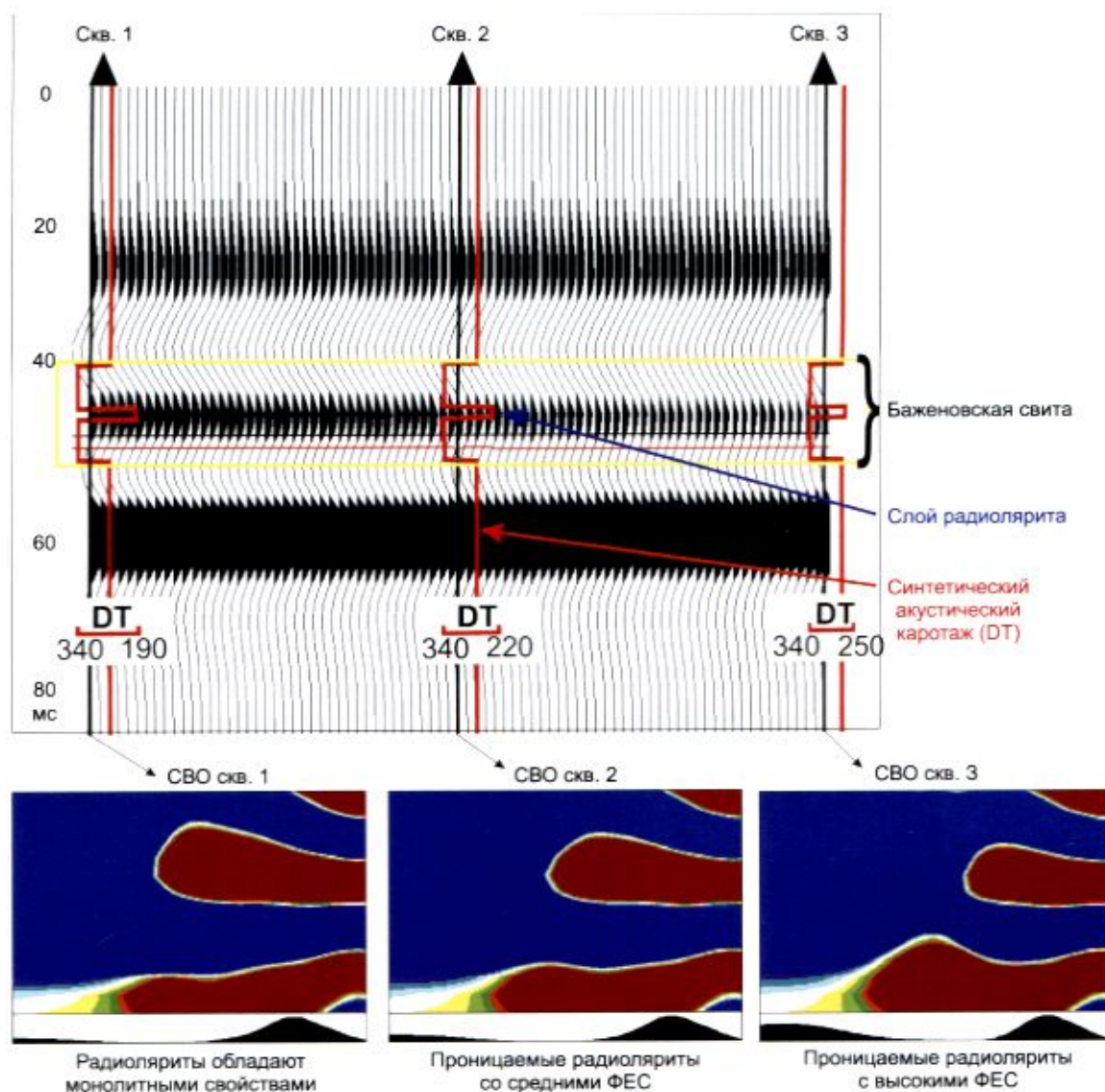


Рис. 4. Синтетический временной разрез через скважины 1, 2, 3, различающиеся ФЕС радиоляритов. СВО разрезов скважин в интервале баженовской свиты и их амплитудно-частотные спектры.

