

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 Нефтегазовое дело
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Определение сложности месторождения для оценки начальных геологических запасов (STOIP) в зависимости от обстановки осадконакопления

УДК 553.98.044

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ТМ71	Клименко Ника Валерьевна		19.08.2019

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Чернова О.С.	д.г-м.н.		19.08.2019

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведущий ЛГ	Коношонкин Д.В.			19.08.2019
Заведущая ЛНД	Фофанова Е.А.			19.08.2019

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Ишков О.Ю.	Ph.D		19.08.2019

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Белозеров В.Б.	д.г-м.н.		19.08.2019

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Чернова О.С.	д.г-м.н.		19.08.2019

Томск – 2019 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 Нефтегазовое дело
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ О.С. Чернова

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
2ТМ71	Клименко Нике Валерьевне

Тема работы:

Определение сложности месторождения для оценки начальных геологических запасов (СТОИР) в зависимости от обстановки осадконакопления

Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ №7340/с от 19.07.02019
-------------------------------------	-------------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	19.08.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Работа посвящена оценке уверенности в геологических запасах (СТОИР) с учетом сложности и изученности месторождения. Целью данной работы является рассмотрение нескольких синтетических кейсов для оценки влияния сложности обстановки осадконакопления. Подход, основанный на построении синтетических кейсов, предлагается, поскольку открывается возможность точной оценки истинных геологических запасов для конкретного кейса.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ литературы Анализ имеющихся подходов по определению гетерогенности архитектуры резервуара Создание критерия неопределенности системы Создание синтетических геологических моделей Анализ снижения неопределенности месторождения и уверенности в геологических запасах при бурении новых скважин</p>
--	--

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Обзорные карты, схемы, графики, таблицы</p>
--	--

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
---	--

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Ишков О.Ю., профессор
Социальная ответственность	Белозеров В.Б., профессор
Гетерогенность архитектуры резервуара	Коношонкин Д.В., инженер Фофанова Е.А., инженер

<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>
<p>Гетерогенность архитектуры резервуара</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>17.06.2019</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Чернова О.С.	д. г.-м. н.		17.06.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ТМ71	Клименко Ника Валерьевна		17.06.19

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСО-
СБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
2ТМ71	Клименко Нике Валерьевне

Инженерная школа	ИШПР	Отделение	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 Нефтегазовое дело

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость ресурсов научного исследования подразумевает только использование персонального компьютера</i>
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Не использовались</i>
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Не использовалась</i>
Тема вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>Оценка экономической эффективности</i>	<i>Качественное описание возможного эффекта результата исследования на экономику компаний</i>

выдачи задания для раздела по линейному графику	17.06.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Ишков О.Ю.	Ph.D		17.06.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ТМ71	Клименко Ника Валерьевна		17.06.19

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
2ТМ71	Клименко Нике Валерьевне

Инженерная школа	ИШПР	Отделение	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 Нефтегазовое дело

ные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования)</i>	<p>Вся работа выполнялась в помещении с компьютерами с шириной 8 м, длиной 25 м. и высотой потолков 2,5 м.</p> <p>В работе произведена оценка влияния негативных факторов, возникающих в процессе бурения эксплуатационных и разведочных скважин на окружающую среду.</p>
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<p>Водный Кодекс РФ (№ 74-ФЗ от 03.06.2006 г. с изменениями на 14.07.2008 г.)</p> <p>Гигиенические требования к охране подземных вод от загрязнения. СП 2.1.5.1059- 01</p> <p>«Инструкция по предупреждению искривления вертикальных скважин. РД 39-0148052-514-86»</p> <p>«Методические указания по комплексированию и этапности выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и нефтегазовых месторождений. РД 153-39.0-109-01»</p>

ень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> - защита селитебной зоны - анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); - анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); - разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Выявление наличия и влияния вредных факторов при бурении скважин:</p> <ul style="list-style-type: none"> - мероприятия по охране атмосферного воздуха (ГОСТ 17.2.1.01-76, ГОСТ 17.2.3.02-78); - мероприятия по охране водных объектов (ГОСТ 17.1.3.05-82, ГОСТ 17.1.3.06-82, ГОСТ 17.1.3.12-86, ГОСТ 17.1.3.13-86); - охрана земель, флоры и фауны (ГОСТ 17.6.1.01-83, ГОСТ 17.5.1.01-83);
--	--

	<p>-проектные решения по уменьшению воздействия нефтепромысловых объектов на почвы (ГОСТ 17.4.1.02-83, ГОСТ 17.4.3.04-85);</p> <p>-воздействие на животный мир;</p> <p>-обращение с отходами (ГОСТ 21046-86);</p> <p>-охрана недр (ГОСТ 17.1.312-86);</p> <p>-охрана недр в процессе бурения (ГОСТ 17.4.3.02-85);</p> <p>-охрана недр в процессе эксплуатации и ликвидации скважин (СНиП 1.02.01-85, СНиП III-18-75, ГОСТ 2517-82).</p>
--	---

Тема графического материала:

<p><i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i></p>	
--	--

выдачи задания для раздела по линейному графику	17.06.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Белозёров Б.В.	д.г.-м.н.		17.06.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ТМ71	Клименко Ника Валерьевна		17.06.19

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 Нефтегазовое дело
 Уровень образования
магистр
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2018/2019 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)
--

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	19.08.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.02.2019	Анализ существующих подходов к описанию сложности архитектуры резервуара	10
15.03.2019	Создание метрики неопределенности архитектуры резервуара	25
01.04.2019	Создание синтетических геологических моделей и применение предложенной методики для оценки уверенности в геологических запасах	25
30.04.2019	Анализ полученных результатов	25
10.05.2019	Финансовый менеджмент	5
15.05.2019	Социальная ответственность	5
30.05.2019	Приложение на иностранном языке	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Белозёров В.Б.	д. г.-м. н.		17.06.2019

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Чернова О.С.	д. г.-м. н.		17.06.2019

Цели основной образовательной программы (DD)

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки (специальности)		
Р1	Применять естественнонаучные, математические, гуманитарные, экономические, инженерные, технические и глубокие профессиональные знания в области современных нефтегазовых технологий для решения прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем, соответствующих профилю подготовки	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (<i>УК-1; УК-2; УК-3, УК-4; УК-5; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-6; ПК-7; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-17; ПК-19; ПК-20; ПК-21; ПК-23</i>), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) , (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Р2	Планировать и проводить аналитические и экспериментальные исследования с использованием новейших достижений науки и техники, уметь критически оценивать результаты и делать выводы, полученные в сложных и неопределённых условиях; использовать принципы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (<i>УК-1; УК-2; УК-4; УК-6; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-12; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-22; ПК-23</i>), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) , (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Р3	Проявлять профессиональную осведомленность о передовых знаниях и открытиях в области нефтегазовых технологий с учетом передового отечественного и	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (<i>УК-1; УК-2; УК-4; УК-5; УК-6; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-6; ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-11; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-18; ПК-20; ПК-21; ПК-22; ПК-23</i>), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с тре-

	зарубежного опыта; использовать инновационный подход при разработке новых идей и методов проектирования объектов нефтегазового комплекса для решения инженерных задач развития нефтегазовых технологий, модернизации и усовершенствования нефтегазового производства	бованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Р4	Выбирать оптимальные решения в многофакторных ситуациях, владеть методами и средствами технического моделирования производственных процессов и объектов нефтегазовой отрасли; управлять технологическими процессами, обслуживать оборудование, использовать любой имеющийся арсенал технических средств, обеспечивать высокую эффективность при разработке нефтегазовых объектов	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (<i>УК-1; УК-2; УК-6; ОПК-1; ОПК-2; ПК-1; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-15; ПК-16; ПК-17; ПК-20</i>), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Р5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности; активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (<i>УК-1; УК-2; УК-3; УК-4; УК-5; УК-6; ОПК-2; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-4; ОПК-5; ПК-1; ПК-2; ПК-8; ПК-16; ПК-18; ПК-21; ПК-23</i>), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Р6	Работать эффективно в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и оперативные планы всех видов	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (<i>УК-1; УК-2; УК-3; УК-4; УК-5; УК-6; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ПК-6; ПК-11; ПК-12; ПК-13; ПК-15; ПК-23</i>), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с

	деятельности, распределять обязанности членов команды, нести ответственность за результаты работы; координировать работу групп по извлечению и совершенствованию добычи нефти, газа и газового конденсата, передавать знания через наставничество и консультирование	требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Р7	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные машины и механизмы для реализации техно-логических процессов нефтегазовой области, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-3; ОПК-1; ОПК-2; ПК-1; ПК-3; ПК-6; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-21; ПК-22), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Профиль 1 – Геолого-геофизические проблемы освоения месторождений нефти и газа		
Р8	Предлагает процедуры анализа и оценки геологических объектов по данным геолого-геофизической изученности и скважинных исследований в целях разработки программы исследований и технологических мероприятий для конкретного типа месторождений углеводородов	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1; УК-2; УК-3; УК-5; ОПК-1; ОПК-2; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-12; ПК-15; ПК-17; ПК-19; ПК-20), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Р9	Предлагать процедуры оценки эффективности промысловых работ и оптимизации работы	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1; УК-2; УК-3; УК-5; ОПК-1; ОПК-2; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-12; ПК-15; ПК-17; ПК-19; ПК-20; ПК-23), CDIO

	оборудования при добыче нефти, газа и газового конденсата, обеспечение энергоэффективности технологических процессов	Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
P10	Обеспечивать внедрение новых методов при построении геолого-геофизических моделей; материалов и нефтегазового оборудования в осложненных условиях эксплуатации нефтяных и газовых скважин	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1; УК-2; УК-4; УК-6; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-6; ПК-8; ПК-12; ПК-13; ПК-16; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-21), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)
Профиль 2. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений		
P11	Контролировать выполнение требований регламентов для обеспечения добычи нефти, газа и газового конденсата	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1; УК-2; УК-4; ОПК-1; ОПК-4; ОПК-6; ПК-1; ПК-5; ПК-6; ПК-12; ПК-15; ПК-16; ПК-18; ПК-19; ПК-23), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами) , (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений) , (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) ; (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата) , (19.021 Специалист по промысловой геологии)

<p>P12</p>	<p>Совершенствовать, разрабатывать мероприятия и/или подготавливать бизнес-предложения по технологическому процессу и технологическим мероприятиям при добыче нефти, газа и газового конденсата</p>	<p>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (<i>УК-1; УК-2; УК-3; УК-6; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-4; ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-12; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-16; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-21; ПК-22; ПК-23</i>), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами), (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений), (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам); (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата), (19.021 Специалист по промысловой геологии)</p>
<p>P13</p>	<p>Корректировать программы работ по добыче нефти, газа и газового конденсата, выбирать и принимать решения в нестандартных ситуациях, опираясь на государственные стандарты в области нефтегазодобычи</p>	<p>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (<i>УК-2; УК-3; УК-4; УК-6; ОПК-1; ОПК-2; ПК-1; ПК-3; ПК-6; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-18; ПК-19; ПК-21; ПК-22</i>), CDIO Syllabus (2.4, 2.5, 4.1, 4.2...), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: (40.178 Специалист в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами), (40.116 Специалист по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, и/или подъемных сооружений), (40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам); (19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата), (19.021 Специалист по промысловой геологии)</p>

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа включает в себя 107 страниц, 49 рисунков, 41 источник и 1 приложение.

Ключевые слова: СЛОЖНОСТЬ АРХИТЕКТУРЫ РЕЗЕРВУАРА, ГЕТЕРОГЕННОСТЬ АРХИТЕКТУРЫ РЕЗЕРВУАРА. ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ, УВЕРЕННОСТЬ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАПАСАХ, СИНТЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ.

Целью работы является создание метрики сложности архитектуры резервуара и её изученности для дальнейшего анализа связи этих параметров с уверенностью в подсчете геологических запасов.

Результатами исследования стало нахождение связи между неопределенностью системы в его численном выражении (информационной энтропии) с уверенностью в подсчете геологических запасов и уверенностью в знании морфологии резервуара. Было выяснено, что между этими параметрами существует линейная связь, что позволяет утверждать, что информационная энтропия может являться качественным показателем для оценки динамики уверенности в геологических запасах и морфологии резервуара.

Так же была найдена связь между неопределенностью (информационной энтропии) и количеством пробуренных скважин для резервуаров разной сложности архитектуры. Было найдено, что связь имеет вид логарифмической функции, что позволяет предсказать потенциальный вклад в снятие неопределенности при бурении новой скважины.

Областью применения является оценка вклада проведения геологоразведочных работ в снятие неопределенности при оценке геологических запасов.

Экономическая эффективность/значимость работы: предложенная метрика позволяет статистически оценить ценность и оправданность проведения геологоразведочных работ, что позволит увеличить эффективность принятия решений.

СПИСОК ИЗОБРАЖЕНИЙ

1	– Иерархия масштабов гетерогенности резервуара [6]	21
2	– Матрица гетерогенности архитектуры резервуара [9]	22
3	– Матрица гетерогенности архитектуры обстановок осадконакопления [9]	23
4	– Типы архитектур резервуара [10]	24
5	– Структурная карта кровли ЮВ1 на ранней стадии жизни месторождения [14]	29
6	– Структурная карта кровли ЮВ1 на этапе эксплуатационных работ [14].....	30
7	– Карта максимальных дебитов пласта ЮВ1 [14]	34
8	– Седиментологическая модель проградирующего побережья [18].....	37
9	– Архитектурная модель проградирующего побережья	38
10	– Неопределенность в величине аградационного (α) [20]	38
11	– Отложение нескольких флювиальных кос	39
12	– Отложение отдельной флювиальной косы в разрезе [22].....	40
13	– Разрез прируслового вала для случая низкопесчанистых (а) и высокопесчанистых отложений меандрирующей косы [12].....	41
14	– Карта эффективных толщин для случая низкопесчанистых (а) и высокопесчанистых отложений меандрирующей косы [12].....	41
15	– Отложения флювиальных кос меандрирующего типа при разных тектонических условиях [23]	43
16	–Отложения флювиальных кос Delft Sandstone Member, West Netherlands [23]	43
17	– Зависимость информационной энтропии от вероятности исхода события для двухбитной системы [25].....	46
18	– Карта возможного расположения геологических единиц (а), карты вероятности появления той или иной единицы (б), карта информационной энтропии всей системы (в) [25].....	49
19	– Карта возможного расположения геологических единиц (а), карта информационной энтропии всей системы до бурения скважины в ячейку С (б), карта информационной энтропии всей системы до бурения скважины в ячейку С (в) [28]	50
20	– Поведение информационной энтропии с увеличением количества стохастических реализаций [25].....	51
21	– Алгоритм кейса №1	55
22	– Алгоритм расстановки скважин для кейса №1	56
23	– Поведение информационной энтропии с увеличением количества стохастических реализаций	59

24	– Зависимость информационной энтропии систем разной архитектурной сложности от плотности сетки скважин (Кейс №1).....	60
25	– Зависимость информационной энтропии от плотности сетки скважин для резервуара мозаичного типа (Кейс №1).....	61
26	–Алгоритм кейса №2.....	63
27	– Фото обнажения Spring Canyon Mb, Book Cliffs, USA [32]	65
28	– Литостратиграфический разрез обнажения Book Cliffs.....	65
29	– Архитектурное строение парасеквенса Spring Canyon Member	66
30	– Тренировочное изображения для моделирования отложений проградирующего побережья.....	66
31	– Модель отложений проградирующего побережья в условиях доминирования волновой энергии, принятая за истинную модель	67
32	– Модель отложений речной системы меандрирующего типа, принятая за истинную модель.....	69
33	– Геологические запасы P10-P90 резервуара простой архитектуры (Кейс №3).....	71
34	– Геологические запасы P10-P90 резервуара сложной архитектуры (Кейс №3).....	71
35	– Зависимость информационной энтропии систем разной архитектурной сложности от количества скважин (Кейс №2).....	72
36	– Зависимость относительной ошибки в подсчетет геологических запасов от информационной энтропии (Кейс №2).....	73
37	– Зависимость коэффициента корретности от количества скважин (Кейс №2).....	75
38	– Зависимость коэффициента корретности от информационной энтропии (Кейс №2).....	75
39	– Алгоритм кейса №3.....	78
40	– Тренировочное изображение №1 для моделирования отложений речной системы меандрирующего типа	79
41	– Тренировочное изображение №2 для моделирования отложений речной системы меандрирующего типа	80
42	– Тренировочное изображение №3 для моделирования отложений речной системы меандрирующего типа	80
43	– Геологические запасы P10-P90 резервуара сложной архитектуры (Кейс №3).....	81
44	– Зависимость информационной энтропии систем разной архитектурной сложности от количества скважин (Кейс №3).....	82
45	– Зависимость относительной ошибки в подсчете геологических запасов от информационной энтропии (Кейс №3).....	83

- 46 – Зависимость коэффициента корреляции от информационной энтропии (Кейс №3) 84
- 47 – Зависимость информационной энтропии от количества информации (скважин).....87
- 48 – Линии тренда зависимости информационной энтропии от количества информации (скважин), построенные на основе всех данных, 4, 8 и 12 скважин88
- 49 – Зависимость информационной энтропии от стоимости геологоразведочных работ 89

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ АББРЕВИАТУР

- ГК – гамма-картаж;
- ПИМ – метод последовательного индикаторного моделирования;
- МММ – метод многоточечного моделирования.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	19
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	20
1.1. Иерархия масштабов гетерогенности резервуара	20
1.2. Гетерогенность архитектуры резервуара	21
1.2.1. Слоистый тип архитектуры резервуара	24
1.2.2. Мозаичный тип архитектуры резервуара	25
1.2.3. Лабиринтовый тип архитектуры резервуара	25
1.3. Опыт разработки Северо-Хохряковского нефтяного месторождения	28
1.4. Геологическое описание моделируемых обстановок осадконакопления	35
1.4.1. Обстановка проградирующего побережья в условиях высокой волной энергии	35
1.4.2. Обстановка речной системы меандрирующего типа	39
1.5. Информационная энтропия как мера геологической неопределенности	44
2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ НА УВЕРЕННОСТЬ В ОЦЕНКЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАПАСОВ И МОРФОЛОГИИ РЕЗЕРВУАРА.....	52
2.1. Общая методология работы.....	52
2.2. Кейс №1. Влияние архитектурной сложности резервуара на процесс его исследования.....	55
2.2.1. Цель и алгоритм кейса.....	55
2.2.2. Параметры кейса и геологических моделей	56
2.2.3. Анализ полученных результатов	59
2.3. Кейс 2. Влияние сложности архитектуры резервуара на уверенность в геологических запасах и морфологии резервуара в случае двухточечного моделирования.....	62
2.3.1. Цель и алгоритм кейса.....	62
2.3.2. – Параметры кейса	63
2.3.3. Модель проградирующего побережья в условиях высокой волновой энергии	64
2.3.4. Модель речной системы меандрирующего типа	68
2.3.5. Конструирование итерационных моделей.....	70
2.3.6. Анализ полученных результатов.....	70
2.4. Кейс 3. Влияние сложности архитектуры резервуара на уверенность в геологических запасах и морфологии резервуара в случае многоточечного моделирования.....	77
2.4.1. Цель и алгоритм кейса.....	77
2.4.2. Параметры кейса	78
2.4.3. Конструирование итерационных моделей.....	79
2.4.4. Анализ полученных результатов.....	81
3 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ	86
4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	90
4.1. Буровые работы	91

4.2.	Водная среда	92
4.3.	Обращение с отходами бурения.....	93
4.4.	Охрана недр в процессе эксплуатации скважин.....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		96
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ		97
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....		102

ВВЕДЕНИЕ

Оценка геологических запасов месторождения является одним из ключевых объектов исследования на протяжении всей жизни месторождения. Геологические запасы вычисляются по следующей формуле:

$$STOIIP = \frac{GRV * NTG * \Phi * S_{oil}}{B_{oil}} \quad (1)$$

Значение коэффициента песчаности (NTG) является одной из доминирующих характеристик резервуара, к которой значение геологических запасов, как правило, особо чувствительно по сравнению с остальными [1]. Адекватная оценка этой величины является ключевой задачей для точного подсчета геологических запасов. Согласно [2] уверенность эта оценка напрямую зависит от архитектурной сложности (или гетерогенности) резервуара. Нередки случаи, когда геологические запасы сложных архитектурных систем были переоценены в силу поспешных выводов о строении резервуара на основе недостаточного количества информации [3].

