

4D-СЕЙСМОРАЗВЕДКА КАК ИНСТРУМЕНТ ЭФФЕКТИВНОГО МОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МОРСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Р.Ю. Дашков, «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.» (Южно-Сахалинск, Россия)

Т.Н. Гафаров, «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.»

Р.Г. Облеков, «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.»

А.В. Хабаров, «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.»

О.В. Тимофеева, «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.»

Сейсмический мониторинг разработки продуктивных пластов представляет собой серию разделенных по времени сейсмических исследований. Корректное применение технологии 4D-мониторинга позволяет получить динамическую картину процессов, протекающих в пласте в период эксплуатации, и решить множество задач, в числе которых: определение дренируемых областей и локализация не охваченных разработкой запасов; контроль за продвижением фронта закачиваемой воды или газа; контроль за изменением пластового давления; выявление зон пласта, где произошло заметное уплотнение пород-коллекторов; контроль за изменением напряженно-деформированного состояния перекрывающего массива горных пород. В статье рассматривается опыт применения этого метода компанией «Сахалин Энерджи», а также наиболее значимые полученные результаты.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИЗУЧЕНИЯ И ОБЗОР ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе нескольких этапов сейсмомониторинга объектами изучения являлись Пильтун-Астохское и Лунское нефтегазоконденсатные месторождения (НГКМ), разрабатываемые компанией «Сахалин Энерджи» с 1999 и 2009 г. соответственно. Рассматриваемые объекты расположены в Охотском море на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин в 12–15 км от побережья и представлены многопластовыми залежами, промышленная нефтегазоносность которых связана с отложениями нутовского, окобыкайского и дагинского пластов миоценового возраста.

Детальные морские сейсморазведочные 3D-работы на Пильтун-Астохском и Лунском месторождениях первоначально выполнены в 1997 г. В связи с высоким влиянием приповерхностного газа на качество сейсмических данных на Лунском участке новая 3D-съемка проведена в 2003 г.

Начиная с 2010 г. 3D-сейсморазведка была организована

повторно в целях дальнейшего 4D-мониторинга разрабатываемых залежей нефти и газа (контрольная 4D-съемка в пределах Астохского участка выполнялась в том же году). В результате удалось получить данные высокого качества, на основе которых были выбраны цели для бурения боковых стволов нескольких скважин Астохского участка.

Основываясь на первом успешном опыте 4D-мониторинга, подобную съемку провели в 2015 и 2018 гг. на площадях Пильтун-Астохского и Лунского НГКМ. Общая история сейсмического мониторинга Пильтун-Астохского и Лунского месторождений представлена на рис. 1.

ТЕХНОЛОГИЯ 4D-МЕТОДА: ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ И ОПЫТ «САХАЛИН ЭНЕРДЖИ»

Технология этого метода включает сейсмическую 4D-съемку, обработку данных и анализ результатов. Каждый этап описан ниже, однако акцент сделан на интерпретации данных, поскольку именно этот блок работы напрямую связан

с дальнейшей оптимизацией разработки месторождений и наиболее полно раскрывает экономический эффект от использования метода.

При проведении мониторинговой 4D-съемки «Сахалин Энерджи» прибегала к различным технологиям морских сейсмических работ: наряду с применением буксируемых сейсмокос использовались и донные датчики. Исторически (до 2018 г.) на объектах компании применялись только сейсмические косы. В ходе такой съемки специализированное судно наравне с группой пневмоисточников буксирует от шести до восьми сейсмических кос длиной 4,5 км. Они состоят из множества секций и вмещают приемную аппаратуру. Описанная технология позволяет получить данные высокого качества и до сих пор остается основным методом, применяемым на Пильтун-Астохском НГКМ.

