

Анализ амплитудно-частотных характеристик упругих волн, распространяющихся в тонких пластах, насыщенных различными флюидами (на основании данных 4Д сейсмического мониторинга, результатов математического и физического моделирования)

■ Лекомцев А.В., Подбережный М.Ю.

Аннотация: сейсмическое разрешение определяет минимальную толщину слоя или расстояние между объектами, которые можно раздельно зарегистрировать. При работе с 4Д-данными это особенно важно, так как изменения в пластах часто носят локальный характер и могут быть незаметны при низком разрешении. В представленной работе, проводится анализ амплитудных и частотных характеристик в зависимости от насыщенности на основе реальных 4Д сейсмических данных, результатов математического и физического моделирования. Показано, что даже при толщине интервала меньше $\lambda/4$ (где λ длина волны), наблюдаются изменения частотных характеристик спектров сигналов, которые требуют внимательного исследования и могут служить дополнительными атрибутами анализа 4Д сейсмических данных. Делаются выводы о необходимости дальнейших исследований и их направленности, которые могут оказать существенное влияние на прогнозирование зон развития коллекторов, их типов насыщения и изучения 4Д-эффектов, связанных с изменением насыщения резервуара в процессе разработки.

Ключевые слова: амплитудно-частотные характеристики, спектр Фурье, 3Д/4Д сейсморазведка, моделирование.

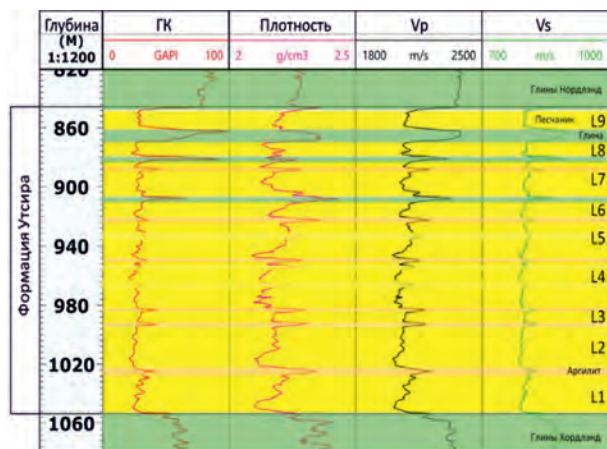
Введение

4Д сейсморазведка (сейсмомониторинг) предполагает повторные 3Д-съемки одного и того же участка с целью отслеживания изменений в пластах во времени [1], при этом изменение динамических характеристик, например, продольной сейсмической волны обусловлено комплексным влиянием следующих геологических параметров: мощностью пласта, пористостью, газонасыщенностью и пластовым давлением. Основной задачей интерпретатора является определение основного параметра и на основании этого построение интерпретационного алгоритма, причем необходимо корректно оценивать пределы разрешающей способности и неопределенностей, которые он может в себе содержать. В предыдущих работах авторами использовались следующие методы анализа сейсмических атрибу-

тов: AVO-анализа, 4Д-инверсия и петроупругое моделирование [2]. В данной работе проводится анализ амплитудно-частотных характеристик упругих волн в зависимости от геологических параметров.

К проектам где выполняется 4Д сейсмомониторинг относится и объект Слейпнир в Северном море. На данном объекте с 1994 по 2010 гг. проводилась закачка CO_2 в терригенные отложения миоцена. Закачка велась через единственную скважину, пробуренную в нижний (L1) пласт песчаников формации Утсира (Рис. 1). Ранее авторами было показано [2], что постепенно диоксид углерода поднимается по разрезу вверх накапливаясь в пластах L1-L9 формируя многоярусный плюм при общем объеме закачки 15.5 млн тонн (на конец 2010 г.).

Область исследования над точкой закачки CO_2 в формацию Утсира полнос-



▲ Рис. 1. Планшет ГИС вдоль ствола скважины объекта Слейпнир.