С точки зрения геостатистики причину данной проблемы можно объяснить следующим образом: чем гетерогенней система, тем больше информации нам требуется, чтобы её охарактеризовать [4]. Иначе говоря, для того, чтобы произвести адекватную оценку коэффициента песчаности или связанных с ней пропорции фаций в системе потребуется разное количество информации (количество скважин, плотности и качества сейсмических съемок и так далее) для систем разной архитектурной сложности.

В данной работе предложен универсальный инструмент для количественно анализа неопределенности системы в зависимости от сложности месторождения. Так же был проведен анализ, цель которого является определение количества информации, достаточного для уверенного предсказания геологических запасов, и был предложен способ для эффективного снятия неопределенностей в системе.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Иерархия масштабов гетерогенности резервуара

Согласно [5] для каждого из резервуаров можно выделить несколько масштабов пространственной гетерогенности, которые представляют собой иерархию, представленной на Рисунке 1.1.

На самом маленьком масштабе рассматривается гетерогенность частиц, слагающих породу. На этом масштабе морфология частиц играет ключевую роль в проницаемости коллектора, что в первую очередь влияет на фильтрационный потенциал. На микро-масштабе на емкостный потенциал резервуара будет влиять гетерогенность пористости породы и смачиваемости частиц. Причиной гетерогенности может являться сложность геометрической упаковки твердых частиц, распределения глинистого и карбонатного цемента в поровом пространстве и так далее.

На мезо-масштабе рассматривается гетерогенность седиментационных текстур внутри фаций. Изменение в размере частиц или степени цементации между соседними слоями песчаника является гетерогенностью мезо-масштаба, которая в основном влияет на фильтрационный, нежели емкостный потенциал.

Мега-масштаб гетерогенности резервуара включает в себя неоднородность пространственного расположения архитектурных элементов резервуара относительно друг друга. Архитектурные элементы (каналы, бары, прирусловые валы, пойменные отложения и так далее) выступают в роли строительных блоков резервуара. Гетерогенность резервуара мега-масштаба напрямую зависит от процентного содержания, морфологии и пространственного расположения этих элементов. Именно этот уровень гетерогенности резервуара является объектом исследования данной работы.

На последнем, гига-масштабе гетерогенности резервуара рассматривается пространственная сложность резервуара, на которую влияет характер

напластования и наличие тектонических нарушений в масштабе всего месторождения.

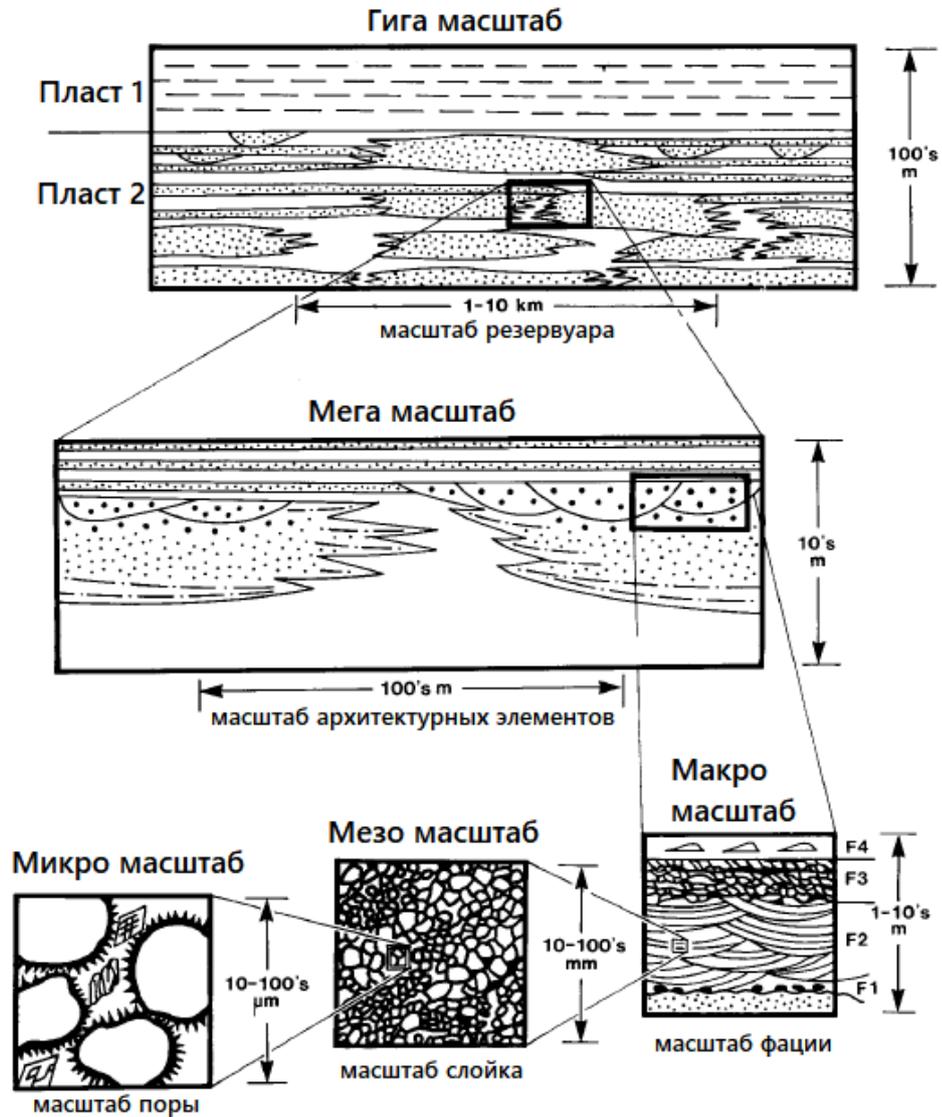


Рисунок 1.1 – Иерархия масштабов гетерогенности резервуара [6]

1.2. Гетерогенность архитектуры резервуара

Концепция архитектуры резервуара была впервые предложена Andrew Miall [7, 8]. Этот термин описывает соотношение между морфологией, размером, направлением и наложением архитектурных элементов и характеризует качественное и количественное распространение коллектора. В качестве архитектурных элементов выступают седиментационные тела, которое возможно отличить друг от друга на основе геометрии, масштабов и фа-

альных характеристик [7]. В их роли могут выступать распределительные каналы ленточной геометрии, латерально протяженные песчаные тела конусов выноса или глинистые отложения речных пойм, песчаные линзы прирусловых валов и так далее.

Согласно [9] резервуары различных обстановок осадконакопления проявляют разную степень горизонтальной и вертикальной архитектурной сложности или гетерогенности. Гетерогенность архитектуры резервуара является продуктом геологических процессов, которые сформировали осадки. Отсюда следует, что понимание этих процессов является ключевым фактором для предсказания морфологии и размеров архитектурных элементов в межскважинном пространстве. Более того, понимание геологических процессов предоставляет возможность предсказать сложность резервуара согласно матрице архитектурной гетерогенности, построенной на основе латеральной и вертикальной сложности и неоднородности (Рисунок 1.2) и связанной с определенными обстановками осадконакопления (Рисунок 1.3).

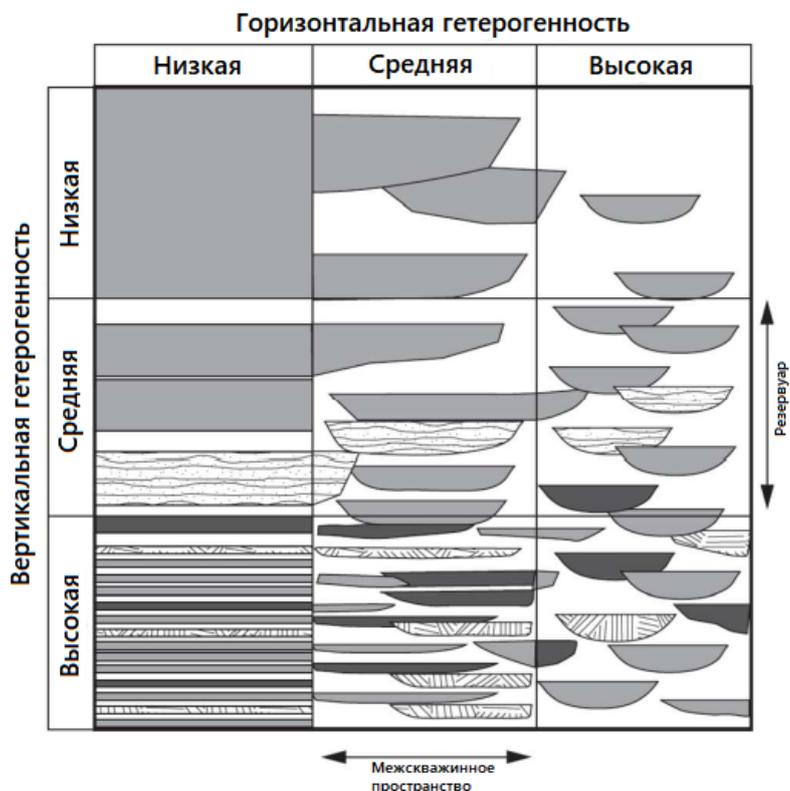


Рисунок 1.2 – Матрица гетерогенности архитектуры резервуара [9]

		Горизонтальная гетерогенность		
		Низкая	Средняя	Высокая
Вертикальная гетерогенность	Низкая	Дельта волнового типа Барьерный остров Пляж барьерного острова Пляж береговой линии	Приустьевые бары дельты флювиального типа Приливно-отливные отложения	Высокопесчанистые меандрирующие реки Эстуарии Дельты флювиального влияния
	Средняя	Эоловые отложения Дистальная зона дельты волнового влияния	Аллювиальные конусы выноса Озерная дельта Проксимальная часть дельты волнового влияния	Дельты приливно-отливного влияния Многорусловые реки
	Высокая	Дистальная зона глубоководного конуса выноса	Грубозернистые меандрирующие реки Многорусловая дельта	Высокопесчанистые дельты речного влияния Высокопесчанистые мелкозернистые меандрирующие реки

Рисунок 1.3 – Матрица гетерогенности архитектуры обстановок осадконакопления [9]

Согласно [10] для описания гетерогенности архитектуры резервуара можно отдельно выделить следующие типы архитектур (Рисунок 1.4, Таблица 1.1): 1) слойчатый тип; 2) мозаичный тип; 3) лабиринтовый тип.

Каждый из этих типов имеет свои отличительные характеристики, которые должны быть учтены как при разработке, так и при исследовании месторождения. Более того, архитектура резервуара определяет связность и непрерывность песчаных тел [11] и является индикатором для выбора подхода геомоделирования (Рисунок 1.4). Именно поэтому следует рассмотреть эти типы архитектур резервуара более подробно.

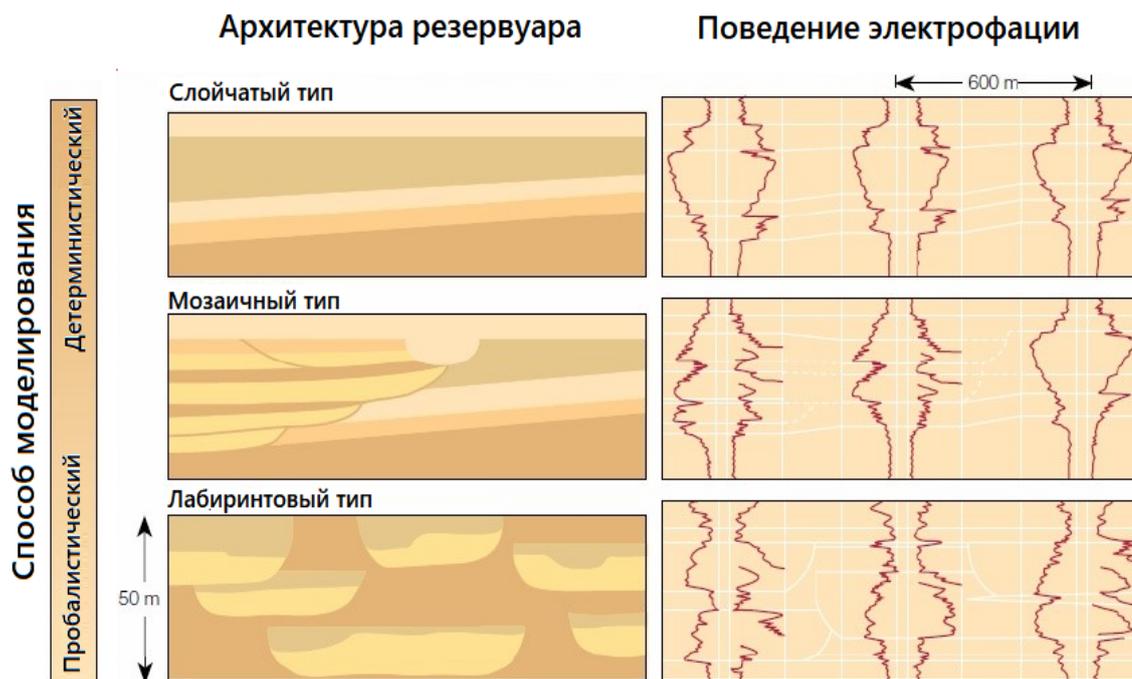


Рисунок 1.4 – Типы архитектур резервуара [10]

1.2.1. Слойчатый тип архитектуры резервуара

Резервуары слойчатого типа архитектуры состоят из либо очень латерально протяженных осадочных тел (сформировавшиеся в условиях стабильной гидродинамики), либо из серии небольших тел, плотно прилегающих друг к другу (сформировавшиеся при условиях активной латеральной миграции дистрибутивного русла). Главной характеристикой этого типа архитектуры является высокая степень латеральной сообщаемости. Песчаные тела, имеющие свои отличительные петрофизические свойства, распространены латерально на большую площадь без каких-либо сильных изменений в свойствах. Толщина песчаного тела может быть непостоянной, но меняется постепенно. Границы между песчаными телами, как правило, градационные, однако в качестве них могут выступать и фильтрационные барьеры.

Для моделирования такого типа архитектурной неоднородности будет достаточно небольшое количество скважин и детерминистический подход, который в данном случае является адекватным методом предсказания характера распространения коллектора в межскважинном пространстве.

1.2.2. Мозаичный тип архитектуры резервуара

Резервуары этого типа состоят из серий сплетенных песчаных тел небольшого размера без больших глинистых промежутков между ними. Зачастую коллектор латерально чередуется с низкопроницаемыми или непроницаемыми барьерами. Непроницаемые барьеры могут наблюдаться так же между двумя наложенными друга на друга песчаными телами. Характерной чертой данного типа архитектуры является то, что, несмотря на чередование с не-коллектором, песчаные тела имеют хорошее латеральное распространение и толщина коллектора, как правило, мощная и выдержанная.

Для моделирования такого типа архитектуры резервуара детерминистический подход может оказаться недостаточным, в особенности на ранних стадиях разработки месторождения. Модель данного типа архитектуры рекомендуется строить, используя стохастические методы моделирования. Для достоверного предсказания латерального распространения песчаников потребуется большее количество скважин, а также хорошее понимание геологических процессов, сформировавших коллектор исследуемого резервуара.

1.2.3. Лабиринтовый тип архитектуры резервуара

Лабиринтовый тип резервуара состоит из ряда изолированных групп песчаных линз, наложенных друг на друга. Отдельное песчаное тело имеет небольшой размер и ограниченное латеральное распространение. Группы песчаных тел могут быть, как полностью изолированы друг от друга, так и

соединены немошным слоем выдержанного слабопроницаемого песчаника [12].

Для точного предсказания распространения песчаных тел потребуется большое количество скважин с небольшим расстоянием между ними. Поскольку песчаники данного типа резервуара, как правило, редко коррелируются в межскважинном пространстве [13], модель этого типа архитектуры невозможно построить детерминистическим методом. Стохастический метод в данном случае является единственным методом, способным предсказать морфологию и размеры коллектора в межскважинном пространстве, однако для эффективного использования этого метода требуется хорошая осведомленность о геологических процессах, сформировавшим резервуар, и так же большее количество информации и, следовательно, больше скважин.