Однако наличие обширной газовой аномалии в приповерхностной части Лунского НГКМ делает результаты съемки на косах неэффективными, поскольку большой участок сводовой части остается

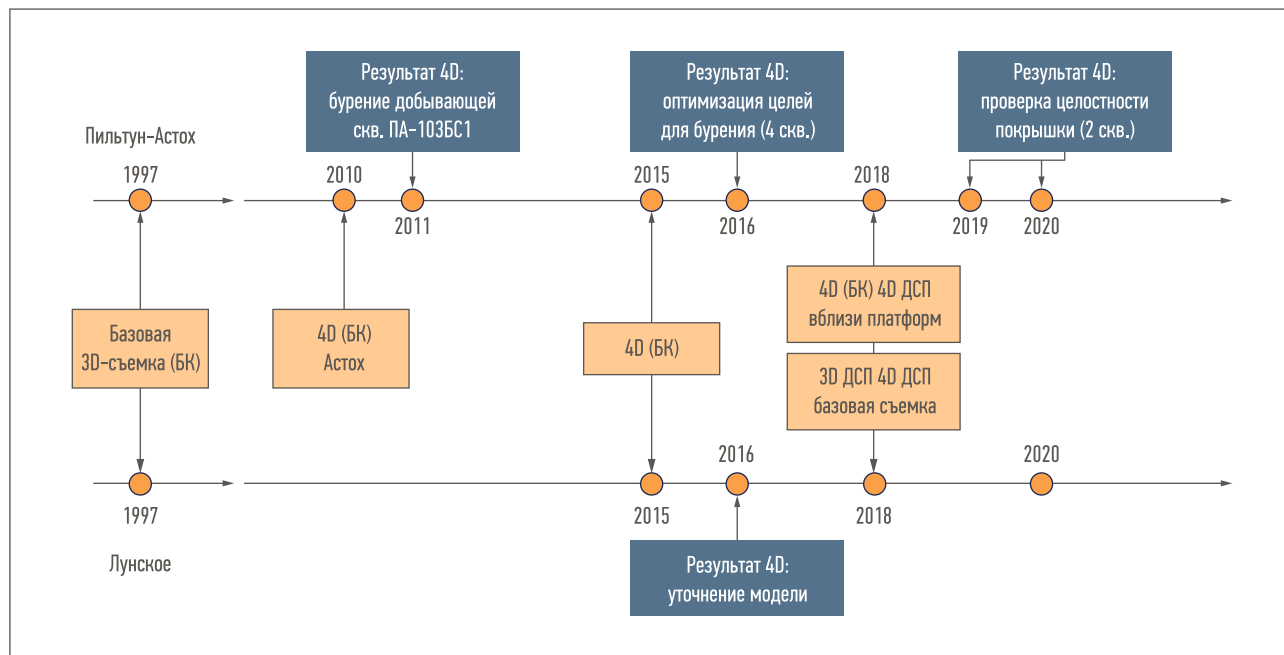


Рис. 1. Обзор геофизических исследований и сейсмического мониторинга компании «Сахалин Энерджи», где БК – буксируемые косы, ДСП – донные сейсмические станции