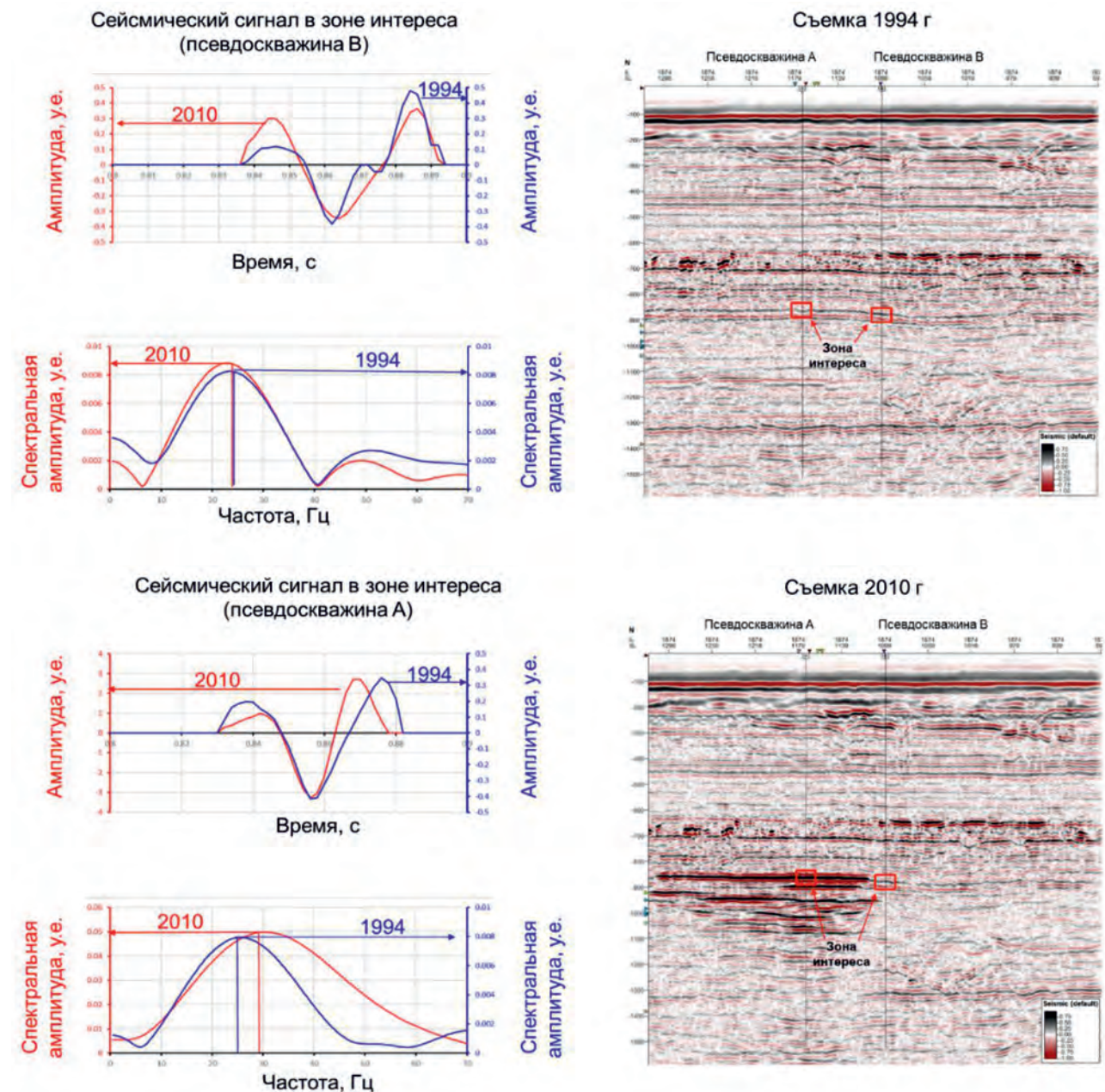
тью покрыта сейсмической съёмкой 3Д МОГТ объёмом в 300 км² в 1994 г. Эти данные получены до начала разработки и являются базовыми для последующих мониторинговых съёмок 4Д, которые выполнялись в 1994, 1999, 2001, 2006, 2008, 2010 г.

Для дальнейшего анализа будем использовать результаты съёмок 1994 и 2010 года. Изначально водонасыщение слоёв песчаников и аргиллитов формации Утсира выделяемые по ГИС плохо выделяются на первоначальных временных разрезах МОГТ, однако к 2010 г. в связи с накоплением в них CO₂ и изменению упругих характеристик на временных сейсмических разрезах выделяются яркие амплитудные аномалии. Наиболее интенсивная и распространённая аномалия регистрируется в верхнем пласте-песчанике L9, имеющего мощность порядка 15 м. Для анализа волновых форм выделим на 3Д съёмках 1994 и 2010 гг. две зоны (зону закачки CO₂ и зону, не затронутую влиянием закачки) и пересечем их псевдоскважинами А и В соответственно (рис. 2). В псевдоскважинах выделим сейсмические сигналы соответствующие пласту L9. Псевдоскважина В контролирует амплитуды и частоты сигналов до начала закачки в 1994 г. и на момент её окончания в 2010 г. Анализ

сигналов показывает сохранение амплитуд и частот в водонасыщенном пласте L9. Псевдоскважина А отслеживает изменение сигналов над точкой закачки CO₂. Анализ сигналов демонстрирует увеличение амплитуды сигнала в изначально водонасыщенном пласте L9 при его насыщении CO₂, при этом отмечается смещение спектральных частот в сторону высоких значений. Таким образом изменение АЧХ (амплитудно-частотных характеристик) сейсмических сигналов является диагностическим признаком для контроля насыщенности.

Увеличение амплитуд – ожидаемой эффект в следствие увеличения коэффициентов отражения при замещении воды на CO₂. Появление высокочастотных составляющих при отражении продольной волны от газонасыщенного пласта является скорее нестандартным явлением и может быть обусловлено комплексом факторов: тюнинг-эффектом, рассеянием/поглощением волн, изменением акустических свойств среды, эффектом пузырькового резонанса и нелинейными процессами.