Таблица 1.1 –Характеристики типов архитектур резервуара [10]

Тип архитектуры резервуара	Вертикальная неоднородность	Латеральная неоднородность	Петрофизические особенности	Морфология отдельного песчаного тела	Континентальные фации	Прибрежно-морские фации	Морские фации
Слойчатый	Изолированные или наложенные друг на друга песчаные тела	Границей песчаного тела является либо изменение в петрофизических свойствах породы	Стабильная и выдержанная горизонтальная проницаемость, и постепенно изменяющаяся вертикальная проницаемость	Отличная протяженность и постепенно изменяющаяся толщина	Озерные и эоловые отложения	Отложения барьера, бара, проградирущего пляжа	Неритические отложения, отложения дистальной части глубоководного конуса выноса
Мозаичный	Многослойное напластование	Небольшие перерывы в порода-коллекторе	Большое различие в петрофизических свойствах между песчаными телами	Хорошая протяженность, мощная и выдержанная толщина	Отложения многоруслых рек, высокопесчаных меандрирующих рек, дистальной части аллювиального конуса выноса, эоловые междюнные отложения	Отложения дельт приливно-отливного типа, тыловой части барьерного комплекса, распределительных каналов с большим коэффициентом песчаности	Отложения турбидитных распределительных каналов средней части глубоководного конуса выноса
Лабиринтовый	Изолированных группы наложенных друг на друга песчаных линз	Песчаные тела соединены друг с другом маломощным низкопроницаемым песчаником	Большое различие в петрофизических свойствах между песчаными телами	Небольшой размер и плохая протяженность	Отложения меандрирующих рек низкой песчаности и/или низкой извилистости	Отложения распределительных каналов низкопесчаных дельт	Оползневые отложения распределительных каналов проксимальной части глубоководного конуса выноса

1.3. Опыт разработки Северо-Хохряковского нефтяного месторождения

Влияние архитектурной сложности на оценку геологических запасов может быть продемонстрировано на примере Северо-Хохряковского нефтяного месторождения, которое входит в группу самых восточных месторождений центральной части Западной Сибири. Данная группа месторождений тектонически приурочена к восточной части Уренгойско-Колтогорского грабена. В связи с высокой палеотектонической активностью для всей группы месторождений характерно отсутствие надежной покрывки для мелового комплекса отложений, что является главной причиной отсутствия залежей углеводородов промышленных масштабов. Однако для юрского комплекса отложений неизменной покрывкой остались верхнеюрские глинистые отложения баженовской и георгиевской свит [3].

Северо-Хохряковское месторождение является классическим примером переоценки геологических запасов месторождения вследствие низкой изученности и высокой архитектурной сложности резервуара [3]. Структурная карта кровли целевого пласта ЮВ1 представлена на Рисунке 1.5. Данная карта была построена на основе данных, полученных вследствие бурения стандартной сетки разведывательных скважин и 2D сейсмического профилирования. В последствие данная карта была использована для подсчета геологических запасов углеводородов, а также для планирования локаций бурения первого фонда добывающих скважин.

Как было выяснено позже, на начальных стадиях разработки месторождения представление о геологическом строении пласта ЮВ1 было сильно упрощено [14]. На основе имеющихся данных было определено, что пласт имел широкое латеральное распространение (от 2.5x2.5 км² до 15x26 км²) и мощную толщину от 25 до 100 м. Ловушка имела структурно-сводовый характер с частичным литологическим экранированием. На ранней стадии жизни месторождения была выявлена разница в водонефтяных контактах в раз-

ведочных скважинах, однако разница в отметках была объяснена наличием непроницаемых перегородок, способствующих гидродинамической разобщенности частей коллектора.

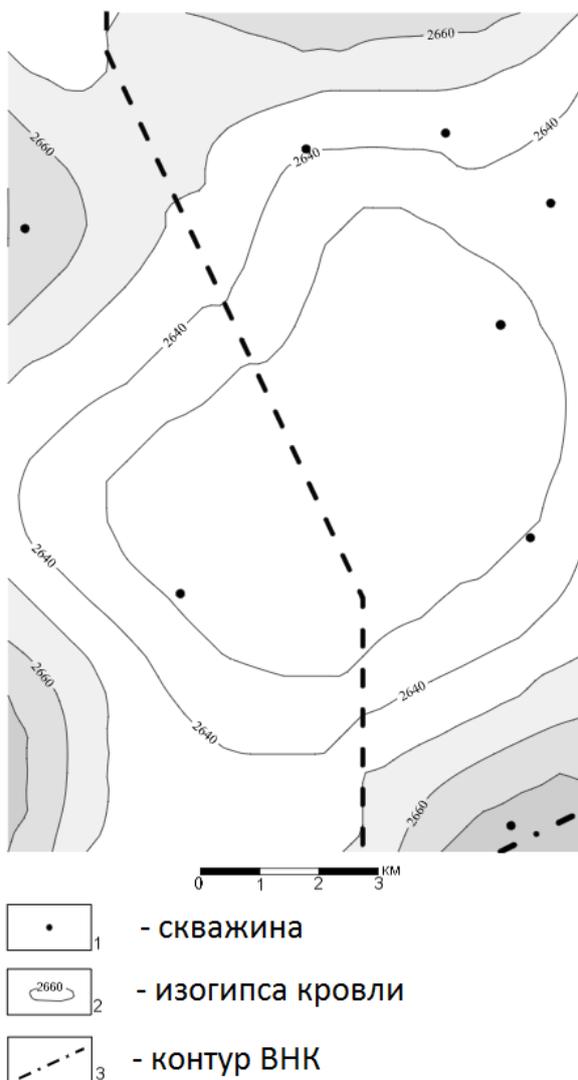


Рисунок 1.5 – Структурная карта кровли ЮВ1 на ранней стадии жизни месторождения [14]

На Рисунке 1.6 представлена структурная карта кровли того же пласта ЮВ1, но уже после запланированного бурения и уточнения геологического строения целевого пласта-коллектора. Как видно из Рисунка геологическое представление о строении песчаных тел значительно усложнилось. На основе накопленной информации был сделан вывод, что пласт ЮВ1 имеет высокую степень архитектурной неоднородности, связанной с особенностями седиментогенеза.

Высокая палеотектоническая изменчивость в процессе образования осадка привело к частой смене отложений фаций, принадлежащим к разным обстановкам осадконакопления на расстоянии менее 1 км. В течение долгого времени Северо-Хохрятское месторождение занимало место одного из самых сложных нефтяных месторождений Западной Сибири наряду с Салымской группой месторождений, которой так же был характерно лабиринтовое строение архитектуры резервуара [3].

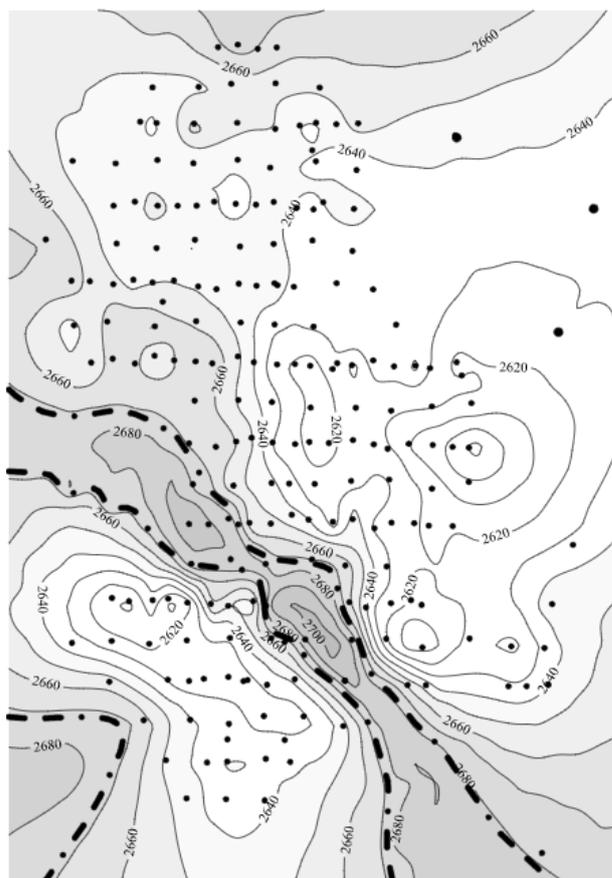


Рисунок 1.6 – Структурная карта кровли ЮВ1 на этапе эксплуатационных работ [14]



Согласно данным последующего бурения добывающих скважин было установлено, что эффективная толщина песчаников в пределах пласта ЮВ1 колеблется от 0 до 40 м. Поскольку бурение первого фонда скважин планировалось на основе изначально неверного представления о геологическом

строении резервуара, на месторождении в последствие сложилась неблагоприятная экономическая ситуация из-за соотношения рентабельных и нерентабельных эксплуатационных скважин. В дополнении, доля добывающих скважин с коммерческим притоком углеводородов составляла лишь небольшой процент от общего фонда скважин. При пороговом значении дебита углеводородов $8 \text{ м}^3/\text{сутки}$ доля коммерчески выгодных эксплуатационных скважин Северо-Хохряковского месторождения составляло менее 30% на октябрь 1993 г. В случае принятия порогового значения дебита в $20 \text{ м}^3/\text{сутки}$ доля высокодебитных скважин снижалась до значения менее 10%.

Таким образом, лабиринтовое строение резервуара стало причиной убыточной добычи углеводородов в связи с низкой долей рентабельных эксплуатационных скважин [3]. Было очевидно, что для экономически выгодной разработки месторождения была необходима детальная сейсморазведка. Сложившаяся ситуация послужила толчком для доразведки месторождения и принятия новой геологической гипотезы об архитектурном строении резервуара для последующего уточнения плана бурения следующего фонда добывающих скважин.

В процессе доразведки путем бурения дополнительных разведочных скважин, а также уплотнением сети сейсмической съемки, была выявлена сеть разрывных нарушений в литологическом составе пласта, которые являлись причиной ограничения границ песчаных залежей [3]. Размеры предполагаемого коллектора уменьшились, он уже представлял собой серию литологически экранированных отдельных песчаных линз с индивидуальными петрофизическими характеристиками.

Согласно Рисунку 1.6, коллектору пласта ЮВ1 характерно сложное геоморфологическое строение. В центральной части карты наблюдается грабенообразный прогиб, разделяющий участок на две части. Наряду с отсутствием участков наличия коллектора этот прогиб являлся одной из главных причин низкой доли коммерчески выгодных скважин, поскольку изначально первый фонд добывающих скважин бурился в предполагаемый купол струк-

туры, в результате чего часть скважин попала в зоны погружения прогиба с водонасыщенным пластом.

Согласно данным 3D сейсмической съемки было выявлено, что сложное архитектурное строение резервуара сформировалось вследствие высокой сейсмотектонической активности в период седиментогенеза. Очаги сейсмической активности были локализованы в сводах тектонических поднятий Северо-Хохряковской структуры, являющейся сложной многокупольной системой. Сводовые части поднятий являлись так же и источником осадочного материала. В процессе перемещения материал подвергся механической дифференциации, что привело к образованию крупнозернистых песчаных тел в зонах склонах поднятий и локальных депрессий. Благодаря высокой энергии мутьевых потоков, мелкозернистые и глинистые осадки были перенесены далеко за пределы эпицентра палеотектонической активности в более глубокие части бассейна.

Зоны локальных депрессий способствовали формированию ловушек стратиграфического типа. Образовавшиеся песчаные линзы были перекрыты мелкозернистыми фракциями в период тектонического затишья. В результате некоторые линзы стали гидродинамически изолированы друг от друга, что объясняет разницу отметок водонефтяного контакта в разведочных и эксплуатационных скважинах. Согласно фактическим данным в пласте ЮВ1 наблюдалось скачкообразное изменение уровня водонефтяного контакта в скважинах с малым межскважинным расстоянием. Разный уровень ВНК лабиринтовой архитектуры резервуара стал еще одной причиной переоценки геологических запасов Северо-Хохряковского нефтяного месторождения. Ожидание широкого диапазона возможных отметок ВНК в планируемых скважинах значительно расширило диапазон возможных геологических запасов разрабатываемого месторождения.

Максимальная разница отметок в двух соседних скважинах составляла более 35 метров при межскважинном расстоянии в 250 метров. В этих же скважинах была выявлена самая большая разница и в эффективной толщине

песчаника, которая составляла 16 метров. Был зафиксирован случай, когда при межскважинном расстоянии в 500 метров только одна скважина из четырех пересекла коллектор пласта ЮВ1. Все это указывало на небольшой размер песчаных линз терригенного седиментогенеза с поперечным размером в несколько сот метров.

Подобное лабиринтовое архитектурное строение резервуара было характерно всей группе месторождений, находящихся в районе восточного поднятия Уренгойско-Колтогорского грабена. Без тщательного изучения морфологии архитектурных элементов подобной системы невозможно было бы рассчитывать на рентабельность разработки месторождений.

Малый размер изолированных друг от друга песчаных линз способствовал быстрому падению давления в скважинах, что делало необходимым введение системы поддержания пластового давления. Эта задача была сильно затруднена особенностями коллектора и требовала детального изучения архитектурной сложности пласта. В дополнение высокая архитектурная гетерогенность коллектора стала причиной перехода от кустарной системы разработки к индивидуальной для каждого стратиграфически изолированного песчаного тела.

В результате доизучения и изменения геологической концепции понимания внутреннего архитектурного строения Северо-Хохряковского месторождения было достигнуто снижение количества планируемых эксплуатационных скважин на порядок с одновременным повышением индекса продуктивности скважин и коэффициента извлечения нефти в связи с введением индивидуальной системы поддержки пластового давления (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Карта максимальных дебитов пласта ЮВ1 [14]

Главным выводом является тот факт, что многие месторождения Западной Сибири, имеющие лабиринтовое строение резервуара, были введены в разработку слишком рано в условиях недостаточного количества информации о внутреннем строении пласта. Это послужило геологической причиной повышения себестоимости единицы углеводородов. Данный пример показывает, что для коммерчески выгодной разработки подобных месторождений необходимым шагом является повышение плотности геолого-геофизических наблюдений и получения информации.

Для успешного решения уже существующей подобной проблемы предлагается методологический подход к практическому выходу из данной ситуации, состоящий из двух этапов:

1. Выявление геологических, тектонических и/или экономических причин снижения индекса продуктивности скважины
2. Разработка комплекса доразведки контуров участков месторождений, отличающихся высоким дебитом, путем проведения 3D сейсмической съемки с последующим бурением эксплуатационных скважин.

1.4. Геологическое описание моделируемых обстановок осадконакопления

Для изучения влияния архитектурной неоднородности на оценку уверенности в геологических запасах были выбраны 2 обстановки осадконакопления, имеющие диаметрально противоположную архитектурную сложность. В качестве таких обстановок были выбраны следующие случаи:

1. *Обстановка проградирующего побережья* в условиях доминирования волновой энергии (резервуар слойчатого типа);
2. *Обстановка речной системы меандрирующего типа* низкой песчаности (резервуар лабиринтового типа).

1.4.1. Обстановка проградирующего побережья в условиях высокой волновой энергии

Согласно исследованиям [15] в древних отложениях прибрежно-морских обстановках осадконакопления запечатлена иерархия циклов природных явлений разного масштаба, которыми являются:

1. чередование кратковременных природных событий (например, приливно-отливная деятельность);

2. более длительные колебания относительного уровня моря (например, уплотнение подстилающих осадочных пород);
3. крупномасштабные изменения, связанные с тектоникой литосферных плит.

Изменение уровня моря является крупномасштабным и длиннопериодным природным событием, которое благодаря своей цикличности приводит к отложению четко очерченных стратиграфических единиц, представляющие собой парасеквенсы. Группы парасеквенсов, образовавшиеся при разных регрессионно-трансгрессионных циклах, могут быть распознаны при анализе сейсмических съемок методом отраженных волн. В качестве границ между парасеквенсами, как правило, выступают глинистые отложения, сформировавшихся во время циклического повышения относительного уровня моря (затопления).

Согласно [16, 17] в настоящее время обычной практикой в корреляции осадков проградирующего побережья сильной волновой энергии является нахождение поверхностей затопления по каротажным данным, являющимися границами парасеквенса.

Следующим шагом является корреляция парасеквенса как слоя песчаника с относительно выдержанной толщиной и латеральным трендом в петрофизических свойствах от проксимальной до дистальной фаций. Этот подход полностью согласуется с анализом древних осадочных отложений, где парасеквенсы формируют горизонтальные слои песчаника, имеющие тренд к выклиниванию, толщину от нескольких метров до десятков метра и площадь распространения в несколько квадратных километров.

Седиментологическая модель данной обстановки осадконакопления изображена на Рисунке 1.8. В итоге, несмотря на постепенное изменение толщины, можно считать, что данная обстановка осадконакопления формирует в пределах парасеквенса слойчатый тип архитектуры резервуара (Рисунок 1.9) [19].

PROGRADING CLASTIC SHORELINE PARASEQUENCES

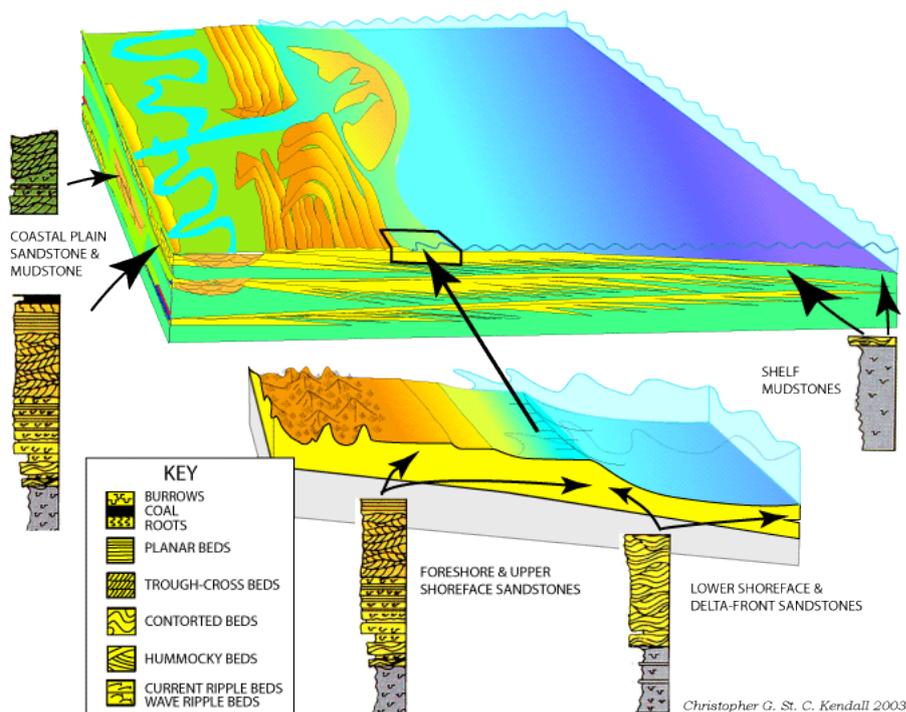


Рисунок 1.8 – Седиментологическая модель проградирующего побережья [18]

Согласно [20] ключевой неопределенностью в архитектуре такого типа отложений является неопределенность в величине агградационного угла в пределах самого парасеквенса (Рисунок 1.10, а, б) и в пределах группы парасеквенсов (Рисунок 1.10, в). Эта величина зависит от баланса между количеством поступающего осадочного материала, объема аккумуляционного пространства и тектонических условий, влияющих на гидродинамику среды.