результате лабораторных исследований керна и промысловых данных на месторождении установлено наличие трех разобщенных продуктивных интервалов разреза баженовской свиты, отличающихся от вмещающих пород значительно большей акустической жесткостью. Доказано, что в изученных скважинах основным приточным интервалом является именно радиоляритовая пачка, свойства которой стали основным объектом для сейсмического прогноза.

Результатом акустической инверсии данных сейсморазведки 3D стал куб импедансов. Важно отметить, что на полученных разрезах акустических жесткостей прослеживаются все три уровня развития плотных пропластков (рис. 5, а): верхняя карбонатная, средняя радиоляритовая и нижняя доломитовая пачки, представленные на разрезах коричнево-желтыми и зелеными тонами, соответствующими интервалу значений акустической жесткости 7500–8000 м/с²·г/см³. Вмещающие глинисто-кремнистые сильно битуминозные породы отображаются голубыми и синими тонами,

отвечающими низким значениям импедансов – менее 7500 м/с²·г/см³. На разрезах акустических жесткостей четко видна зональность разреза: чередование глинисто-кремнистых пород, обладающих низкой акустической жесткостью, и «жестких» радиоляритовых и карбонатных прослоев, которые могут содержать коллекторы.

Толщина радиоляритовой пачки – основного приточного интервала баженовской свиты на месторождении – составляет 6–8 м, что позволяет прогнозировать ее свойства отдельно от остального разреза. На всех разрезах акустических импедансов радиоляритовая пачка уверенно отличается от остального разреза, что позволило провести надежную корреляцию кровли и подошвы этой пачки. Построенная карта средних значений акустического импеданса в интервале радиоляритовой пачки позволила установить значения импеданса в точках скважин.

Как уже отмечалось, основным приточным интервалом разреза изученного месторождения является