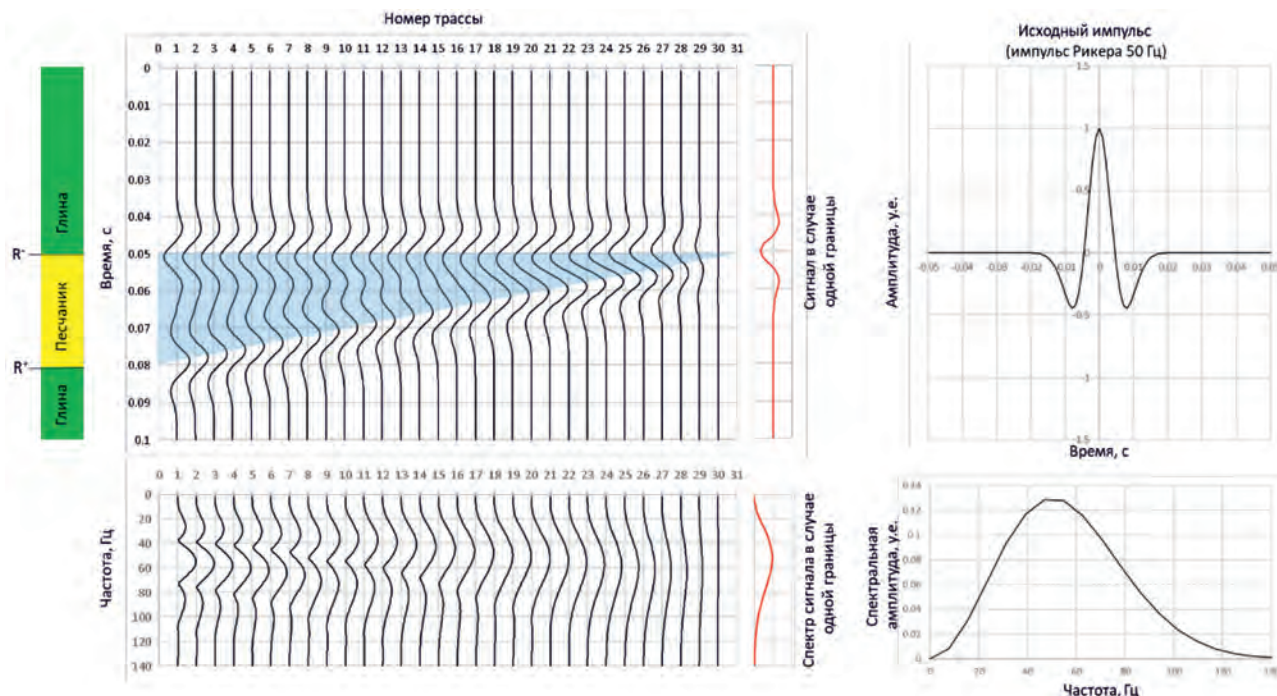
Газонасыщенные породы имеют аномально низкую акустическую жёсткость из-за уменьшения плотности породы и снижения скорости продольных волн в газе. Это создаёт резкий контраст с окружающими породами, что способствует усилению отражения и может приводить к генерации дополнительных частот при взаимодействии волны с границей. Кроме того, в газонасыщенных средах коэффициент сжимаемости примерно в 10-15 раз больше, чем в насыщенных жидкостью средах. Это влияет на дисперсию и затухание сейсмических волн, что может проявляться в усилении амплитуд и появлении высокочастотных составляющих. Кроме того, при падении сейсмической волны на



▲ Рис. 2. Сейсмические разрезы, сигналы и их амплитудно-частотные спектры.

тонкий пласт возникают два отражения: от кровли и подошвы - тюнинг-эффект. Если время задержки между амплитудами близко к половине периода волны, возникает конструктивная интерференция - амплитуда суммарного сигнала усиливается, а частота увеличивается. Тонкий пласт работает как резонатор усиливая определенные частоты. При максимальной интерференции частота волны определяется зависимостью от скорости волны V_p и мощности пласта h как $f \approx V_p / 4h$.

Одновременный анализ амплитудных и частотных характеристик отраженных волн должен помочь разделять влияние геологических параметров и выявлять наиболее значимый параметр. Корректность данного утверждения подтверждена исследованиями многих авторов. Спектральная декомпозиция позволила выявить амплитуды на характерных частотах для терригенных отложений Западной Сибири и на основании этого получить связь амплитуд с мощностью пластов ачимовских отложений [3]. Дан-



▲ Рис. 3. Модель клина (волновое поле, спектры сигналов, параметры импульса).

ные AVO-анализа в сочетании с данными спектральной декомпозиции волнового поля позволили скорректировать комплексную оценку ФЕС выявленных в Северном море аномалий с учетом наблюдаемых частотных зависимостей [4].

Математическое моделирование

Наиболее подходящим инструментом для моделирования волнового поля и оценке изменений АЧХ сигналов в зависимости от мощности пласта и его насыщенности является модель клина.

На основе данных ГИС скважины объекта Слейпнир (рис. 1) создадим модели трёхслойной среды: глина-песчаник-глина с соответствующими упругими характеристиками в зависимости от литологии и типа флюида, насыщающего песчаник. Параметры моделей показаны на рис. 3, при этом мощность песчаника изменяется от максимума до нуля.