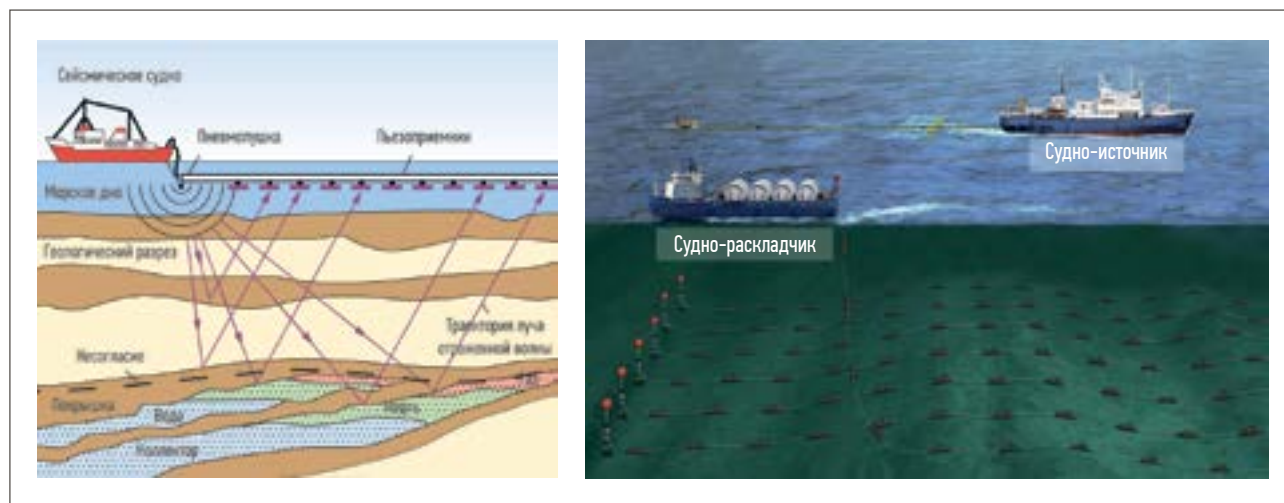


Рис. 2. Методология проведения морской сейсмической съемки: а) буксируемые косы; б) донные сейсмические станции

неинтерпретируемым. Для того чтобы получить представление о строении центральной части и в дальнейшем анализировать 4D-сигнал по всей площади месторождения, в 2018 г. принято решение о проведении съемки с донными сейсмическими приемниками, которые спускаются на дно с помощью тросов. Автономные сейсмостанции производят запись колебаний, которые возбуждаются источниками, расположенными на движущемся судне (рис. 2).

Эта технология позволяет получить сейсмическое изображение под газовым облаком за счет так называемого «подстрела» под аномалией, которая разрушает сейсмосигнал. Независимо от выбранной технологии проведения съемки неизменным остается основной принцип 4D-метода – правило повторяемости, которое подразумевает точное воспроизведение параметров морских работ и комплектации сейсмического

оборудования. В первую очередь на успешность 4D-мониторинга влияет точность позиционирования приемников и источников, а также возможность воспроизвести их положение в пространстве при повторной съемке. Повторяемость геометрических параметров позволяет сократить уровень шума, а значит, выделить и интерпретировать даже слабый 4D-сигнал. Помимо параметров расстановки, при планировании сейсмических 4D-работ необходимо



Проведение морской сейсмической съемки на объектах «Сахалин Энерджи» в 2018 г.

принимать во внимание и другие факторы, влияющие на изменение скорости распространения сейсмических волн. К ним относятся, например, приливы/отливы и температура морской воды. Эти факторы возможно прогнозировать, а соответственно, и контролировать с помощью детального планирования съемки.

Однако некоторые изменения предсказывать сложнее: примером может служить шум от вибрации сейсмических коек, который связан с высотой волны. Чтобы сократить неблагоприятное влияние таких факторов, «Сахалин Энерджи» привлекает к работам экспертов по контролю качества 4D-данных. Находясь на сейсмическом судне,

они могут в режиме реального времени определить проблемы с записью сигнала, что позволяет повторить регистрацию на том участке, где результаты работ не соответствуют установленным требованиям. Такой подход обеспечивает оптимальный результат и успешность 4D-кампании в целом.

Очевидно, что добиться идентичности параметров съемок невозможно, поэтому подавление 4D-шума происходит на следующем шаге – во время обработки данных. Его наличие связано с различиями в конфигурации волн-помех. Именно поэтому вначале применяются графы обработки, ослабляющие влияние вариаций параметров съемки и окружающей среды (глубина моря, изменение скорости в воде). Затем производится специфическая 4D-обработка, нацеленная на выравнивание параметров сейсмических записей. Основными ее результатами становится набор сейсмических кубов, в том числе и куб разности. На этом массиве данных и строится весь последующий анализ.