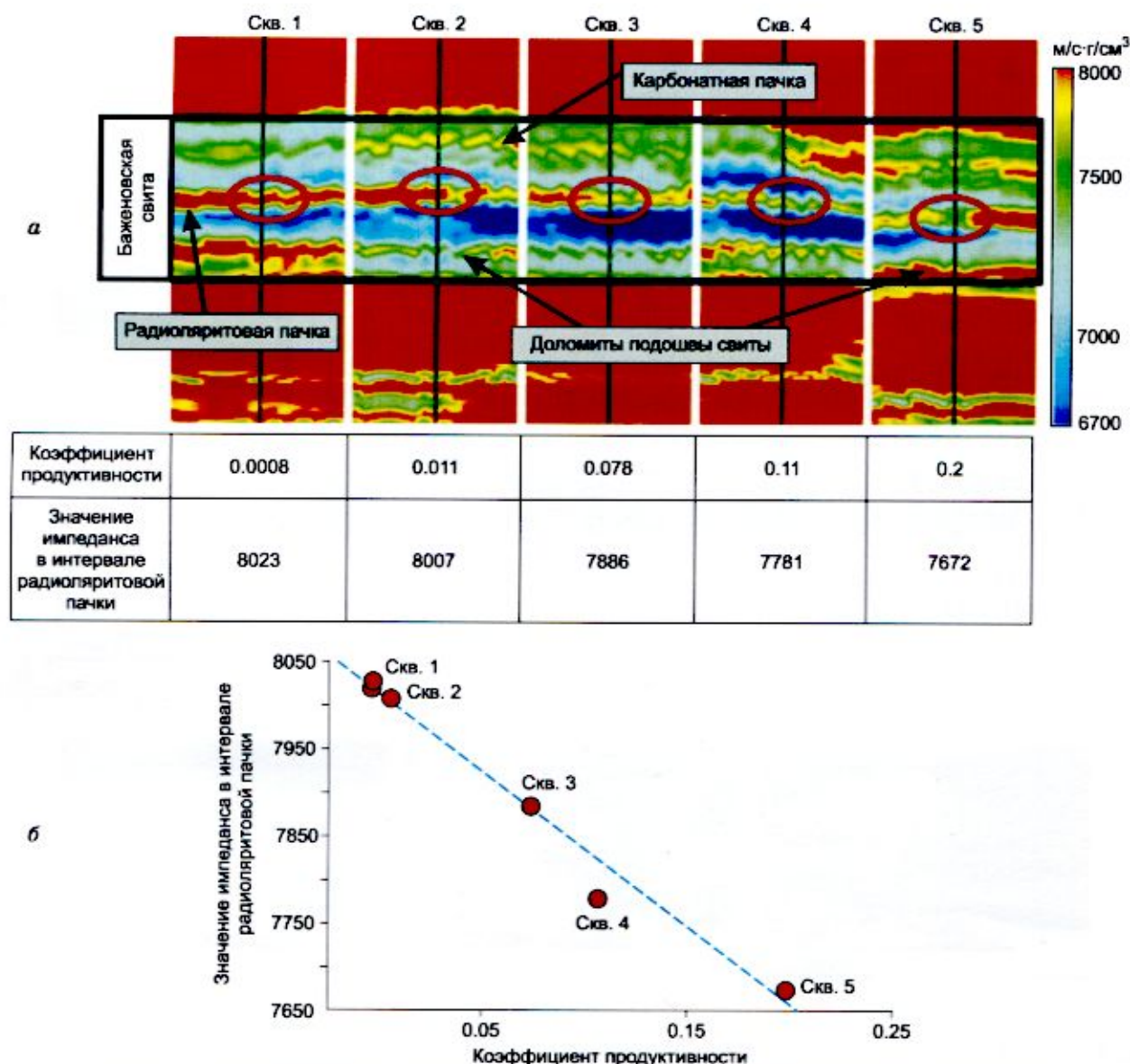


Рис. 5. Разрезы акустической жесткости вблизи испытанных скважин месторождения (а). График зависимости значений импедансов от коэффициента продуктивности отложений баженовской свиты в интервале радиопяритовой пачки (б).

именно радиопяритовая пачка, поэтому мы считаем корректным сопоставление коэффициента продуктивности изученных скважин со значениями акустических импедансов в интервале радиопяритовой пачки в точках этих скважин (см. рис. 5, б). Сопоставление позволило установить закономерность: чем выше коэффициент продуктивности скважины, тем ниже значения импеданса (т. е. выше степень пористости и/или трещиноватости) в интервале радиопяритовой пачки. Этот вывод позволяет интерпретировать результаты акустической инверсии. Для этого на карте значений импедансов, построенной для интервала радиопяритовой пачки, необходимо выделить участки с относительно пониженными значениями импедансов, соответствующих перспективному типу разреза баженовской свиты. Такой же анализ необходимо провести для интервала кровли баженовской свиты, где встречаются коллекторы с невысокими ФЕС, а также

подошвенной части толщи, где распространены доломиты, в которых могут формироваться высокочемкие коллекторы. Сопоставление результатов анализа трех продуктивных интервалов разреза баженовской свиты позволит выбрать оптимальное место для бурения новых скважин.

Таким образом, сейсмогеологическое моделирование и реальные данные прогноза свойств баженовской свиты в межскважинном пространстве доказывают, что изменения ФЕС отложений данной свиты отражаются на сейсмической волновой картине отражающего горизонта (ОГ) «Б». Кроме того, имея качественную информацию о строении баженовской свиты и диапазоне изменений ФЕС отложений, основанную на результатах исследований керна, можно эффективно использовать сейсмические данные для прогноза свойств баженовской свиты в межскважинном пространстве.