Согласно [20] толщина архитектурных элементов линейно зависит от величины агградационного угла, что делает этот параметр важным для рассмотрения при конструировании геологической модели резервуара.

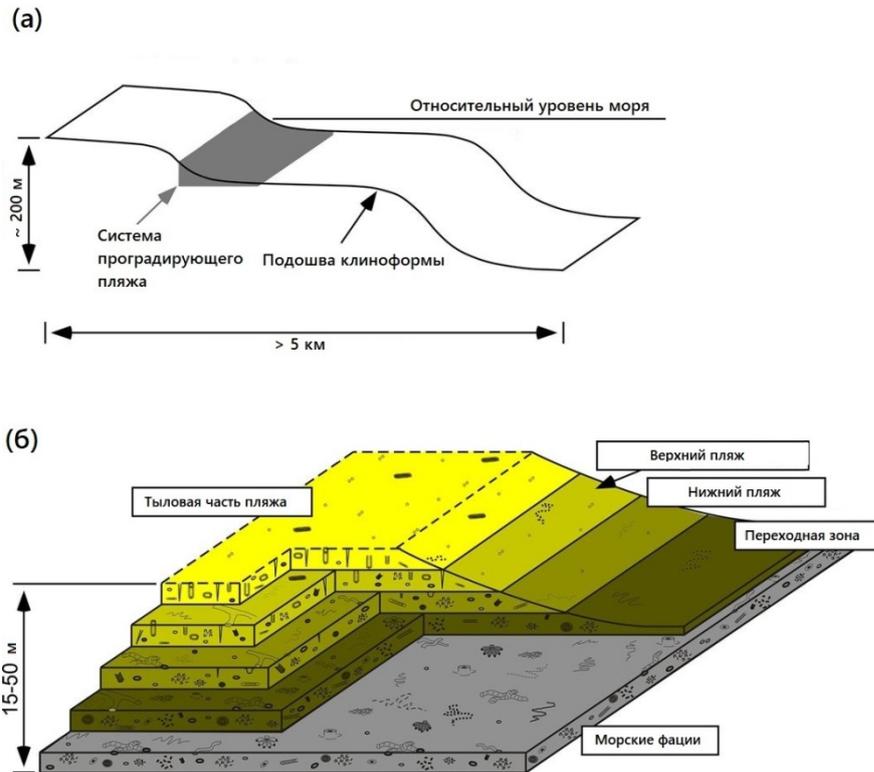


Рисунок 1.9 – Архитектурная модель проградирующего побережья

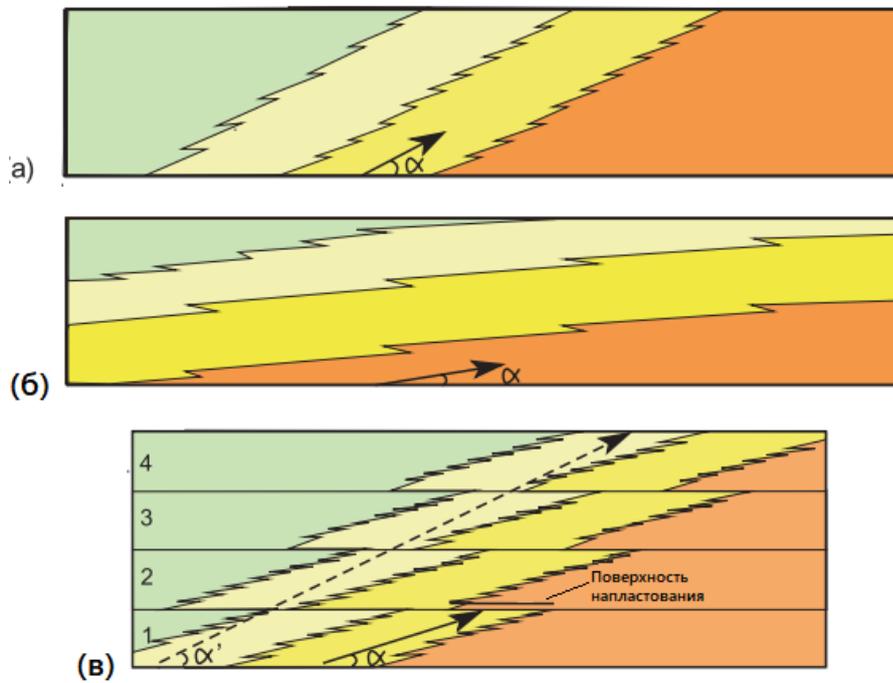


Рисунок 1.10 – Неопределенность в величине аградационного (α) [20]

1.4.2. Обстановка речной системы меандрирующего типа

Резервуары, сформировавшиеся при терригенных условиях осадконакопления, характеризуются разнообразием размеров, морфологии и внутренней гетерогенности архитектурных элементов. Флювиальные песчаные тела зачастую дискретны, и детерминистическая корреляция коллектора между двумя скважинами с большой долей вероятности приведет к неадекватному представлению о пространственном распределении песчаных тел в резервуаре.

Отложения флювиальной системы меандрирующего типа состоит из множества канальных кос (channel belt), наложенных друг на друга (Рисунок 1.11).

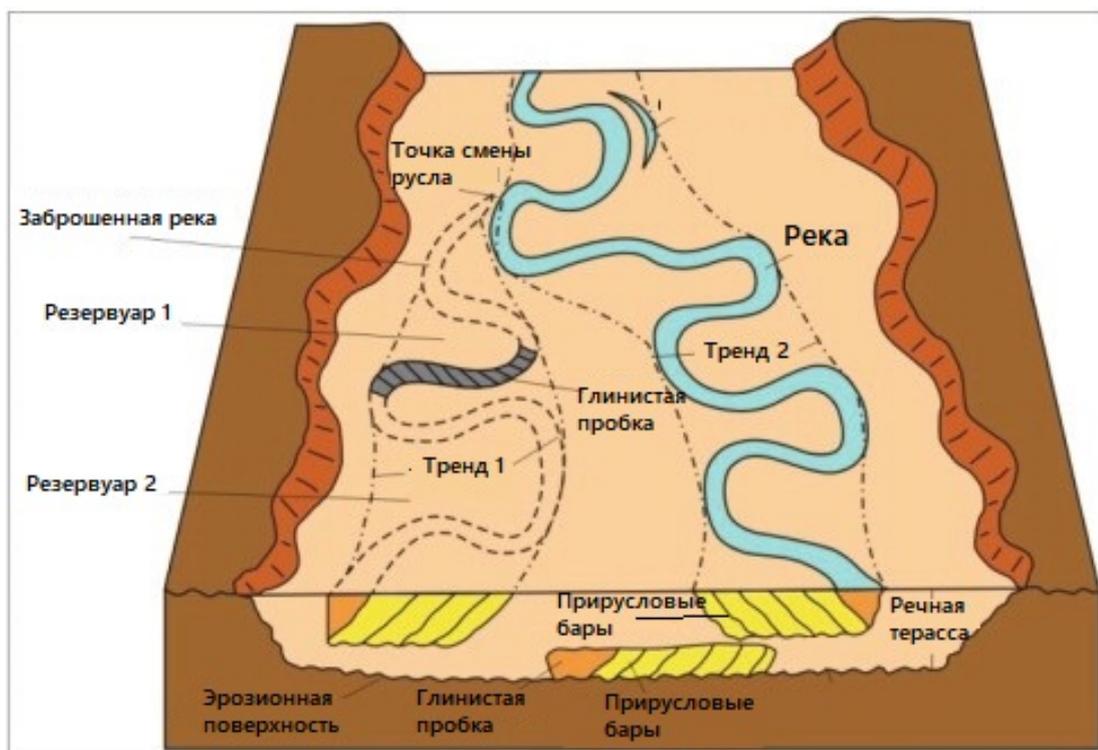


Рисунок 1.11 – Отложение нескольких флювиальных кос

Отдельная коса (Рисунок 1.11) состоит из нескольких прирусловых валов (point bars), сформировавшиеся путем латеральной аккреции. Прирусловые валы являются целевой фацией для разработки, поскольку, как правило, именно эти песчаные тела имеют наилучшие фильтрационно-емкостные

свойства [21]. Песчаное тело прируслового вала реки меандрирующего типа состоит из трех элементов: латеральной аккреции песчаных тел, латеральной аккреции глинистых перемычек и плоскости латеральной аккреции [22]. Типичное строение прируслового вала, сформировавшегося в гумидном климате, представлено на Рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Отложение отдельной флювиальной косы в разрезе [22]

Помимо прирусловых валов коса состоит из осадков канала, через который поступал материал. Дно канала имеет эрозионное залегание, форму перевернутой линзы и обычно выстелено крупнозернистым осадком вплоть до гравийной размерности (channel lag), который так же имеет фильтрационно-емкостный потенциал и может выполнять функцию мостика между песчаными телами прирусловых валов.

В процессе формирования осадков каналы рек изменяют свое течение вследствие внезапного изменения направления русла реки (avulsion). В результате этого, как правило, канал становится заброшенным, что приводит к формированию в нем осадков мелкозернистой либо глинистой фракции, представляющих собой глинистые пробки (abandonment channel).

В разрезе глинистые пробки зачастую представляют собой заполнение русла заброшенного канала, начиная от песчаных разностей на дне вплоть до края речной террасы. Эти глинистые пробки создают непроницаемую оторочку вдоль прирусловых баров и являются одной из главных причин дискретного залегания песчаников [22]. Однако в некоторых случаях процесс уменьшения гидродинамики потока внутри речного канала может происхо-

дить постепенно, что приводит к формированию и сохранению фаций нижнего прируслового вала, сверху которого образуется глинистая пробка [12], что, несомненно, играет положительную роль в латеральной целостности коллектора (Рисунки 1.13 и 1.14).

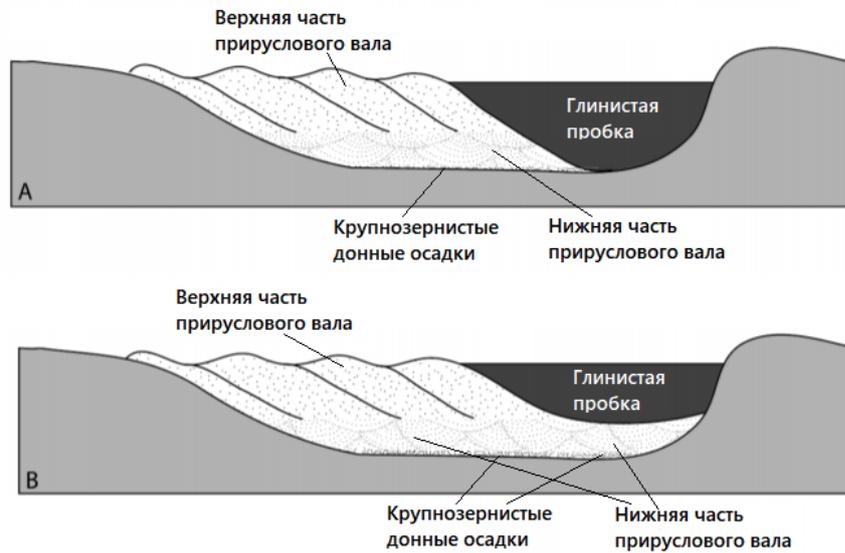


Рисунок 1.13 – Разрез прируслового вала для случая низкопесчанистых (а) и высокопесчанистых отложений меандрирующей косы [12]

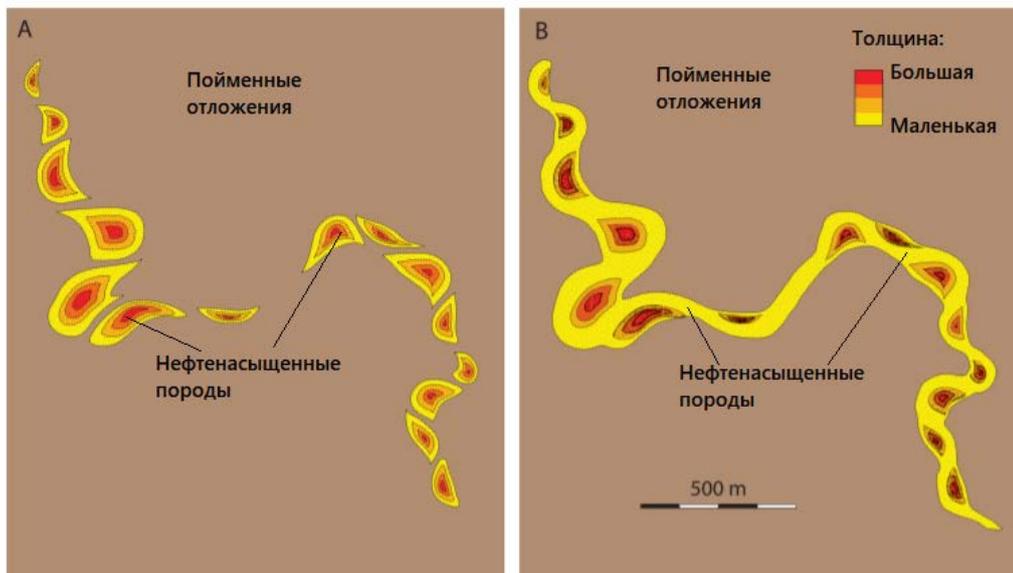


Рисунок 1.14 – Карта эффективных толщин для случая низкопесчанистых (а) и высокопесчанистых отложений меандрирующей косы [12]

Так же стоит отметить, что в формировании флювиальных осадков немаловажную роль играют тектонические условия, при которых они формировались. Это было показано в работе [23], где было проанализирована связь между относительным уровнем моря, полеорельефом и соотношением осадков флювиальных кос в резервуаре (Рисунки 1.15 и 1.16).

1. Фаза повышения относительного уровня моря сопровождается увеличением доступного аккумуляционного пространства, что в свою очередь приводит к формированию дискретных и менее связанных тел и низкой песчаности коллектора (Юнит 1).
2. Продолжение повышения относительного уровня моря впоследствии приводит к временной нехватке крупнозернистого материала, что в свою очередь приводит к образованию преимущественно мелкозернистых осадков и, следовательно, к падению коэффициента песчаности коллектора (Юнит 2).
3. Наконец, падение относительного уровня моря приводит к отложению латерально-объединенных между собой и вертикально-напластованных друг на друга песчаных тел вследствие резкого уменьшения доступного аккумуляционного пространства. В результате такие резервуары характеризуются как высоким коэффициентом песчаности, так и высокой степенью соединенности песчаных тел благодаря постоянной переработке материала флювиальными процессами.

Резервуары флювиального генезиса часто относят к резервуарам лабиринтового типа архитектуры, и моделирование такого типа резервуара требует вероятностный подход, в особенности на ранних стадиях разработки [24]. Аккуратность стохастической модели значительно улучшается в случае наличия достаточного количества информации о характере пространственного распределения, петрофизических свойствах, внутренней гетерогенности и размерах архитектурных элементов резервуара, которую можно получить из

анализа древних обнажений и керновых данных месторождений, находящихся на финальной стадии разработки. Как было показано выше, флювиальные осадки имеют большое разнообразие форм и размеров и требуют тщательного геологического анализа для точной оценки геологических запасов.

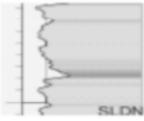
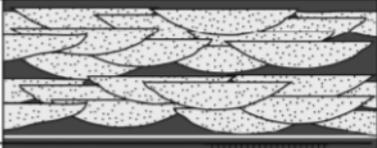
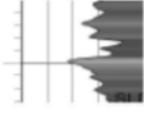
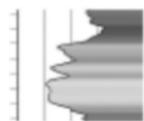
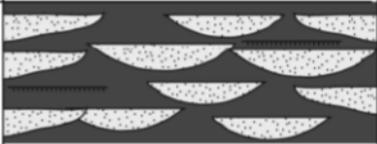
Юнит	Поведение ГК	Фациальное описание	Архитектура резервуара
3		Поставленные друг на друга и латеральное объединенные флювиальные песчаные тела	
2		Переслаивание глинистых и алевритовых тел с наличием угольных прослоек, впечатанные в пойменные отложения	
1		Изолированные песчаные тела, впечатанные в алевритовые и глинистые отложения поймы	

Рисунок 1.15 – Отложения флювиальных кос меандрирующего типа при разных тектонических условиях [23]

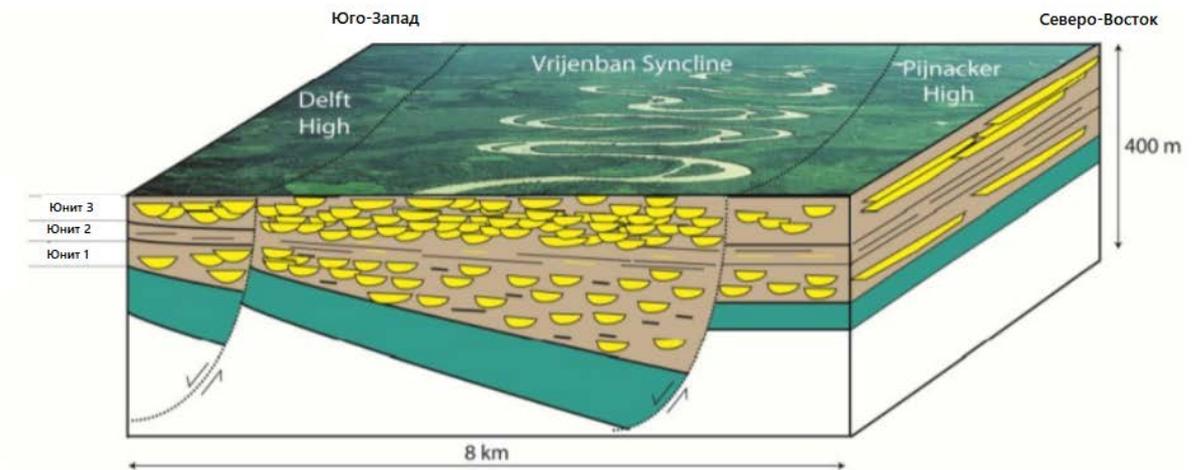


Рисунок 1.16 – Отложения флювиальных кос Delft Sandstone Member, West Netherlands [23]

1.5. Информационная энтропия как мера геологической неопределенности

В настоящее время в разнообразных областях науки – от геологии до медицины, широко используются карты и/или компьютерные модели для отображения пространственного распределения свойств. Зачастую принятие решения напрямую зависит от построенной модели или карты. В этом случае жизненно необходим инструмент для анализа и визуализации неопределенностей, связанных с распределением этих свойств.