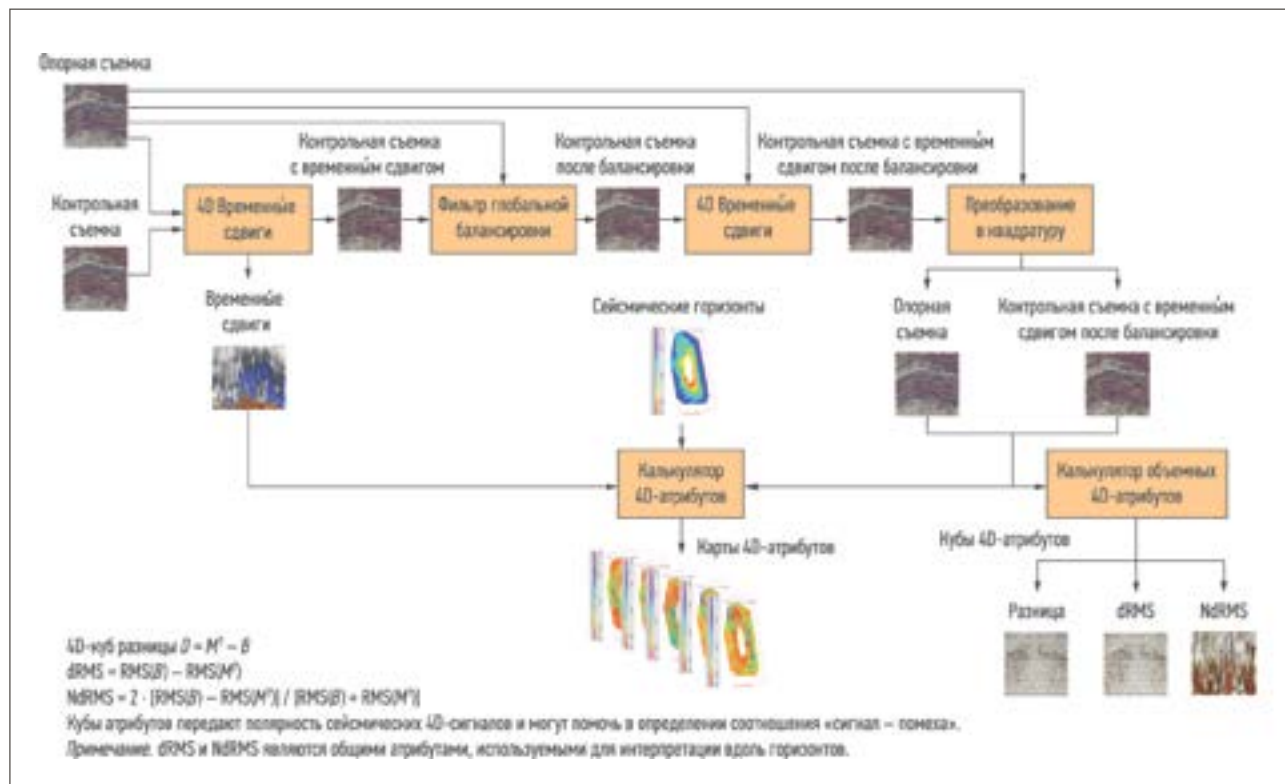


Рис. 3. Процесс подготовки сейсмических 4D-атрибутов (М. Петрова, «Сахалин Энерджи»)

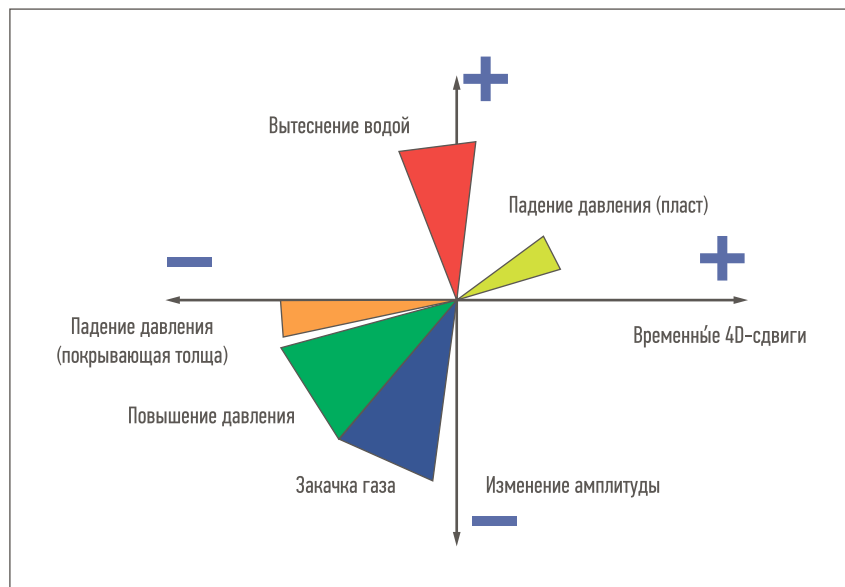


Рис. 4. Основные процессы в пласте в ходе разработки, влияющие на формирование 4D-сигнала