В данной статье рассмотрен пример проведения сейсмического прогноза методом решения обратной динамической задачи сейсморазведки. Судя по различиям спектрально-временных образов и амплитудно-частотных спектров типов разреза баженовской свиты (см. рис. 3, 4), картировать ее свойства можно, применяя и другие технологии, например спектрально-временной анализ сейсмической записи, или принципиально другие подходы [Гогоненков, Некрасова, 2012].

С учетом небольших изменений в сейсмической волновой картине ОГ «Б» огромную важность приобретает качество сейсмического материала. Очевидно, что с помощью сейсморазведки 2D решать тонкие задачи по баженовской свите крайне не оптимально, необходимо использовать именно сейсморазведку 3D.

ВЫВОДЫ

Сейсмогеологическое моделирование и реализация на модельных сейсмических профилях технологичной интерпретационной обработки показали возможность применения сейсмических данных для выделения зон распространения основных типов геологического разреза *баженовской свиты*.

Физической основой применения сейсморазведки для картирования изменений ФЕС отложений баженовской свиты в межскважинном пространстве является то, что коллекторы резко контрастируют по своим акустическим свойствам с вмещающими породами.

Качество сейсмического прогноза определяется наличием достоверных данных о строении разреза баженовской свиты *на изучаемом месторождении*, полученных как в ходе лабораторных исследований керна, так и интерпретации данных ГИС в скважинах, где керн не отобран. Кроме того, необходимы данные о промыслово-геофизических исследованиях в интервале отложений баженовской свиты, которые позволят провести геологическую типизацию разрезов толщи по степени продуктивности.

В пределах одного месторождения общее строение баженовской свиты классического типа меняется плавно, поэтому основное влияние на сейсмическую волновую картину оказывают именно изменения ФЕС продуктивных интервалов разреза толщи, сложенных вторично преобразованными радиоляритами или карбонатными породами.

Коллекторы баженовской свиты резко отличаются от вмещающих пород акустическими свойствами, что при условии четкой постановки задачи для прогноза позволяет эффективно изучать их современными методами интерпретации данных сейсморазведки, традиционно применяемыми для картирования поровых коллекторов.

Литература

Немова В.Д. Условия формирования коллекторов в отложениях баженовского горизонта в районе сочленения Красноленинского свода и Фроловской мегаплатины // Нефтегазовая геология. Теория и практика : Электрон. науч. журнал. СПб., 2012. Т. 7. № 2. [Эл. ресурс]. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/23_2012.pdf

Немова В.Д. Строение отложений баженовской свиты: закономерности и изменчивость // Нефть и газ Евразии : Электрон. журнал. М., 2012/2013. № 12/1. С. 54–57. [Эл. ресурс]. URL: <http://www.oilandgaseurasia.com/digital/2013-01.html>

Немова В.Д., Асташкин Д.А., Гаврилов С.С. Методические наработки в области комплексных литолого-петрофизических исследований керна отложений баженовской свиты // Геология нефти и газа. 2013. № 3. С. 38–45.

Гогоненков Г.Н., Некрасова Л.А. Прогноз зон повышенной продуктивности баженовской толщи Западной Сибири сейсморазведкой 3D // Геофизика. 2012. Юбилейный выпуск – 45 лет ЦГЭ.

*Поступила в редакцию 10 мая 2013 г.,
в окончательном варианте – 20 июня 2013 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

НЕМОВА Варвара Дмитриевна – кандидат геолого-минералогических наук, руководитель группы исследований продуктивности сланцевых формаций Всероссийского научно-исследовательского геологического нефтяного института.
Тел.: 8 499 781 68 50, доб. 3269; e-mail: nemova@mimgo.ru

БОРДЮГ Максим Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела сейсмогеологического моделирования ЗАО «Моделирование и мониторинг геологических объектов». E-mail: bordug@vnigni.ru

РЕВЯКО Александр Валерьевич – ведущий геофизик Всероссийского научно-исследовательского геологического нефтяного института. E-mail: revyako@vnigni.ru