Информационная энтропия выступает идеальным кандидатом на эту роль, поскольку она позволяет не только численно выразить неопределенность в распределении свойств, но и так же визуализировать эту неопределенность в пространстве [25, 26]. Несомненным преимуществом информационной энтропии является интуитивно понятное для интерпретации отображение неопределенности системы в численном её выражении.

Впервые понятие информационной энтропии было предложено К. Шенноном в 1948 году. Понятие «информационная энтропия» изначально имело развитие в области криптографии и коммуникации как «мера неопределенности или непредсказуемости информации» [27], однако впоследствии стало использоваться и в других областях науки [28].

Применение информационной энтропии как меры неопределённости системы должно отвечать следующим важным аспектам [25]:

1. если в определенной локации не существует никакой неопределённости, то информационная энтропия равна нулю;
2. информационная энтропия строго больше нуля, когда существует какая-либо неопределенность;
3. если в определенной локации могут состояться равновероятностные исходы события, то значение информационной энтропии максимально;

4. если не существует более никаких других возможных исходов события, то значения информационной энтропии в случае 3 является максимальным.

Согласно [28] информационная энтропия случайного события напрямую зависит от распределения вероятности появления того или иного исхода этого события в пространстве. В качестве примера рассмотрим случайное событие X с n возможными исходами $x_1 \dots x_n$. Вероятность исхода события $x_i \in n$ равна $p(X=x_i)$ или p_i . Информационная энтропия для случайного события X численно равна:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (2)$$

Как следует из уравнения (2) информационная энтропия традиционно вычисляется с помощью логарифма по основанию 2, что ранее позволяло выражать меру энтропии в битах для случая события X с двумя исходами x_1 и x_2 . Информационная энтропия может быть пересчитана через логарифм по любому основанию, однако в этой работе будет принято традиционное основание 2.

Важным аспектом информационной энтропии является тот факт, что она достигает своего максимального значения при полностью равновероятных исходах события X . Таким образом, она принимает максимальное значение при следующем условии:

$$p_i = \frac{1}{n} \quad (3)$$

и численно равна:

$$H_{max}(X) = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \quad (4)$$

В качестве демонстрации рассмотрим пример информационной энтропии очень простой 1-битной системы, в которой может произойти только два события (либо событие А, либо событие Б) с вероятностью $P(A)$ и $P(B)=1-P(A)$. Примером данной системы является подбрасывание монетки в воздух с последующим выпадением события «решки» или «орла».

В этом случае информационная энтропия численно выражает количество упущенной информации при каждом подбрасывании монеты. Если эксперимент честный и события случайны, то появление того или иного исхода равновероятно и энтропия имеет максимальное значение, то есть размер 0,5 бит. Если же эксперимент является нечестным и вероятность возникновения определенного события выше вероятности противоположного исхода, то информационная энтропия будет численно меньше (Рисунок 1.17).

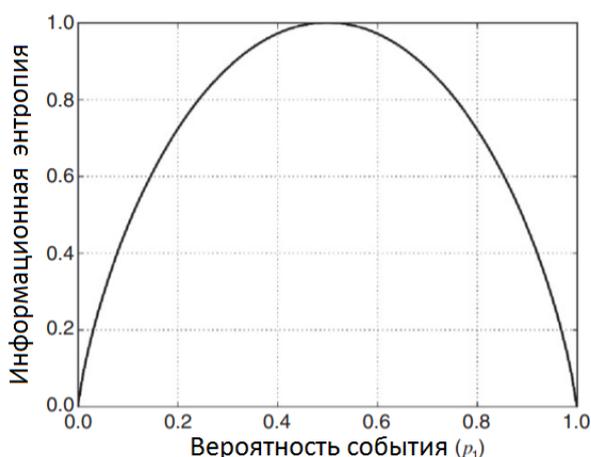


Рисунок 1.17 – Зависимость информационной энтропии от вероятности исхода события для двухбитной системы [25]

Поскольку информационная энтропия максимальна при равновероятном состоянии системы и равняется нулю, когда состояние системы известно точно, то отсюда вытекает ключевое свойство этого параметра – информационная энтропия $H(X)$ численно равна количеству информации в системе $I(X)$:

$$H(X) = I(X) \quad (5)$$

Следовательно, уверенность какого-либо свойства системы можно выразить как:

$$I'(X) = 1 - H'(X) \quad (6)$$

где $I'(X)$ является нормированным значением количества информации о системе и отображает в процентном выражении степень знания системы, в то время как $H'(X)$ является нормированным значением информационной энтропии системы и отображает противоположное, то есть степень неуверенности в системе:

$$H'(X) = \frac{H(X)}{H_{max}(X)} = \frac{H(X)}{\log_2 n} \quad (7)$$

Расширение области применения информационной энтропии в область пространственного моделирования вытекает из следующего заключения. Если какой-либо дискретный регион модели (ячейка) с координатой $\vec{r} = (x, y, z)$, характеризуется случайным свойством $X(\vec{r})$ с n возможными исходами, то информационная энтропия этой ячейки численно равна:

$$H(X(\vec{r})) = - \sum_{i=1}^n p_i(\vec{r}) \log_2 p_i(\vec{r}) \quad (8)$$

Поскольку информационная энтропия является аддитивной величиной, то она может быть визуализирована как в качестве 3D модели, 2D карты или абсолютного значения энтропии, характеризующего состояние всей системы. В этом случае, абсолютная информационная энтропия геологической модели, состоящей из M ячеек, будет численно равна:

$$H_{total}(X(\vec{r})) = - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M H(X(\vec{r})) = - \frac{1}{m} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^n p_i(\vec{r}) \log_2 p_i(\vec{r}) \quad (9)$$

Применение информационной энтропии для решения геологоразведочных проблем было впервые предложено [29], что впоследствии привело к общему принятию этой концепции для численного выражения и анализа пространственного распределения неопределенности геологических моделей. Несомненным плюсом этой концепции является тот факт, что она комбинирует все исходы стохастического моделирования какого-либо геологического свойства системы в одну величину, которая может характеризовать систему как локально, так и всецело [26].

Рассмотрим применение информационной энтропии на примере расчета неопределённости в пространственном расположении границ, которые разделяют три разные геологические единицы (Рисунок 1.18). Сначала для каждой ячейки методом стохастического моделирования была рассчитана вероятность появления той или иной геологической единицы (Рисунок 1.18 б). Вероятность появления была посчитана как сумма всех исходов всех стохастических реализаций, деленная на количество самих реализаций.

Согласно формуле (4) была рассчитана неопределенность системы (информационная энтропия), показанная на Рисунке 1.18. Ячейка А, находящаяся далеко от границы, имеет минимальное значение энтропии, поскольку в этой локации доминирует вероятность появления определенной геологической единицы и, соответственно, исход событий предопределен. Чем ближе ячейки находятся к границе, тем больше величина энтропии, поскольку доминирование вероятности того или иного исхода снижается. В ячейке Б равновероятно появление любой их трех геологических единиц и поэтому в этой ячейке информационная энтропия (= неопределенность) принимает максимальное значение.

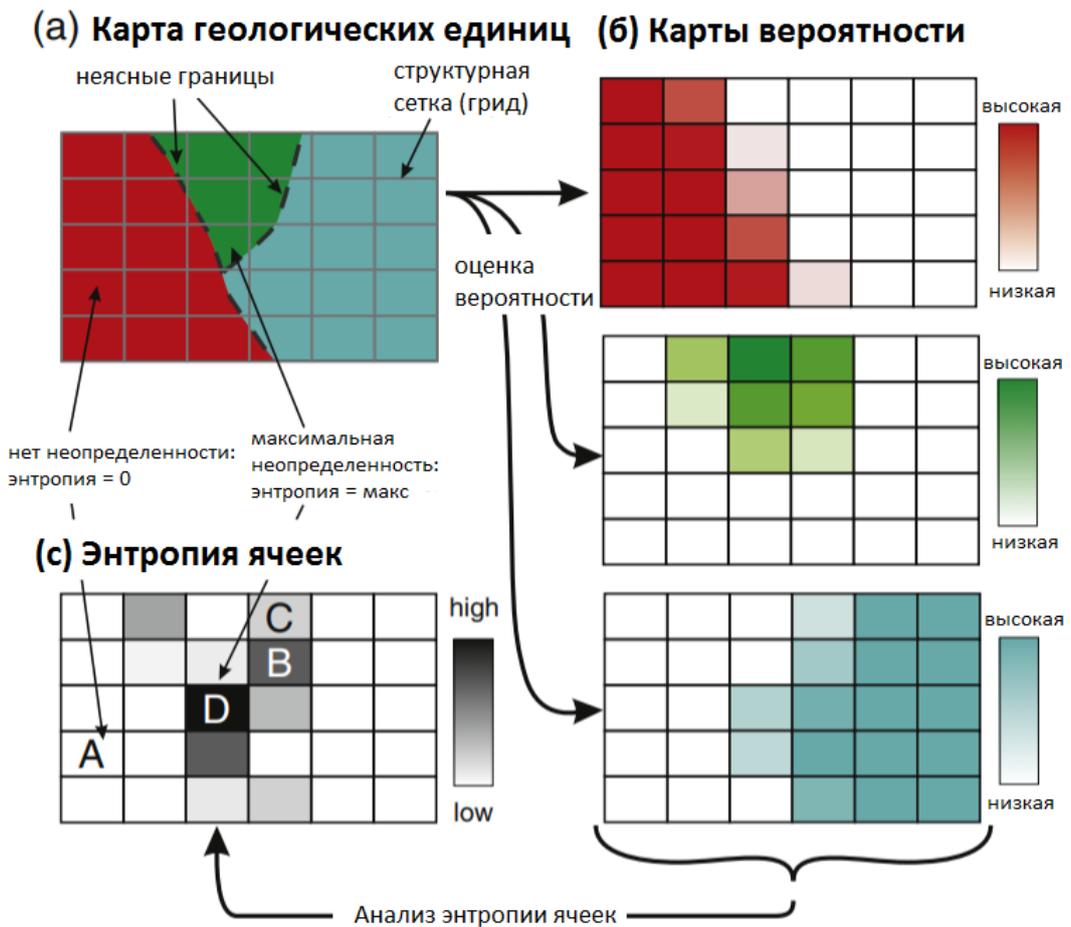


Рисунок 1.18 – Карта возможного расположения геологических единиц (а), карты вероятности появления той или иной единицы (б), карта информационной энтропии всей системы (в) [25]

Стоит обязательно помнить, что информационная энтропия – это не свойство самой системы, а характеристика, отражающая понимание этой самой системы, поскольку для расчета информационной энтропии требуются стохастические реализации (итерационные модели), параметры которых напрямую зависят от опыта интерпретатора и количества доступной информации.

Немаловажным аспектом является так же анализ понижения неопределенности системы при появлении новой информации, то есть оценка того, какое количество дополнительной информация может быть получено в одной точке пространства и каково будет снижение неопределенности в соседних областях. На Рисунке 1.19 можно увидеть, что получение новой информации

о системе (в точке С) ведет не только к снижению неопределенности в самой точке, но и так же в соседних областях. Однако очевидно, что получение информации в точке Б, которая является локацией максимальной информационной энтропии, привело бы к большему снижению неопределенности системы. Таким образом, можно заключить, что первыми кандидатами для бурения (получения информации) с целью получения максимально возможного количества информации о системе и снятия неопределенности являются те локации, значение информационной энтропии которых максимально.



Рисунок 1. 19 – Карта возможного расположения геологических единиц (а), карта информационной энтропии всей системы до бурения скважины в ячейку С (б), карта информационной энтропии всей системы до бурения скважины в ячейку С (в) [28]

Последней важной характеристикой информационной энтропии является следующий факт: поскольку информационная энтропия может быть вычислена только путем создания стохастических реализаций для расчета зна-

чений вероятности того или иного события, то критерием устойчивости этого параметра является количество этих самых реализаций (Рисунок 1.20) [25].

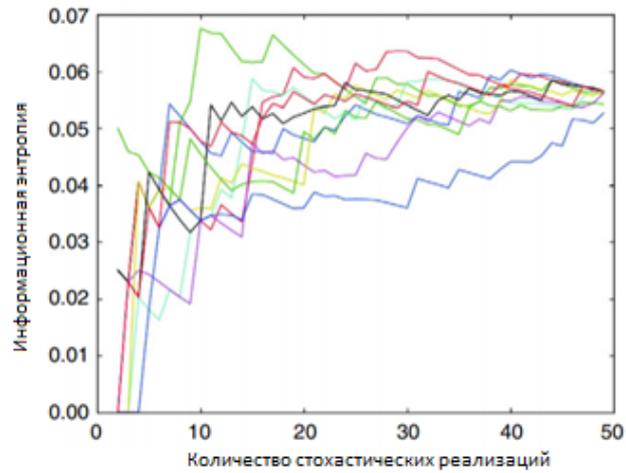


Рисунок 1.20 – Поведение информационной энтропии с увеличением количества стохастических реализаций [25]

2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ НА УВЕРЕННОСТЬ В ОЦЕНКЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАПАСОВ И МОРФОЛОГИИ РЕЗЕРВУАРА

2.1. Общая методология работы

Для изучения влияния архитектурной сложности на оценку геологических запасов и изученность месторождения создание геологических моделей различных обстановок осадконакопления проводилось со следующими допущениями.

1. Для исключения влияния петрофизической и диагенетической неоднородности на оценку запасов, моделируемые фации имели постоянную и заранее известную пористость и остаточную водонасыщенность.
2. Для исключения влияния крупномасштабной неоднородности (на уровне всего месторождения) на оценку запасов, размер модели был выбран таким образом, чтобы допустить архитектурную стационарность в пределах модели. Другими словами, в модели отсутствуют какие-либо тренды, значительно изменяющие размеры и соотношение архитектурных элементов в резервуаре.
3. Для исключения влияния структурной неоднородности, залегание слоев моделировалось горизонтальным и без каких-либо тектонических нарушений.

Параметры моделей, являющиеся общими для всех кейсов, представлены в Таблице 2.1.

Объектом исследования являлась синтетическая геологическая модель определенной архитектурной сложности резервуара. Построенная геологическая модель принималась в качестве истинной модели, запасы которой принимались в качестве «true case». Априорная информация о пропорциях фа-

ций, используемая для создания итерационных моделей, оценивалась исходя из пропорций фаций, наблюдаемых в скважинах.

Таблица 2.1 – Общие петрофизические параметры для геологических моделей

Параметр	Значение
Остаточная водонасыщенность	0,15
Нефтенасыщенность	0,85
Геометрические параметры модели	3000 x 3000 x 150 м
Геометрические параметры отдельной ячейки	50 x 50 x 0,5 м
Количество ячеек в модели	600 x 600 x 300

При каждом добавлении новой скважины в геологическую модель добавлялась новая жесткая информация (жесткая информация) о пространственном распределении фаций, а также обновлялась информация о пропорциях фаций в системе. На основе полученной информации конструировались новые геологические модели (итерационные модели) с целью предсказания пространственного распределения фаций истинной модели.

На основе итерационных геологических моделей рассчитывалось значение вероятности появления той или иной фации в каждой ячейке по следующей формуле:

$$P_i(x, y, z) = \frac{\text{Количество появлений } i \text{ фации в ячейке } (x, y, z)}{\text{Количество итерационных моделей}} \quad (10)$$

Далее для системы вычислялась значение информационной энтропии в каждой ячейке по Формуле 8, в виде 2D карты путем осреднения всех значений информационной энтропии вдоль вертикальных ячеек или в виде одного значения, характеризующую всю модель целиком, по Формуле 9.

Проверочными функциями для итерационных моделей являлись значения относительной ошибки RE (Формула 12), характеризующей уверенность в значениях геологических запасов, и значение коэффициента корректности CR (Формула 11), характеризующего изученность системы или, иными словами, насколько в среднем пространственное распределение фаций в итерационных моделях повторяет пространственное распределение фаций истинной модели. Коэффициент корректности CR и значение относительной ошибки в геологических запасах RE вычислялись по следующим формулам:

$$CR = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^M \frac{if [Фация]' = [Фация]^{true} then 1 else 0}{m} \quad (11)$$

[Фация]' - Значение кода фаций итерационной модели в ячейке

[Фация]^{true} - Значение кода фаций истинной модели в ячейке

K - Количество итерационных моделей

$$RE = \left| \frac{[STOIP]' - [STOIP]^{true}}{[STOIP]^{true}} \right| \quad (10)$$

[STOIP]' - Значение геологических запасов P50 итерационных моделей

[STOIP]^{true} - Значение геологических запасов истинной модели

Таким образом, коэффициент корректности CR и значение относительной ошибки в подсчете геологических запасов RE выражают уверенность в знании морфологии резервуара и геологических запасов соответственно.

В течение работы информация в систему добавлялась до тех пор, пока запасы итерационных моделей не попадали в рамки значений геологических запасов, равные значению «true case» ±10%.