Моделирование синтетической сейсмограммы проводится путем свёртки коэффициентов отражения с сейсмическим импульсом - вейвлетом Рикера

наиболее близкому к импульсу, извлеченному из сейсмограмм 3Д: $s(t)=w(t)*r(t)$, где $s(t)$ -синтетическая трасса, $w(t)$ -сейсмический импульс, $R(t)$ -коэффициенты отражения. Частота дискретизации сигнала во временной области составляет 0.001 с, что при 2048 отсчетах соответствует дискретизации в частотной области 1 Гц. На рис. 4 показаны рассчитанные синтетические сейсмограммы и их амплитудно-частотные спектры в случае выклинивающегося пласта песчаника 100% насыщенного CO_2 и сейсмического импульса частотой 50 Гц (длина импульса составляет 0.1 с., амплитуда 1 у.е.).

С помощью модели клина возможно оценить, как изменяются амплитудно-частотные характеристики сейсмического отклика, отраженного от верхней границы глина-песчаник с учетом интерференции с импульсом, отраженным от нижней границы песчаник-глина. Важно отметить что модель клина это сверточная модель, не учитывающая переотражения и затухание волн, однако в случае тонкого слоя простая интерференцион-

ная сверточная модель достаточно полно описывает сейсмический сигнал.

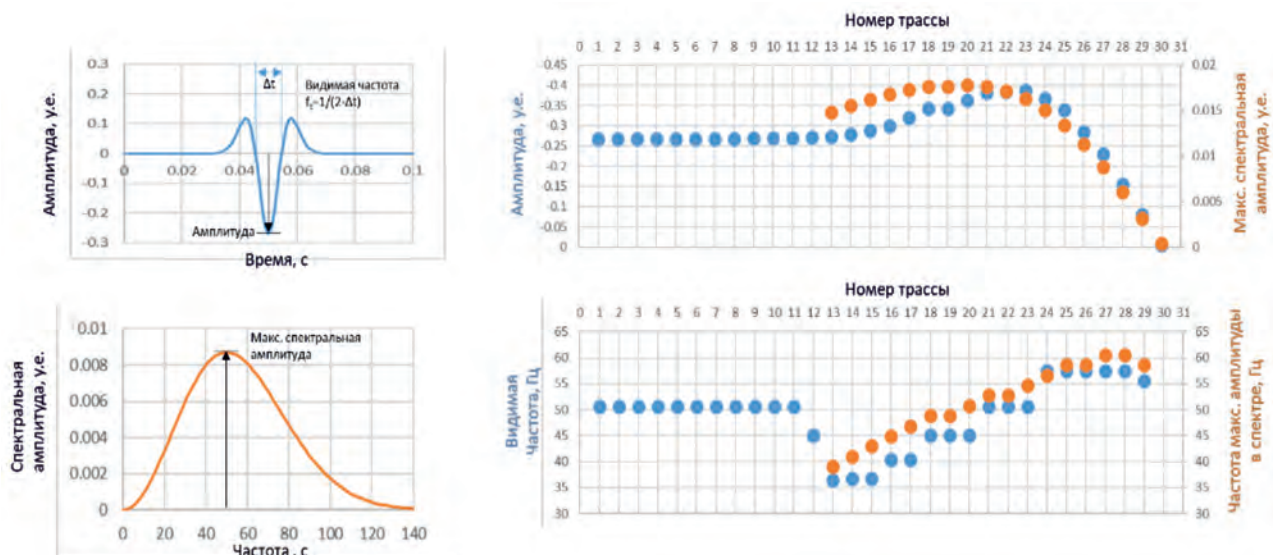
Зависимость амплитуд и частот от мощности слоя имеет квадратичную зависимость с выходом на асимптоту (рис. 4). Спектры полного сигнала полученные путем преобразования Фурье на трассах с 1 по 19 подвержены влиянию собственных частот клина [5] и отличаются от видимой частоты сигнала на верхней отражающей границе. Максимальные частоты спектров сигналов трасс 20-29 совпадают с видимыми частотами сигналов на верхней отражающей границе, а максимальная амплитуда спектра характеризует энергетическую составляющую сигнала и коррелирует с амплитудой экстремума сигнала во временной области. При этом на трассах 20-29 отмечается увеличение частот вследствие интерференции на величину порядка 10 Гц при частоте импульса 50 Гц. Результаты моделирования соответствуют общеизвестным исследованиям [3, 6]. Следует отметить, что в следствии квадратичное зависимости амплитуды от мощности слоя одному значению амплитуды может соответствовать два значения мощности. Однако данную неопределенность