ходимо учитывать ограничения, связанные с чувствительностью метода и наложением полярных сигналов, например повышение давления в результате закачки воды и сопутствующие процессы флюидозамещения. Специалисты «Сахалин Энерджи» успешно решают такие вопросы с помощью моделирования – как одномерного на скважинных данных, так и трехмерного на основе существующих моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОМОНИТОРИНГА НА ОБЪЕКТАХ «САХАЛИН ЭНЕРДЖИ»

В целом в индустрии отмечают несколько направлений, в которых можно выделить экономический эффект от использования 4D-метода. Среди них увеличение извлекаемых запасов, интенсификация отборов, сокращение затрат и управление вопросами охраны труда, здоровья и окружающей

Основой анализа результатов 4D-данных является качественная интерпретация, выполняемая специалистами компании «Сахалин Энерджи». Она базируется на совместном анализе сейсмических 4D-атрибутов и промысловых данных. Для подготовки сейсмических атрибутов используется алгоритм, представленный на рис. 3.

В случае, если сейсмическая съемка и обработка данных выполнены корректно, куб разницы и его производные могут быть использованы для анализа изменений в пластах-коллекторах, вызванных эксплуатацией месторождения. Действительно, многие из процессов, происходящих во время разработки, влияют на упругие свойства среды. Как правило, речь идет о флюидозамещении, а также об изменении давления. Причем различные по своей природе процессы могут приводить к формированию схожего 4D-сигнала (рис. 4).

Так, например, увеличение акустической жесткости со временем может наблюдаться как вследствие замещения углеводородов водой при поднятии контакта или закачки воды, так и при уплотнении пород в результате истощения коллектора. Для того чтобы снизить уровень неопределенности,

обычно привлекаются данные добычи, геофизические исследования скважин и промыслово-геофизические исследования. Помимо этого, при анализе необ-