2.2. Кейс №1. Влияние архитектурной сложности резервуара на процесс его исследования

2.2.1. Цель и алгоритм кейса

Для того чтобы изучить влияние только лишь сложности архитектуры резервуара на увеличении изученности системы при добавлении новой информации был рассмотрен следующий синтетический кейс:

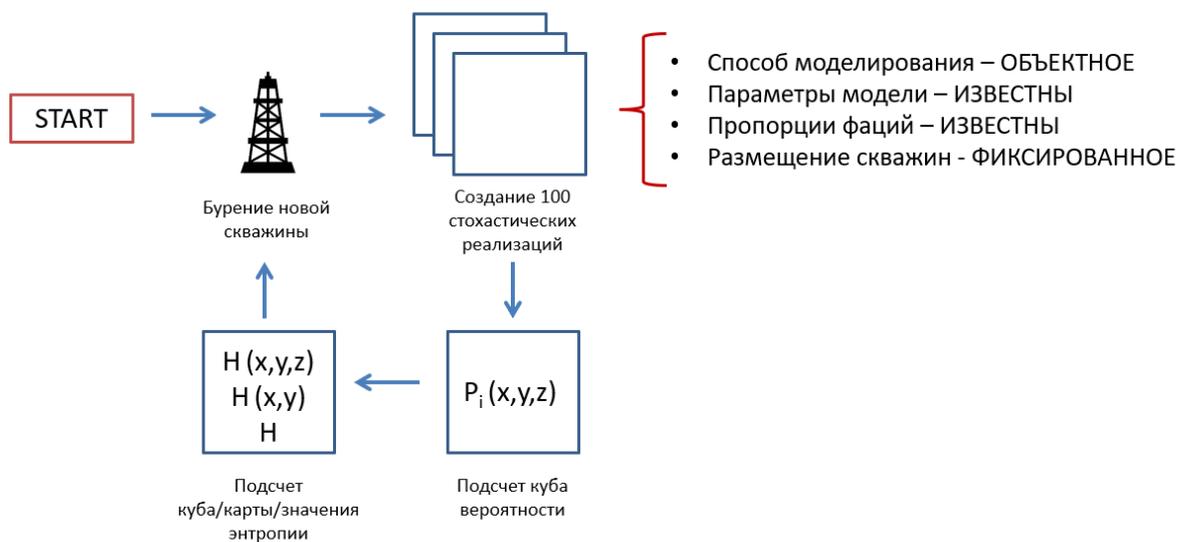


Рисунок 2.1 – Алгоритм кейса №1

Целью данного кейса является подтверждение гипотезы, что гетерогенность архитектуры резервуара имеет прямое влияние на динамику изучения системы и снятия неопределенности. Предполагается, что для более сложных систем потребуется большее количество информации для того же уровня изученности, чем для простых систем.

2.2.2. Параметры кейса и геологических моделей

В качестве истинных моделей были сконструированы три простые геологические модели, имеющие одинаковое значение песчаности резервуара и пористости коллектора, но характеризующие 3 степени архитектурной сложности резервуара (Таблица 2.2). Геометрические параметры, используемые для моделирования коллектора методом объектного моделирования, указаны в Таблице 2.3.

Для того чтобы иметь возможность сравнивать поведение неопределенности разного типа архитектуры при получении новой информации, для всех моделей был принят одинаковый алгоритм добавления новых скважин, который позволил равномерно увеличивать плотность сетки скважины (Рисунок 2.2).

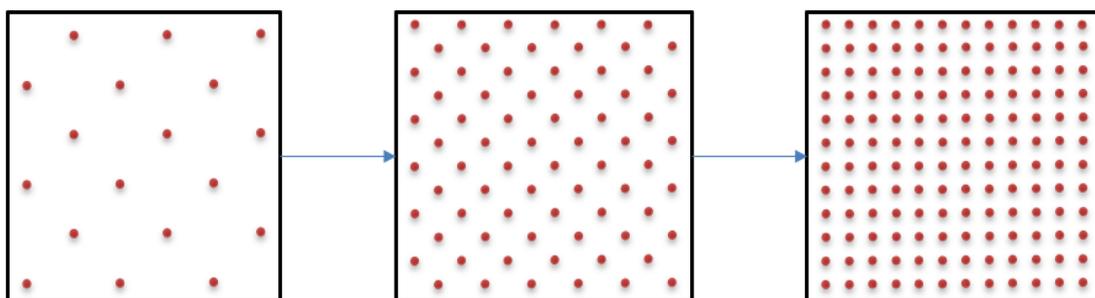


Рисунок 2.2 – Алгоритм расстановки скважин для кейса №1

Таблица 2.2 – Геологические параметры истинных геологических моделей для кейса №1

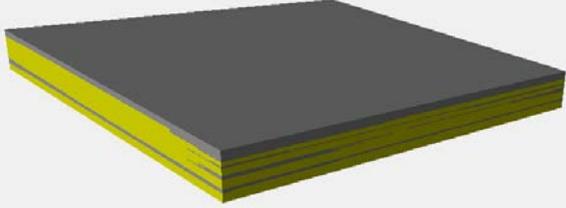
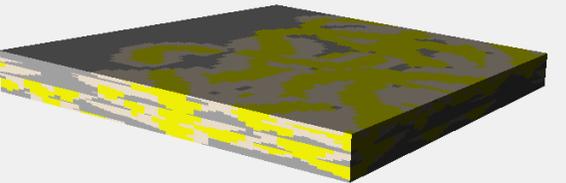
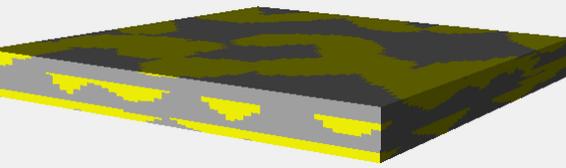
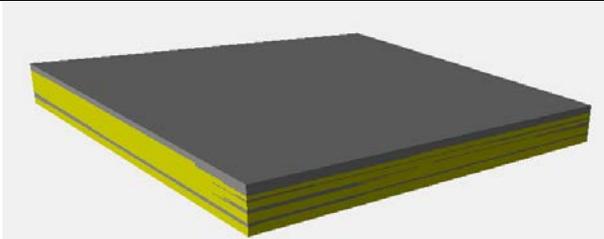
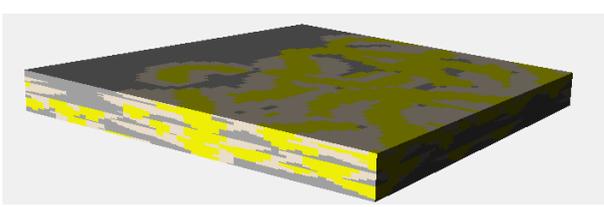
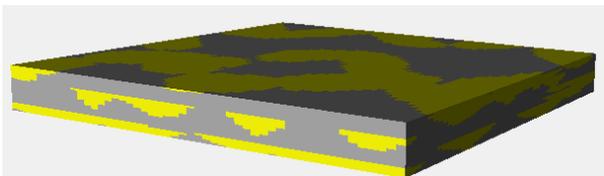
№	Тип архитектуры	Обстановка осадконакопления	Архитектурная сложность	Коэффициент песчаности	Пористость коллектора	Изображение
1	Слойчатый	Дистальная часть глубоководного конуса выноса	Простая	40%	20%	
2	Мозаичный	Проксимальная часть глубоководного конуса выноса	Средняя	40%	20%	
3	Лабиринтовый	Речная система меандрирующего типа	Сложная	40%	20%	

Таблица 2.3 – Геометрические параметры истинных геологических моделей для кейса №1

№	Изображение	Геометрический параметр	Распределение	Min	Mean	Max
1		Меньшая ширина	Треугольное	2500	4000	6000
		Большая ширина		2500	8000	18000
		Толщина		8	10	12
2		Амплитуда изгиба канала	Треугольное	600	800	1000
		Ширина изгиба канала		1000	1500	2000
		Ширина канала		150	300	450
		Глубина канала		10	15	20
		Ширина берега				
		Толщина берега		0,5*	0,7*	0,9*
3		Амплитуда изгиба канала	Треугольное	600	800	1000
		Ширина изгиба канала		1000	1500	2000
		Ширина канала		150	300	450
		Глубина канала		10	15	20

* - фракция толщины канала

2.2.3. Анализ полученных результатов

На Рисунке 2.3 приведены значения информационной энтропии системы сложного архитектурного строения, посчитанные после каждой 10-й реализации. Как видно из графика при достижении 100 стохастических реализаций значение абсолютной информационной энтропии системы становится постоянной. Таким образом, 100 реализаций было принято в качестве критерия устойчивости информационной энтропии.

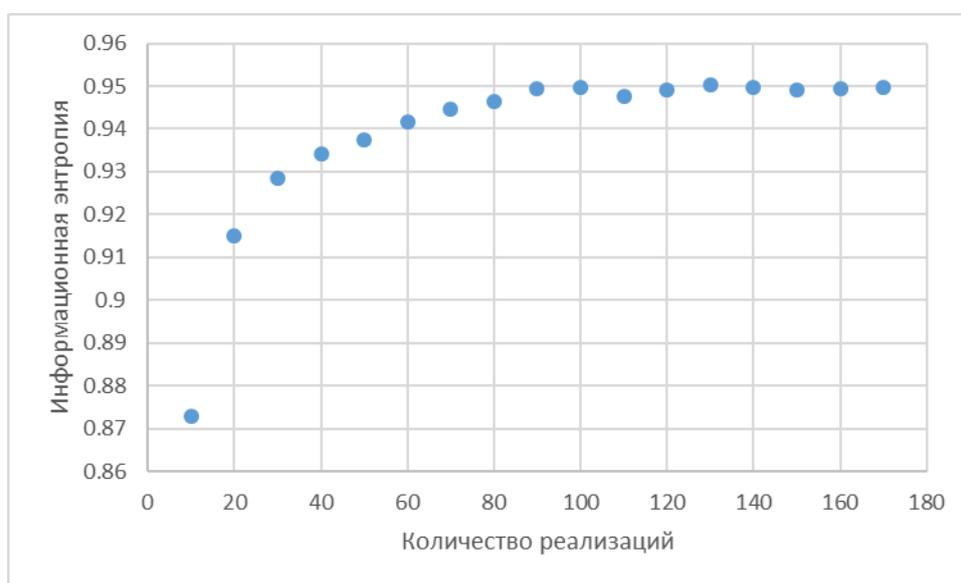


Рисунок 2.3 – Поведение информационной энтропии с увеличением количества стохастических реализаций

На Рисунке 2.4 представлен результат проведенного геологического моделирования в виде графика зависимости информационной энтропии от плотности сетки скважин. Как видно из графика, зависимость имеет вид логарифмической функции с высокой степенью детерминации.

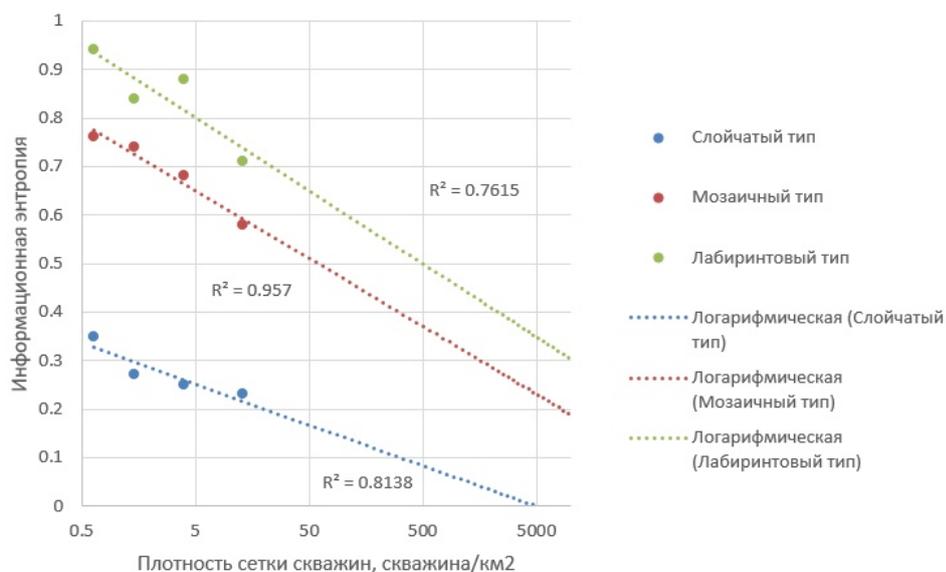


Рисунок 2.4 – Зависимость информационной энтропии систем разной архитектурной сложности от плотности сетки скважин (Кейс №1)

Как и ожидалось, неопределенность системы уменьшается при увеличении плотности сетки скважин, однако стоит следующие различия между зависимостями для моделей разной архитектурной сложности: при одной и той же плотности разбуривания резервуара, разными типами архитектур достигается разное значение информационной энтропии. Причем чем система сложнее, тем выше значение энтропии, что объясняется тем, что системы более высокой архитектурной сложности имеют большее разнообразие архитектурных форм и, соответственно, большую неопределенность в их возможном положении в межскважинном пространстве. Кроме того, более гетерогенная архитектура, как правило, состоит из-за архитектурных элементов меньшего размера, что так же влияет на гибкость в предсказании пространственного положения архитектурных единиц.

Полученные результаты подтверждают, что динамика снятия неопределенности системы напрямую зависит от её сложности, поскольку для более сложных систем требуется плотность сетки скважин для полного снятия неопределенности намного больше, чем для системы простой архитектуры резервуара. Таким образом, подтверждается применимость геостатистического

подхода к изучаемой проблеме – чем больше гетерогенность системы, тем больше информации нам требуется, чтобы её адекватно характеризовать.

Так же найдена зависимость между информационной энтропией и плотностью сетки скважин с высокой степенью детерминации. Как видно из Рисунка 2.5 вклад в снижение информационной энтропии системы становится меньше с повышением количества информации (скважин), что может быть учтено при экономическом планировании процесса исследования месторождения.

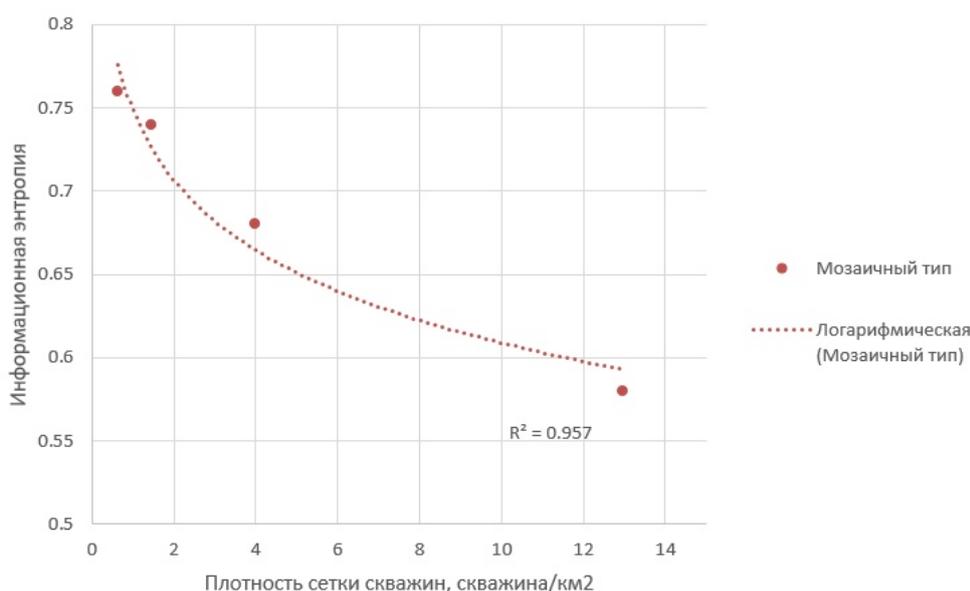


Рисунок 2.5 – Зависимость информационной энтропии от плотности сетки скважин для резервуара мозаичного типа (Кейс №1)

Однако открытым остается вопрос насколько точно требуется характеризовать систему, чтобы получить заданную степень уверенности в геологических запасах. Эта проблема была проанализирована в следующем кейсе.

2.3. Кейс 2. Влияние сложности архитектуры резервуара на уверенность в геологических запасах и морфологии резервуара в случае двухточечного моделирования

2.3.1. Цель и алгоритм кейса

Предыдущий кейс не являлся реалистичным, поскольку априорное распределение размеров тел и их пропорции, которые использовались для построения итерационных моделей, соответствовали истинной геологической модели. На практике процесс изучения месторождения всегда будет неотъемлемой частью его жизни и соответственно вопрос эффективности этого процесса является актуальным.

Целью данного кейса является симулирование процесса исследования месторождений разной архитектурной сложности в целях достижения геологических запасов итерационных моделей, равным истинным запасом ($\pm 10\%$), путем бурения скважин и получения информации о пропорциях фаций и их пространственном распределении внутри резервуара.

Прогнозируется, что для систем разной архитектурной сложности потребуется разное количество скважин для достижения знания корректных пропорций фаций и, соответственно, верных геологических запасов.

Вторым объектом исследования данного кейса (Рисунок 2.6) является процесс воссоздания морфологии резервуара путем бурения новых скважин и получения жесткой информации о пространственном расположении тел. Прогнозы остаются теми же – для системы сложной архитектуры потребуется большее количество скважин для воссоздания геометрии песчаных тел с той же уверенностью, что для систем простой архитектуры.

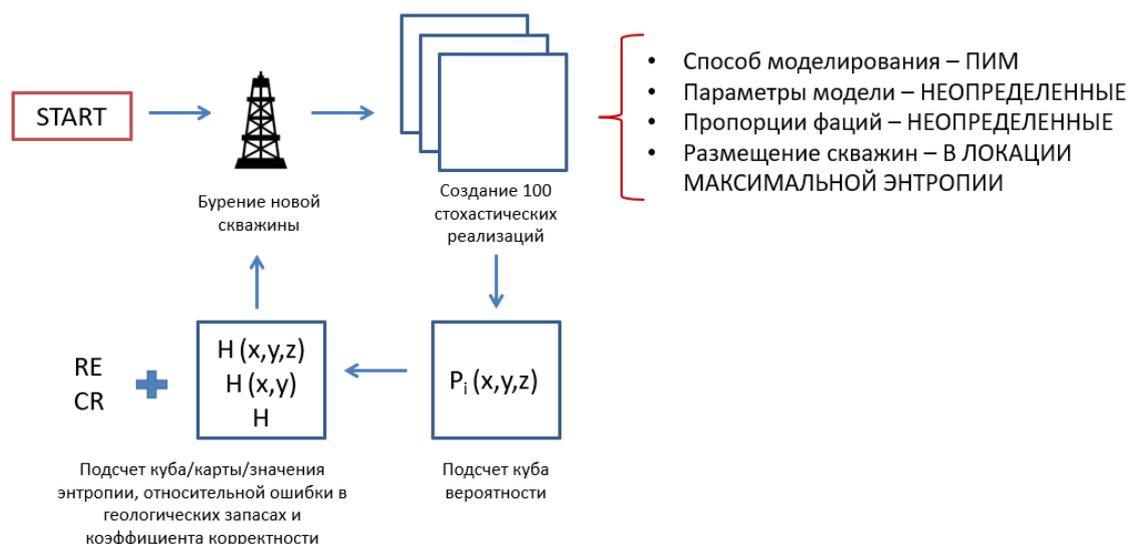


Рисунок 2.6 –Алгоритм кейса №2

2.3.2. – Параметры кейса

В данном кейсе в качестве истинных моделей выступают 2 геологических модели высокого разрешения с диаметрально разной архитектурной сложностью. Модели построены на основе характеристик геологического обнажения Book Cliffs, USA [30] и открытой геологической модели Stanford VI, предлагаемой Stanford University в целях проверки алгоритмов изучения резервуара [31]. Описание геологических моделей приведено в разделах 1.3.1-1.3.2.