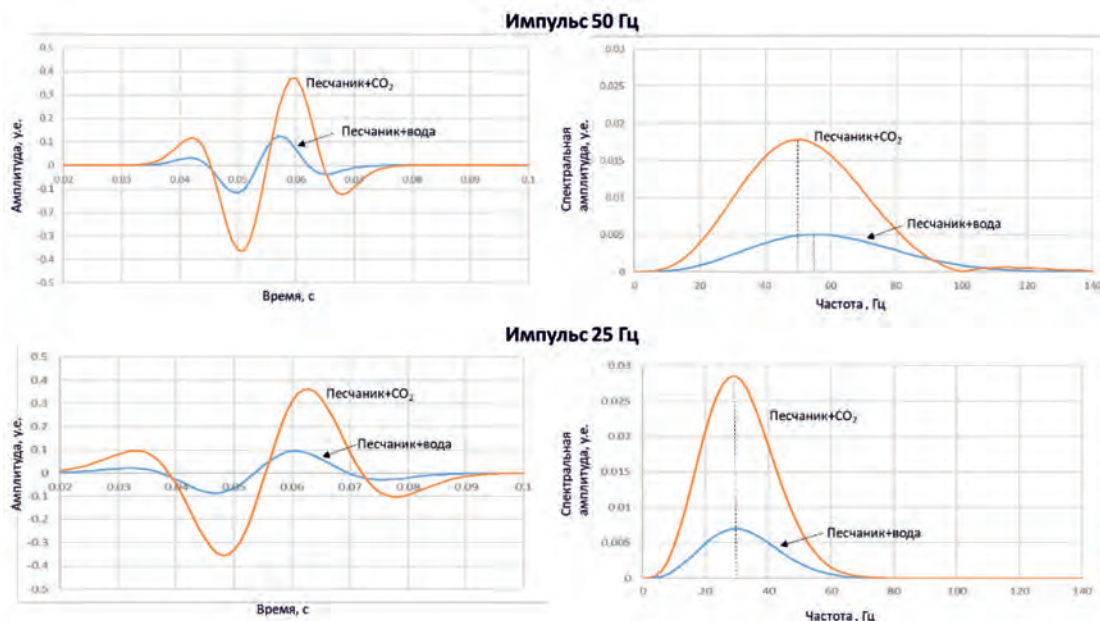
возможно уменьшить если привлечь данные о частотах. Несмотря на то что частота импульса 50 Гц, частота сигнала в следствии интерференции варьируется в пределах 65-35 Гц и меньшей мощности будет соответствовать меньшая частота. Неопределенность, связанная с квадратичной зависимостью частоты от мощности слоя, начинает проявляется на трассах 28-30 что будет соответствовать очень тонкому пласту.

В дальнейшем для анализа будем использовать параметры амплитудно-частотного спектра. Как было показано на рис. 2 частоты реальных сейсмических сигналов имеют максимум на 25-30 Гц поэтому при моделировании используем импульсы с двумя частотами 50 Гц и 25 Гц. Имея ввиду что пятидесяти герцовый импульс будет более чувствительным к изменениям упругих характеристик по сравнению с 25 Гц, но при этом двадцати пяти герцовый импульс более соответствует реальному сейсмическому.

Смоделируем сигналы для слоя песчаника (L9) мощностью 15 м насыщенного водой и насыщенного CO_2 (рис. 5). При замещении воды на CO_2 изменяются скорости распространения волн данным

▼ Рис. 4. Амплитудные и частотные характеристики сигналов для модели клина в зависимости от номера трассы (мощности пласта).



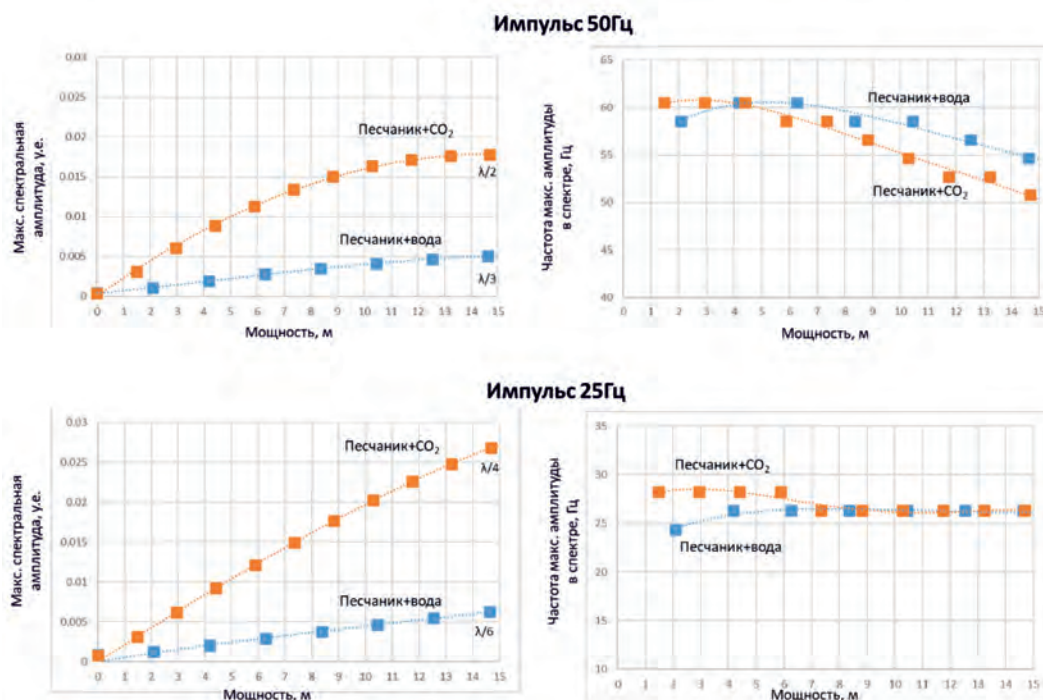


▲ Рис. 5. Сигналы и амплитудно-частотные характеристики сигналов для пласта мощность 15 м насыщенного водой и CO_2 .