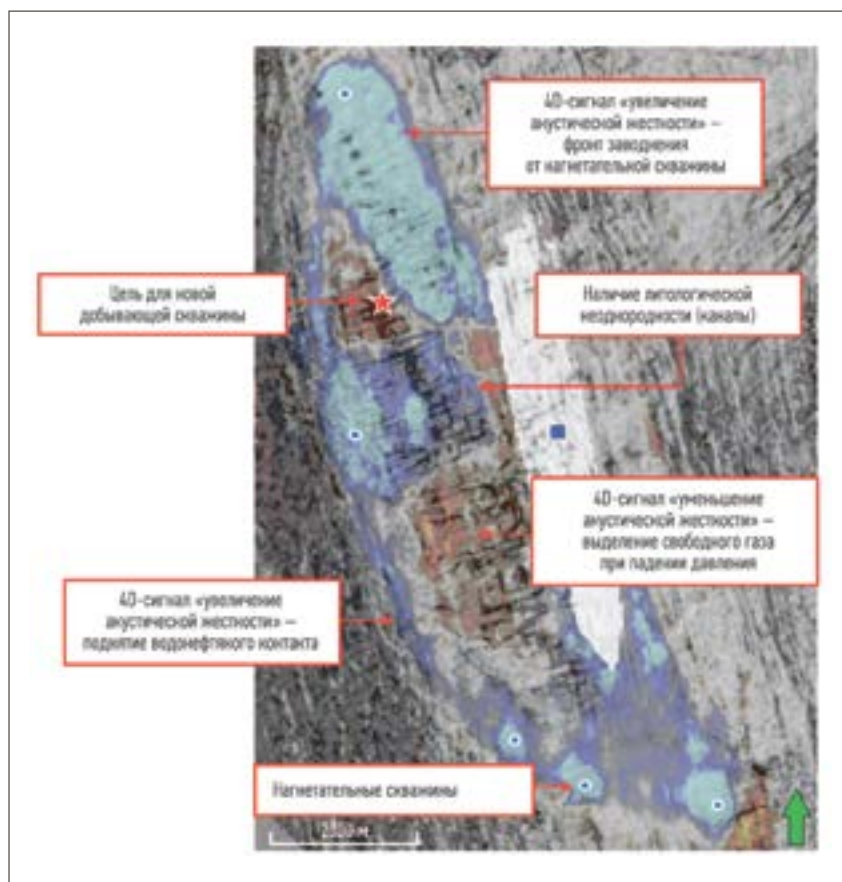


Рис. 5. Карта 4D-атрибута для основного продуктивного пласта Астохского участка

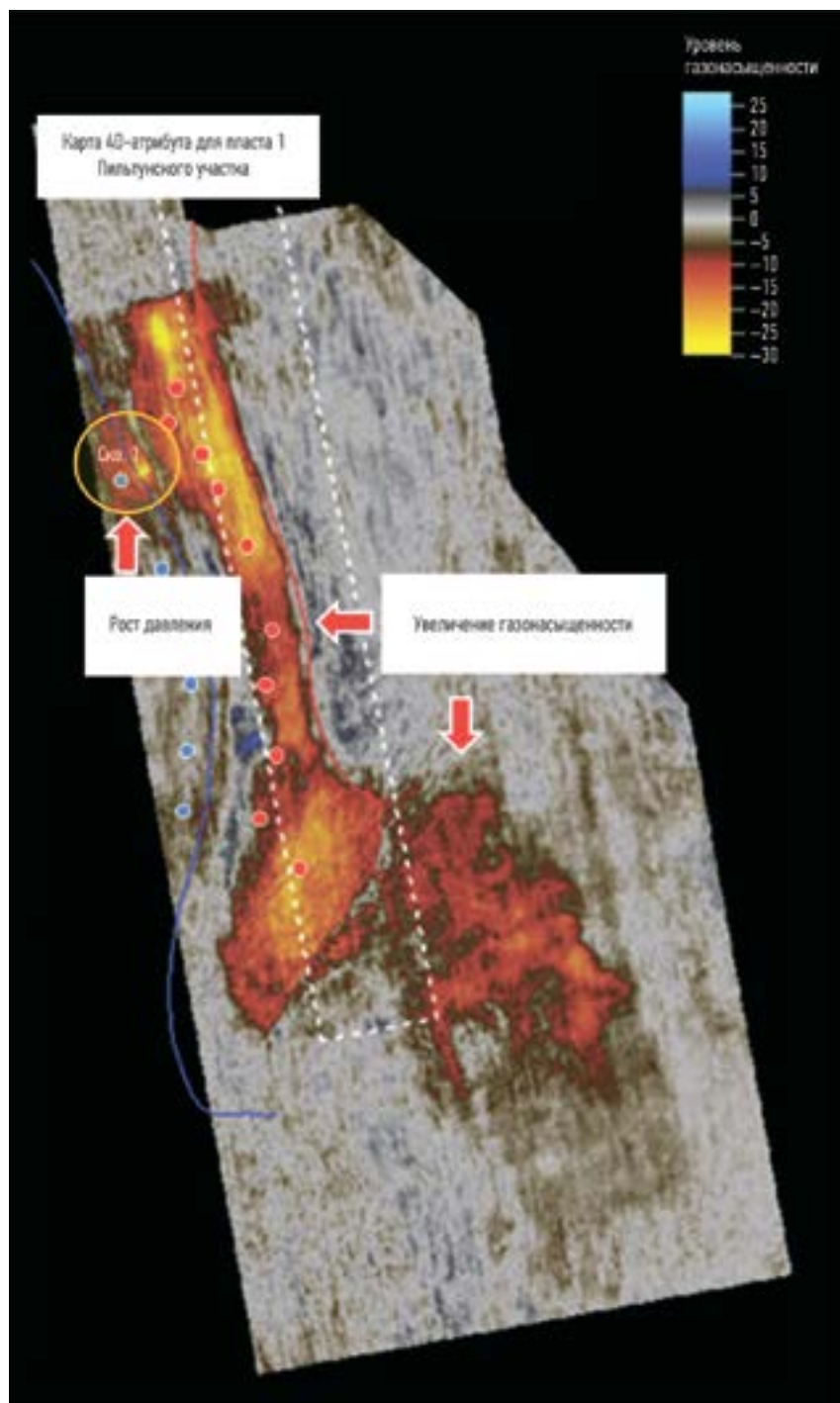


Рис. 6. Карта 4D-атрибута для пласта 1 Пильтунского участка

среды, техники безопасности. В зависимости от этапа разработки меняется и характер влияния 4D-результатов. Так, в начале эксплуатации вклад метода в большей степени выражен в увеличении извлекаемых запасов и интенсификации отборов, тогда как со временем фокус смещается на безопасность разработки, что подтверждают

результаты сейсмомониторинга Пильтун-Астохского месторождения.