Как утверждалось в разделе 1.5, появление информации в локации максимальной информационной энтропии влечет за собой максимальное снятие неопределенности. Другими словами, согласно теории информации бурение новой скважины в точку максимальной информационной энтропии является самым эффективным способом изучения системы. Поэтому при выборе локации для бурения новой скважины руководствовались принципом снятия максимального количества неопределенностей: при получении 2D карты информационной энтропии новая скважина бурилась в точку ее максимального значения.

При бурении новой скважины обновлялась информация о пропорциях фаций, на основе которой конструировались итерационные модели. Стохастические запасы итерационных моделей сравнивались с истинными геологическими запасами. В качестве проверочной функции выступало значение относительной ошибки RE, вычисляемой по Формуле 10.

Так же в процессе работы анализировалось поведение коэффициента корректности CR, который характеризует то, насколько точно итерационные модели повторяют пространственное распределение фаций истинной модели. Коэффициент корректности вычислялся по Формуле 9.

Поскольку в процессе геологического моделирования использовалось более двух фаций, максимальное значение информационной энтропии для системы составляло более 1 бита. Поэтому для удобства анализа состояния всей системы использовалось значение абсолютной информационной энтропии, вычисленной по Формуле 7.

2.3.3. Модель проградирующего побережья в условиях высокой волновой энергии

Модель резервуара низкой архитектурной неоднородности была построена на основе описания и характеристик обнажения Spring Canyon Mb, Book Cliffs, USA (Рисунок 2.7).

Отложения Book Cliffs были сформированы в раннем меловом периоде в условиях прибрежно-морской обстановки осадконакопления в процессе регрессии относительного уровня моря. Spring Canyon Member является самой древней пачкой формации Blackhawk, которая состоит из шести проградирующих парасеквенсов. Отложения пачки были проинтерпретированы как отложения побережья волнового типа [33].

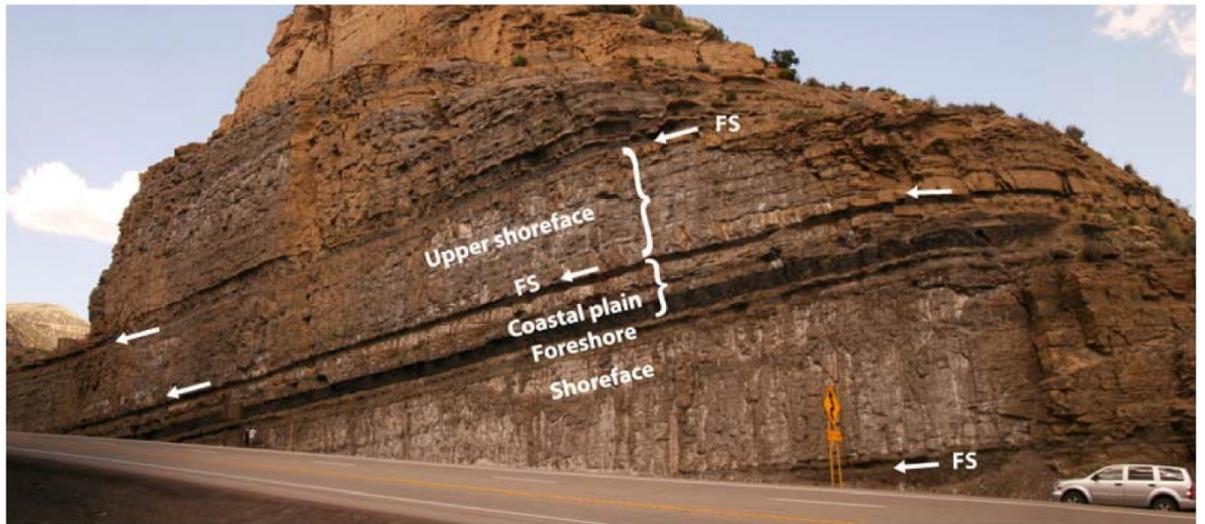


Рисунок 2.7 – Фото обнажения Spring Canyon Mb, Book Cliffs, USA [32]

Литостратиграфический разрез обнажения Book Cliffs представлен на Рисунке 2.8. На Рисунке 2.9 так же представлено внутреннее архитектурное строение моделируемого пласта.

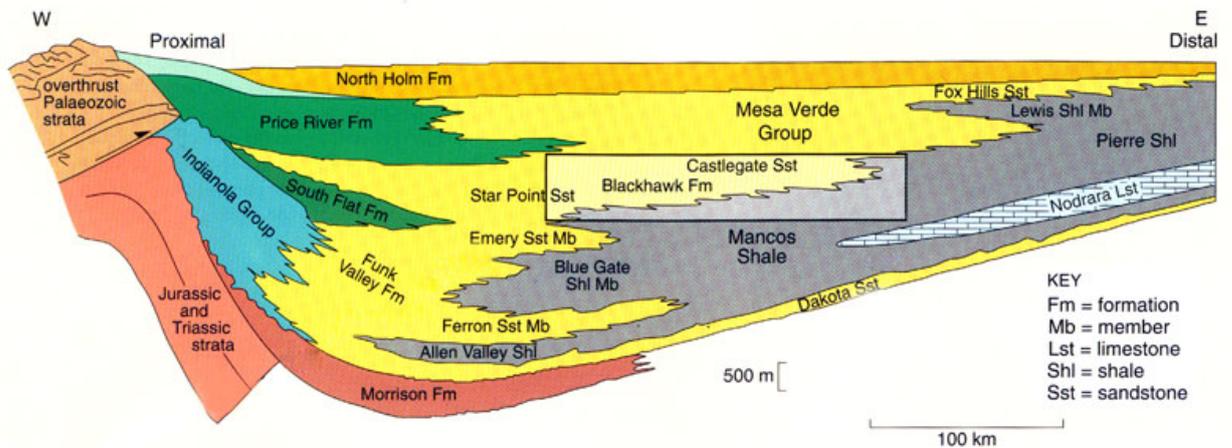


Рисунок 2.8 – Литостратиграфический разрез обнажения Book Cliffs

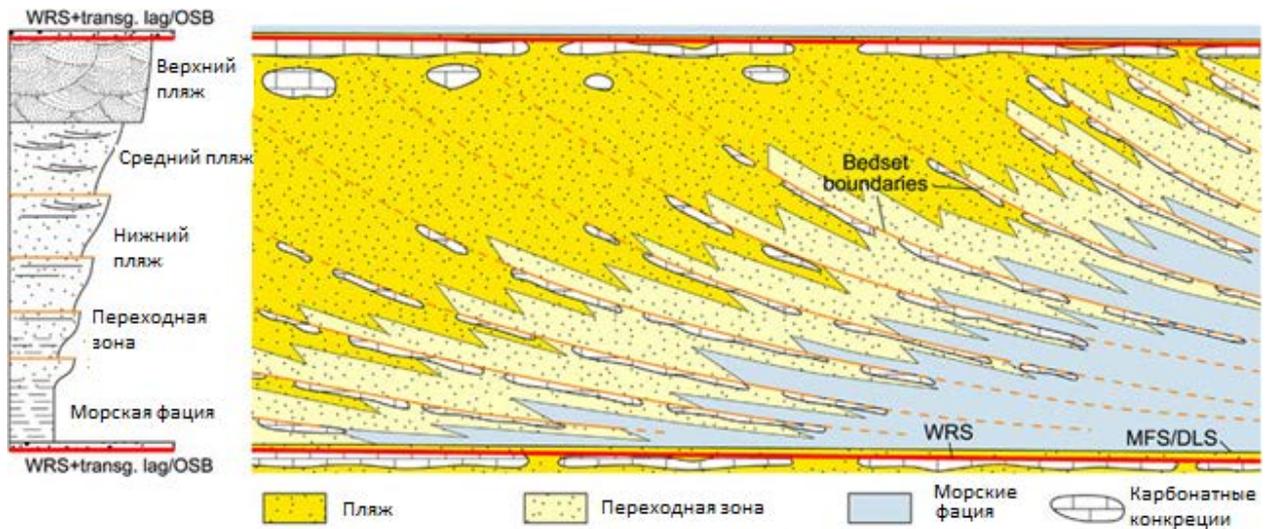


Рисунок 2.9 – Архитектурное строение парасеквенса Spring Canyon Member

Модель обнажения Book Cliffs была построена с помощью метода многоточечного моделирования (МММ) с использованием тренировочного изображения, воспроизводящего проградационный характер парасеквенсов (Рисунок 2.10).

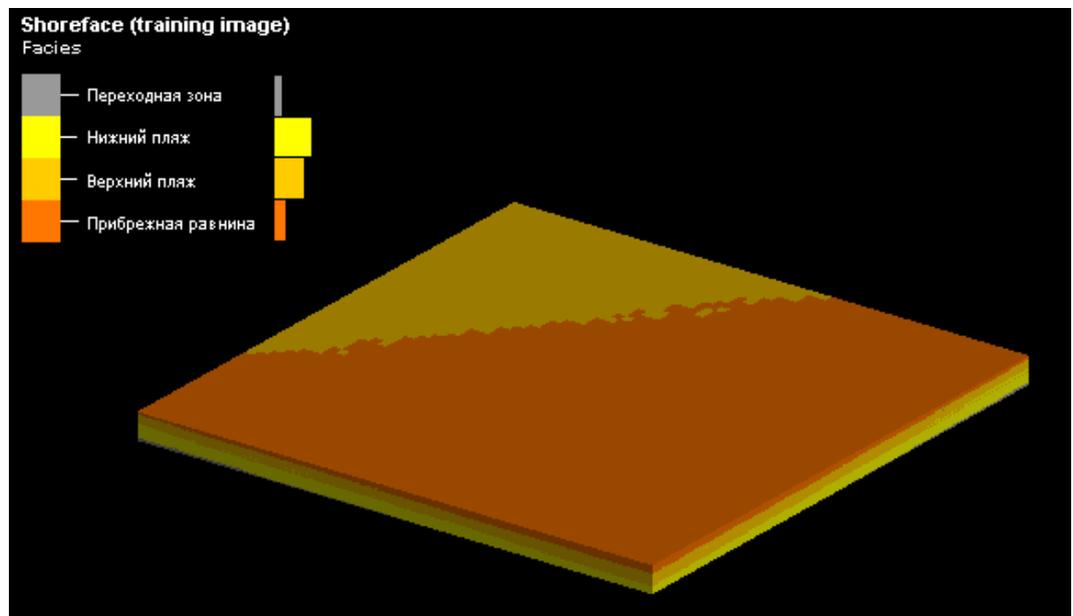


Рисунок 2.10 – Тренировочное изображения для моделирования отложений проградирующего побережья

Геологическая модель была поделена на три зоны для моделирования трех парасеквенсов отдельно (Рисунок. 2.11). Аградационный угол и толщины каждой фаций парасеквенса соответствовали геометрическим характеристикам, зафиксированным в описании обнажения (Таблица 2.4) [30].

Петрофизические характеристики моделируемых фаций представлены в Таблице 2.5.

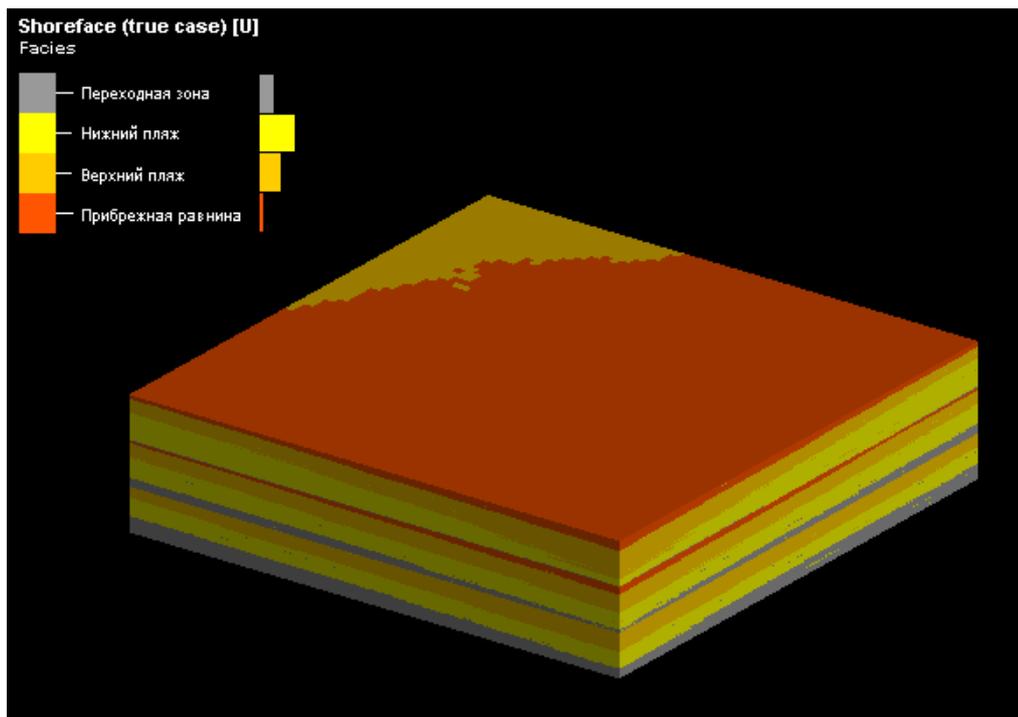


Рисунок 2.11– Модель отложений проградирующего побережья в условиях доминирования волновой энергии, принятая за истинную модель

Таблица 2.4 – Геометрические характеристики обнажения проградирующего побережья

Название обнажения	Угол аградации	Толщина фации, м				Коэффициент песчанности
		Тыловая часть пляжа	Верхний пляж	Нижний пляж	Переходная зона	
Spring Canyon Mb, Book Cliffs, USA	0,07 ⁰	0,5	8,32	19,1	5,35	41%

Таблица 2.5 – Петрофизические параметры отложений проградирующего побережья в условиях доминирования волновой энергии

Фация	Коэффициент песчанности	Пористость
Переходная зона	0%	0%
Нижний пляж	100%	20%
Верхний пляж	100%	15%
Прибрежная равнина	0%	0%

2.3.4. Модель речной системы меандрирующего типа

Для воспроизведения резервуара высокой архитектурной сложности была сконструирована геологическая модель отложений речной системы меандрирующего типа на основе модели Stanford VI, параметры которой представлены в Таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Геометрические характеристики геологической модели Stanford VI

Геометрический параметр	Распределение	Min	Mean	Max
Амплитуда изгиба канала	Треугольное	900	1080	1150
Ширина изгиба канала	Треугольное	1100	1500	1700
Ширина канала	Треугольное	150	300	450
Глубина канала	Треугольное	10	15	20

Конструирование геологической модели было произведено с помощью объектного моделирования (Рисунок 2.12). Поскольку в ПО Petrel 2019 не предусмотрено моделирование прирусловых валов, они были созданы с помощью метода улучшения геологического реализма объектного моделирования [34].

Используемые петрофизические параметры приведены в Таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Петрофизические параметры отложений речной системы меандрирующего типа

Фация	Коэффициент песчаности	Пористость
Пойменные отложения	0%	0%
Прирусловой вал	100%	20%
Береговой вал	100%	10%
Стержень канала	100%	15%
Заброшенный канал	0%	0%

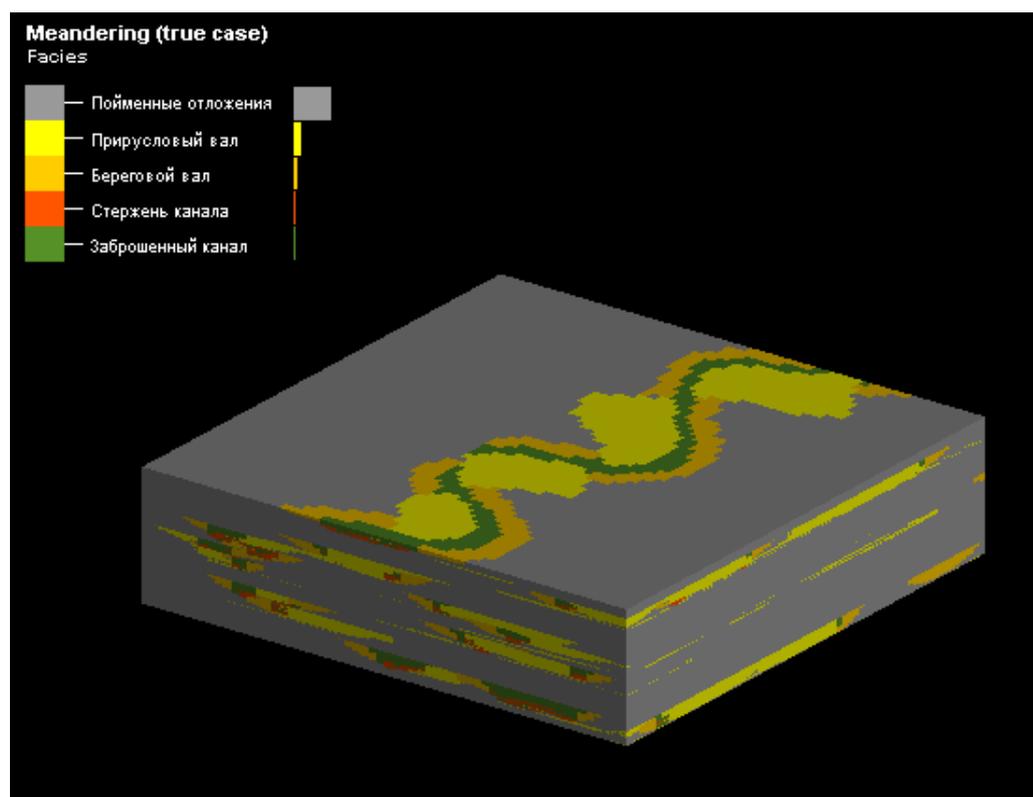


Рисунок 2.12 – Модель отложений речной системы меандрирующего типа, принятая за истинную модель

2.3.5. Конструирование итерационных моделей

Итерационные геологические модели конструировались «классическим» методом последовательного индикаторного моделирования (ПИМ). Значения параметров вариограмм были выбраны с учетом возможных размеров геологических тел. Поскольку точные размеры архитектурных единиц были неизвестны, ранги вариограмм, используемые при синтезе итерационных моделей, задавались с неопределенностью.