пласте, т.е. время регистрации экстремума импульса, отраженного от нижней границы песчаник-глина будет увеличиваться. Анализ амплитудно-частотных спектров демонстрирует уменьшение максимальной амплитуды спектра и уменьшение частоты сигнала. Данные эффекты основаны только на интерференции без учета дисперсии и затухания волн.

Анализ амплитудно-частотных характеристик сигналов для тонких (менее 15 м) пластов различной мощности и типа флюида демонстрируют высокую чувствительность амплитуд к мощности пласта и типу флюида (рис. 6). При этом отмечается различие в частотах спектра сигнала (импульс 50 Гц) для пластов мощностью более 6 м, характеризующе-

▲ Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики сигналов для пластов различной мощностью насыщенных водой и CO_2 .



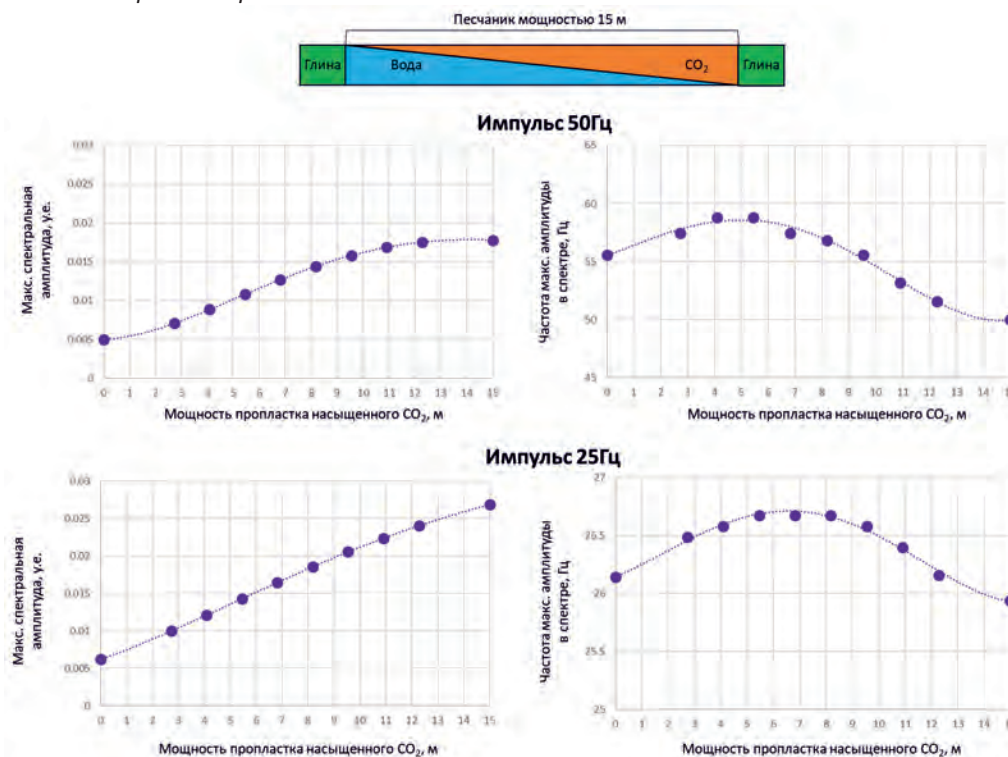
еся уменьшением частот при замещении воды на CO_2 . Для импульса 25 Гц изменение частотной характеристики для пластов мощностью более 6 м не отмечается. Для импульсов 25 Гц и 50 Гц отмечается увеличение частот в пластах мощностью менее 8 м при замещении воды диоксидом углерода. Мощности менее 6 м ниже предела разрешения сейсморазведки ($\lambda/4$), однако в случае высокого отношения сигнал/помеха и газонасыщенных пластов существует принципиальная возможность их выделения на основе анализа изменений амплитуд и частот, особенно в случае 4Д мониторинга при смене типа флюида.

Тем не менее объяснить увеличение частоты в случае замещения воды на CO_2 отмеченное при анализе реальных данных 4Д сейсмомониторинга (импульс 25 Гц, мощность пласта 15 м) приведенными выше результатами моделирования не удалось. Однако характер изменения частот для пластов мощностью

менее 6 м приводит к мысли о том, что дополнительная однородность внутри слоя мощностью более 6 м может привести к увеличению частоты. Смоделируем такую ситуацию путем введения дополнительной границы раздела вода- CO_2 внутри пласта мощностью 15 м, увеличим дискретизацию в временной области до 4096 отсчетов. Четырехслойная модель и результаты расчетов, полученные с использованием данной модели приведены на рис. 7. Результаты моделирования демонстрируют увеличение частоты сигнала при появлении слоя, насыщенного CO_2 в и росте его мощности до 5-8 м. Ожидается, что данный эффект имеет большую амплитуду изменений для импульса частотой 50 Гц, при этом частота самого сигнала выше 50 Гц вследствие интерференционных эффектов. Дальнейшее возрастание мощности пропластка, насыщенного CO_2 , с 8 до 15 м приводит к уменьшению частот.