Первая съемка, проведенная в 2010 г. на Астохском участке, позволила оконтурить фронт продвижения воды от нагнетательных скважин (на рис. 5 приведена карта 4D-атрибута с пояснениями, описывающими основные

выводы). Полученный результат в значительной мере отличался от прогноза, сделанного на основе гидродинамического моделирования. В особенности это касается северо-западной части площади, где два фронта заводнения смыкаются в сводовой части, формируя неохваченный участок. Таким образом, по результатам 4D-съемки была запланирована и пробурена дополнительная добывающая скважина. Подобным способом на основе 4D-результатов за 2015 г. оптимизировали цели для одной добывающей и двух нагнетательных скважин. Кроме того, данные 2015 г. привлечены для анализа целостности пласта-покрышки. Результаты интерпретации помогли подтвердить безопасность закачки двух нагнетательных скважин, что, в свою очередь, позволило сохранить закачку на высоком уровне и обеспечить необходимую поддержку пластового давления.

Важную роль 4D-данные играют в мониторинге нагнетательных скважин и на Пильтунском участке. В этой части месторождения в силу низких фильтрационно-емкостных свойств коллектора ниже водонефтяного контакта закачка воды производится под высоким давлением и требует дополнительного контроля. Анализ карт 4D-атрибутов и разрезов через куб разницы позволяет оконтурить вблизи скважин зоны, характеризующиеся повышенными давлениями, для последующего регулирования режимов закачки и оптимизации заводнения пласта (рис. 6).

В настоящий момент на Лунском НГКМ выполнен один этап 4D-мониторинга, который внес существенный вклад в понимание процессов, происходящих в продуктивных пластах, и позволил уточнить данные о продвижении воды в разных пластах (рис. 7). До проведения 4D-съемки предполагалось, что поддержка водоносного горизонта не сбалансирована и значительно сильнее на западе. Однако анализ 4D-данных наряду