Результаты математического модели-

▼ Рис. 7. Четырехслойная модель среды, амплитудно-частотные характеристики сигналов для пропластков различной мощности насыщенных водой и CO_2 при сохранении общей мощности слоя песчаника 15 м.



рования продемонстрировали принципиальную возможность существования эффекта возрастания частоты сигнала отраженного от границы тонкого слоя при замещении воды на CO_2 основанного только на сверточной модели и интерференции сигналов. Однако амплитуда изменения частот для импульса 25 Гц мала и не соответствует наблюдаемым данным объекта Слейпнир. Следовательно, возрастание частот для данного объекта должно описываться другими не интерференционными механизмами типа: рассеяния/поглощения/дисперсии волн, эффектом пузырькового резонанса, нелинейными процессами. Дальнейшие исследования были направлены на физическое моделирование описанных эффектов.

Физическое моделирование

Одномерные физические модели (рис. 8) представляли собой водонасыщенные рыхлосвязанные среды, размещенные в цилиндрической оболочке (2) диаметром 4 см и длиной 60 см. Толщина стенки полимерной оболочки составляла 50 мкм.

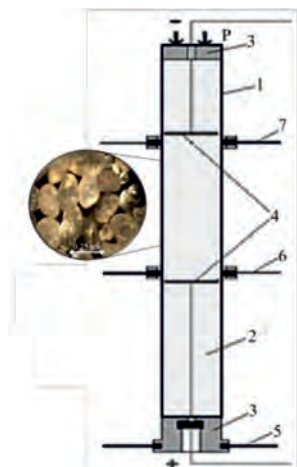
Торцы оболочки герметизированы водонепроницаемыми пробками (3), через которые введены в модель элек-

троды (4), изготовленные из химически устойчивых стержней. Излучатель упругих волн (5) располагается на одном из концов оболочки и представляет собой группу из четырех пьезокерамических биморфных элементов, расположенных равномерно по окружности и работающих синфазно. Приемники (6, 7) - аналогичны излучателю. Две пары закреплены на поверхности оболочки на расстоянии 25 см от излучателя с шагом 15 см. Приемники располагались между электродами, на расстоянии 1 см от соответствующего электрода.

Конструкции элементов излучателя и приемников выполнены таким образом, чтобы их колебания были направлены вдоль оси стержня, в этом случае генерируются прямые продольные. Модель геологической среды изготовлена из песка фракцией 0.5 - 0.25 мм (пористостью 36 %) и насыщена пресной водой. В порах присутствует небольшой процент заземленного воздуха. Скорость Р-волны составляет 1560 м/с при длине волны 1 м, область исследования составляет четвертую часть от длины волны.

Для создания газонасыщенности через модель пропускался электрический ток прямой и затем обратной полярности. В результате процесса электроли-

▼ Рис. 8. Схема экспериментальной установки для одномерного физического моделирования.



- 1 - Цилиндрическая оболочка
- 2 - Песок (фракцией 0.5 - 0.25 мм) насыщенный пресной водой и нагруженный постоянной силой $P=50$ Н
- 3 - Изолирующие пробки
- 4 - Электроды
- 5 - Акустический излучатель
- 6 - Ближний (первый) акустический приемник
- 7 - Дальний (второй) акустический приемник

за на положительном электроде выделяется кислород на отрицательном водород. На основании законов Фарадея объем выделившегося газа равен:

$$V_g^{эл} [л] = \frac{It}{FZ} \cdot V_{газа}^{моль} = \frac{It}{FZ} \cdot 22.4 л$$

где $F = 9.65 \cdot 10^4$ Кл/моль – постоянная Фарадея, Z - валентность химического элемента.

Для исследуемого объема (между электродами) среды 190 см^3 и пористостью 36 % пропускание тока силой 80 мА в течение 100 с приведет к выделению на катоде порядка 2 см^3 водорода, что составит 3 % порового объема.

В эксперименте регистрировалось акустическое волновое поле через каждые 10 с, при общей продолжительности сеанса 500 с. В течение сеанса электрический ток периодически выключался, и менялась его полярность.

Представлены фрагменты волновых полей продольных волн. Показаны первый и второй каналы с выделенными в области первых вступлений положительными экстремумами, которым соответствуют функции времен вступле-

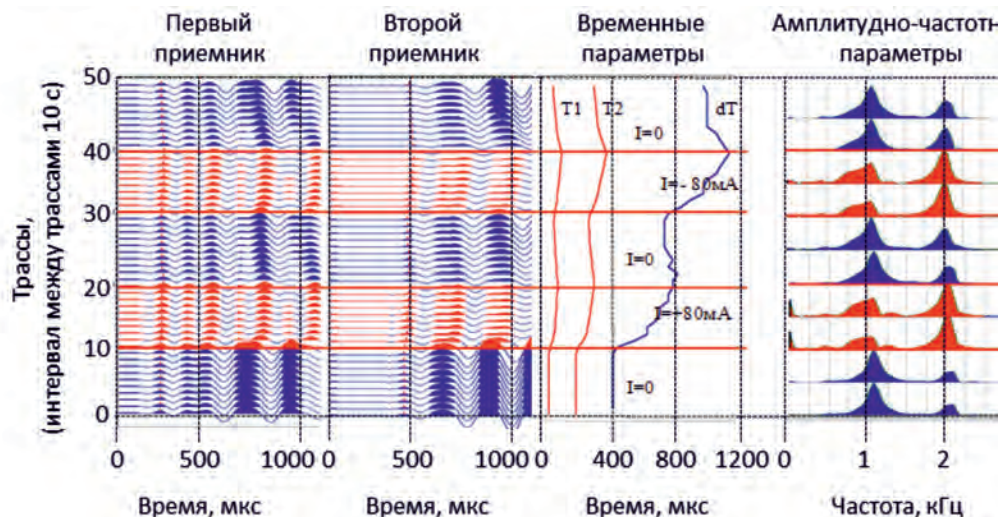
ния $T1$ и $T2$, кривые $dT=T2-T1$ интервального времени (кривая искусственно сдвинута вправо).

На данных рисунках нижние десять трасс отвечают началу эксперимента, когда электрический ток был равен нулю. Следующие 10 трасс показывают изменение записи при действии тока $I = 80 \text{ мА}$ и т.д.

На рисунках эти области выделены горизонтальными линиями. Для выделенных областей показаны характерные амплитудные спектры (АЧХ) двух каналов. Изменения упругих параметров накапливаются пропорционально времени t действия и величине силы тока I , т.е. пропорциональны количеству электричества $q=I \cdot t$. В проведенных экспериментах за время действия тока величиной 80 мА в течение 100 секунд скорость Р-волн уменьшается на (5 - 8) %, амплитуды уменьшаются на (12 - 25) %, затухание меняется на 10 %, видимые периоды на (10 - 15) %. Низкочастотный пик амплитудно-частотного спектра

Р-волны при действии электрического тока (насыщении среды газом) становится меньше высокочастотного пика в 2

▼ Рис. 9. Фрагменты волнового поля, временные параметры продольной волны в модели песка и АЧХ продольной волны в модели песка, насыщенного пресным раствором. Волновые поля на втором приемнике представлен с усилением в 2 раза большим, кривая dT интервального времени искусственно сдвинута вправо.



раза, происходит обогащение спектра высокими частотами. Для поперечной волны, данная тенденция сохраняется.

Наиболее вероятный механизм наблюдаемого увеличения высокочастотной составляющей упругой волны является эффект пузырькового резонанса. Возможно аналогичный эффект вызвал сдвиг частот и в 4Д сейсмомониторинге.

Выводы

- Отмечен эффект увеличения амплитуды и частоты сейсмического сигнала на основании анализа данных 4Д сейсмического мониторинга объекта Слейпнир при закачке CO₂ в изначально водонасыщенный песчаный пласт мощностью 15 м.

- Продемонстрирован возможный интерференционный механизм увеличения частот путем расчетов с использованием сверточной модели. Амплитуда изменений зависит от частоты импульсов и увеличивается с увеличением частоты. Однако изменения частот малы по сравнению с результатами анализа данных 4Д сейсмомониторинга.

- Сверточная модель не учитывает переотражения и дисперсию сейсмических волн при этом хорошо воспроизводит изменения амплитудных характеристики в случае тонких пластов, насыщенных различными флюидами.

- Выполнены физические эксперименты, подтверждающие эффект увеличения частот сигналов упругих волн при появлении газа в изначально водонасыщенной пористой среде. Наиболее вероятный механизм - пузырьковый резонанс.

- Выявленные и описанные эффекты могут служить диагностическими признаками для определения границ вода-газ в тонких пластах, что наиболее применимо для анализа данных 4Д сейсмомониторинга.

- Для определения основополагающих механизмов уменьшения частот при изменении типа пластового флюида необходимы дальнейшие исследования и проведение полноволнового моделирования.

Литература

1. Ампилов Ю.П., Горбачев С.В. Сейсморазведка 4D в России: опыт, проблемы, перспективы // Геология и геофизика, 2025, №7, с. 908-9021.

2. Лекомцев А.В., Подбережный М.Ю. Оценка чувствительности 3D/4D AVO-анализа и 3D/4D инверсии на примере объекта Слейпнир // Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. №4. С. 19-28.

3. Volkov R.P., Volkov D.S., Kozhevnikov G.S. From qualitative interpretation to quantitative analysis: Prediction of properties of geological bodies by using the spectral decomposition attribute – Case study of Achimov turbidity system in West-Siberia// SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, 26–29 October 2020. Paper SPE 202030-MS. 31 p.

4. Loizou, Nick & Chen, Shuangquan. The application and value of AVO and spectral decomposition for derisking Palaeogene prospects in the UK North Sea. First Break. 2012. V.30. №5. Pp.47-56.

5. Гурвич И.И. Анализ отражений от тонких пластов // Прикладная геофизика. 1956. Вып. 15. С. 23–30.

6. Косташук Д.И., Митрофанов Г.М. Модельные эксперименты для выявления зависимостей сейсмических атрибутов от характеристик коллектора // Геофизические технологии. 2025. № 1. С. 59-77.