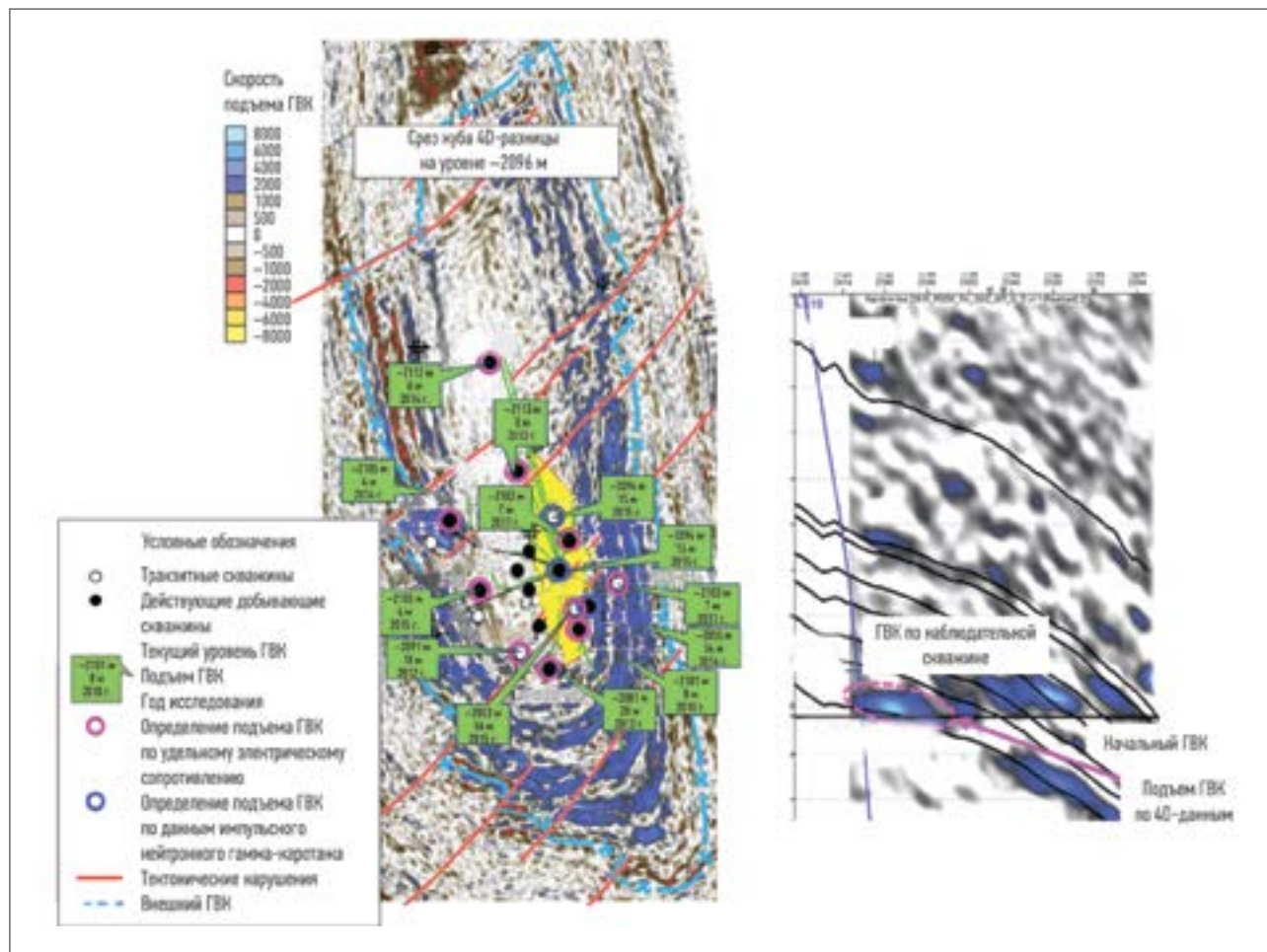


Рис. 7. Уточнение скорости подъема газовой контактной (ГВК) по результатам интерпретации 4D-данных

с параметрами давлений и добычи подтвердил отсутствие ожидаемой разницы, что позволило уточнить гидродинамическую модель и в значительной степени повысило точность прогноза. В свою очередь это способствовало оптимизации планов по бурению заполняющих скважин и боковых стволов. Эффект от предложенных мер отразился на увеличении продолжительности рентабельной добычи на 3–3,5 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейсмический 4D-мониторинг получил широкое распространение за рубежом. Согласно опубликованным данным его результаты позволяют нефтедобывающим компаниям определять зоны локализации остаточных запасов углеводородов, а также снижать долю неопределенностей при выборе оптимального варианта размещения

проектных скважин. В России же проводимый на Лунском и Пильтун-Астохском месторождениях 4D-сейсмомониторинг стал первым и до недавнего времени уникальным примером подобных исследований.

Успешный опыт «Сахалин Энерджи» подтверждает высокий потенциал 4D-метода в качестве инструмента контроля за разработкой месторождений. На основе полученных результатов специалистам компании удалось определить несколько новых целей для уплотняющего бурения, оптимизировать планы, оценить эффективность и безопасность закачки, а также в значительной степени уточнить статические и гидродинамические модели месторождений.

«Сахалин Энерджи» планирует продолжить сейсмический мониторинг. Кроме этого, распро-

страня полезный накопленный опыт, компания инициировала совместно с экспертной группой Комиссии по запасам полезных ископаемых разработку методологии 4D-сейсмомониторинга офшорных месторождений. ■



**«Сахалин Энерджи
Инвестмент Компани Лтд.»**
693020, Россия,
г. Южно-Сахалинск,
ул. Дзержинского, д. 35
Тел.: +7 (4242) 66-20-00
Факс: +7 (4242) 66-28-01
E-mail: ask@sakhalinenergy.ru
www.sakhalinenergy.ru