2.3.6. Анализ полученных результатов

На Рисунках 2.13 и 2.14 приведены значения геологических запасов итерационных моделей сложной и простой архитектур при последовательном бурении новой скважины. Стоит отметить, что при малом количестве информации о пропорциях фаций в системе (при бурении первых разведочных скважин) геологических запасы могут быть, изначально как переоценены, так и недооценены.

Согласно Рисункам 2.13 и 2.14 нужный уровень уверенности в подсчете геологических запасов достигается при бурении 2 и 30 скважины для систем простой и сложной архитектуры резервуара соответственно. Таким образом, нужный уровень корректности геологических запасов достигается для разных обстановок осадконакопления при разном количестве скважин.

Вышесказанное подтверждает гипотезу о том, что при более сложной архитектурной строении резервуара требуется большее количество информации (скважин) для достижения такой же степени уверенности в оценке геологических запасов, как в случае простой системы.

Следуя принципу снятия максимального количества неопределенности, скважины бурились, достигая равномерного покрытия. Особенно это заметно в случае геологической модели флювиальных осадков.

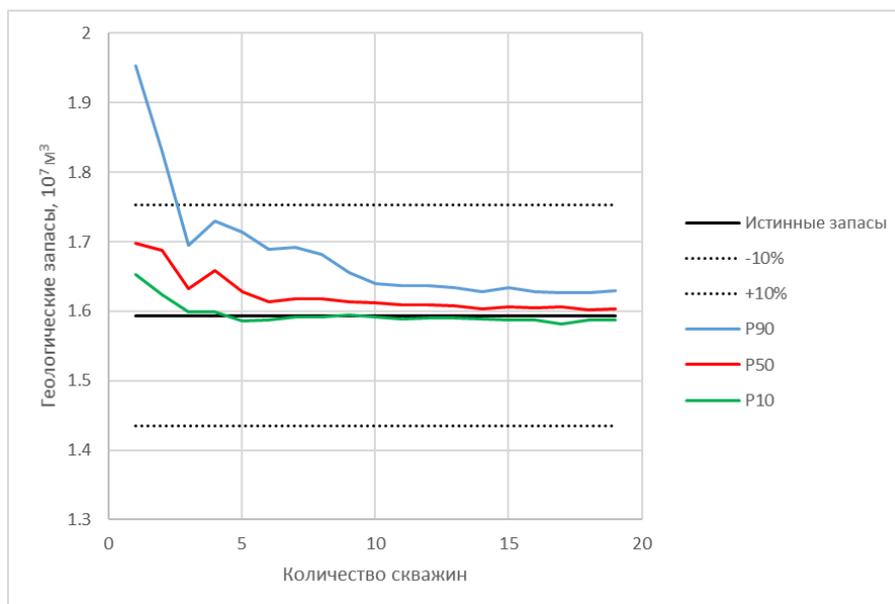


Рисунок 2.13 – Геологические запасы P10-P90 резервуара простой архитектуры (Кейс №3)

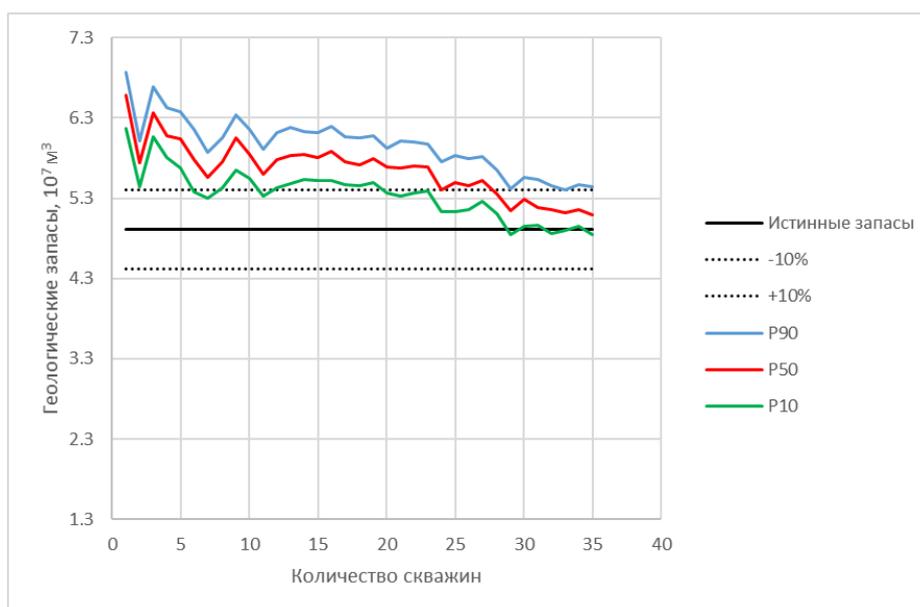


Рисунок 2.14 – Геологические запасы P10-P90 резервуара сложной архитектуры (Кейс №3)

На Рисунке 2.15 приведены значения нормированной абсолютной информационной энтропии геологических моделей. Как и ожидалось, значение информационной энтропии снижалось при добавлении новой информации. Следует повторить, что как истинная, так и итерационные модели были

сконструированы без каких-либо трендов, которые могли бы внести нестационарность в пропорциях фаций и размер геологических тел. Условие архитектурной стационарности является ключевым условием для возможности сравнение двух обстановок осадконакопления.

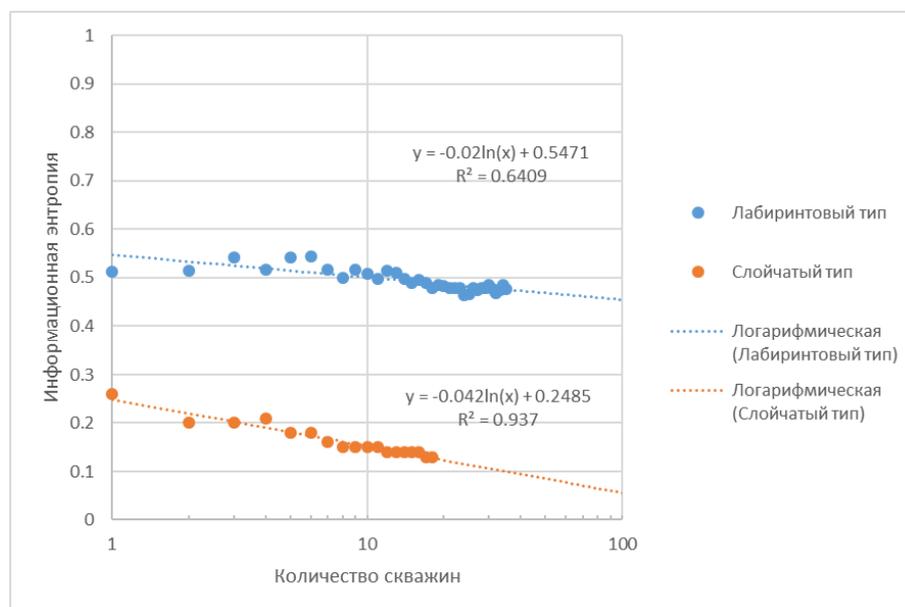


Рисунок 2.15 – Зависимость информационной энтропии систем разной архитектурной сложности от количества скважин (Кейс №2)

На Рисунке 2.16 изображена зависимость между информационной энтропией системы и относительной ошибкой в оценке геологических запасов для разных типах архитектур резервуара. Между анализируемыми параметрами была обнаружена линейная зависимость с хорошим коэффициентом детерминации.

Согласно Рисунку 2.16 при уменьшении информационной энтропии системы, уменьшается и относительная ошибка в оценке геологических запасов. При этом для разной сложности архитектуры резервуара значение относительной ошибки равной нулю достигается при разном значении информационной энтропии (Таблица 2.8). Это можно объяснить тем, что резервуар сложной архитектуры строения в целом имеет большее значение информационной энтропии системы, как это было показано в Разделе 2.2.3.

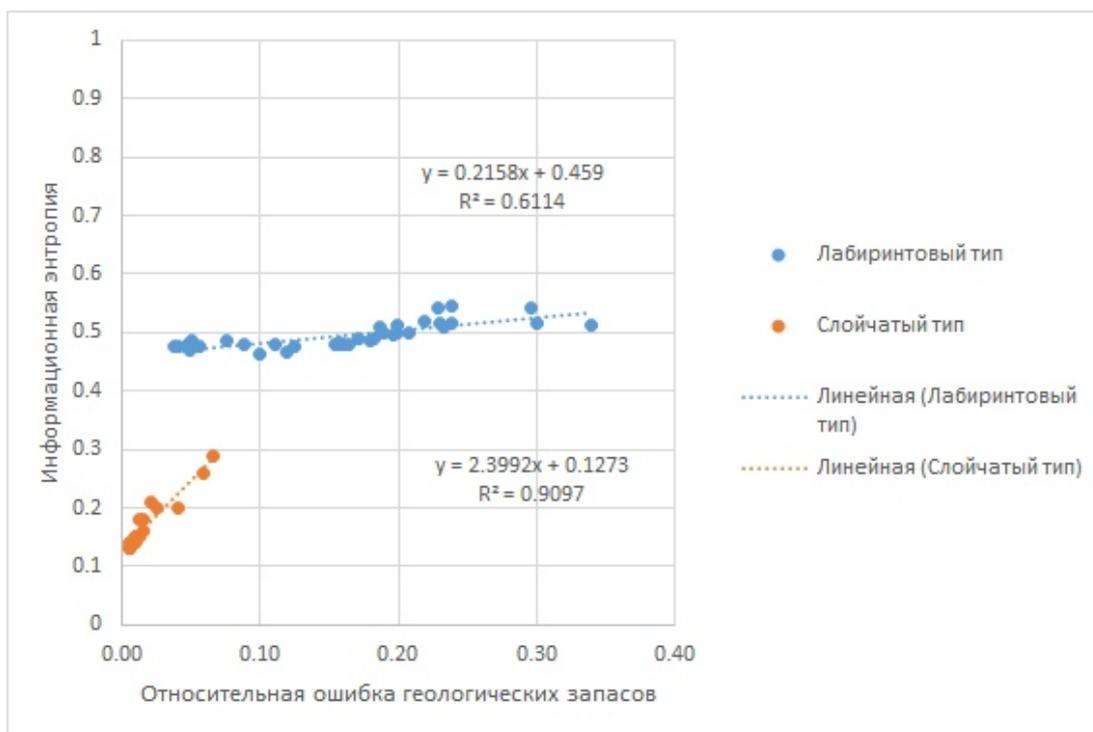


Рисунок 2.16 – Зависимость относительной ошибки в подсчете геологических запасов от информационной энтропии (Кейс №2)

Таблица 2.8 – Значение информационной энтропии для достижения желаемого уровня уверенности в геологических запасах (Кейс №2)

№	Тип архитектуры	Относительная ошибка в подсчете геологических запасов	Информационная энтропия
1	Слойчатый	0	0,127
2	Лабиринтовый	0	0,462

Однако важно заметить, что главным отличием зависимостей разных обстановок осадконакопления является угол наклона прямой на Рисунке 2.16. Очевидно, что уменьшение информационной энтропии резервуара лабиринтового типа вносит меньший вклад в уменьшение относительной ошибки RE, чем в случае резервуара слойчатого типа.

На основе зависимостей, представленных на Рисунке 2.15 и 2.16, было предсказано количество скважин, требуемое для достижения той или иной

степени уверенности в геологических запасах. Поскольку ранее отмечалось, что в процессе исследования резервуара разведочные скважины бурились, равномерно покрывая всю площадь, количество скважин в геологической модели площадью 9 км² было пересчитано в плотность сетки скважин.

Таблица 2.9 – Значение плотности сетки скважин для достижения желаемого уровня уверенности в геологических запасах (Кейс №2)

№	Тип архитектуры	Относительная ошибка в геологических запасах	Информационная энтропия	Количество скважин в 9 км ²	Плотность сетки скважин, скважина/км ²
1	Слойчатый	0,0	0,127	17	1,89
		0,05	0,247	2	0,23
2	Лабиринтовый	0,0	0,459	51	5,67
		0,05	0,470	35	3,89
		0,1	0,480	25	2,70

Согласно результатам (Таблица 2.9) при бурении рядной схемой с одинаковым межскважинным расстоянием для 100% уверенности в геологических запасах (RE=0) потребуется дистанция между скважинами не более 400 метров, а для 90% уверенности – 600 метров. В некоторых случаях такие расстояния реальны, однако, возможно, данные сейсмической съемки частоты, способной отличать одну фацию от другой и предсказывать их пространственное расположение, заметно улучшило бы результаты.

На Рисунке 2.17 представлена зависимость между информационной энтропией системы и коэффициента корректности. Как видно из графика для каждой из системы можно описать поведение коэффициента корректности при добавлении новой скважины (скважины) с помощью логарифмической функций с очень хорошим коэффициентом корреляции.

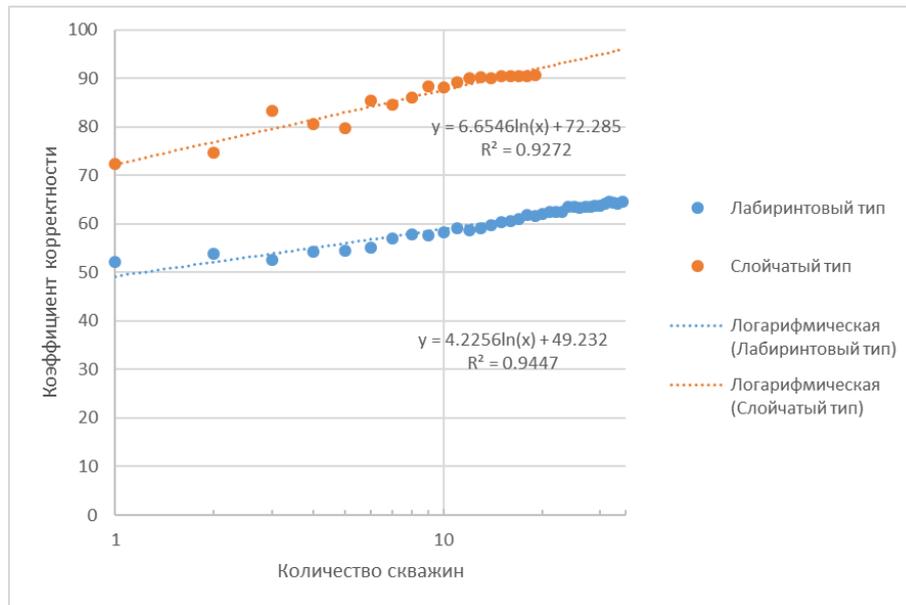


Рисунок 2.17 – Зависимость коэффициента корректности от количества скважин (Кейс №2)

Между информационной энтропией системы и коэффициентом корректности была найдена линейная связь, представленная на Рисунке 2.18. Эта связь еще раз доказывает, что параметр энтропии способен адекватно оценивать изученность геологической модели.

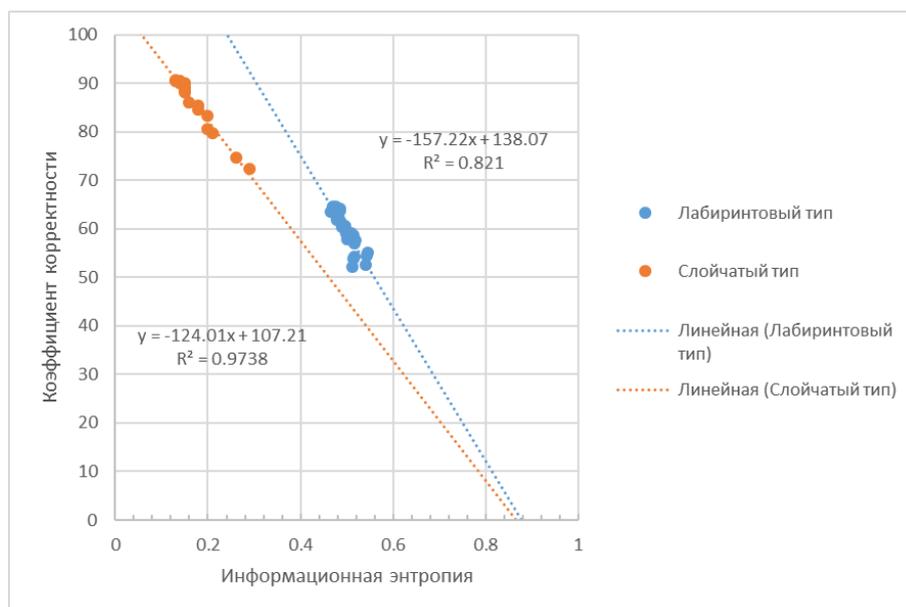


Рисунок 2.18 – Зависимость коэффициента корректности от информационной энтропии (Кейс №2)

На основе зависимостей на Рисунках 2.15 и 2.18 для обеих геологических моделей была рассчитана теоретическая плотность сетки скважин, требуемая для той или иной степени уверенности в морфологии резервуара (Таблица 2.10).

На основе этих результатов можно сделать вывод, что в случае сложного архитектурного строения резервуара предсказание точной морфологии песчаных тел требует слишком большое количество информации (скважин). Для полной изученности системы расстояние между скважинами должно соответствовать 3 метрам, а для достижения 90% значения коэффициента корректности потребуется расстояние около 12 метров.

Таблица 2.10 – Значение плотности сетки скважин для достижения желаемого уровня уверенности в знании морфологии резервуара (Кейс №2)

№	Тип архитектуры	Коэффициент корректности	Количество скважин в 9 км ²	Плотность сетки скважин, скважина/км ²
1	Слойчатый	100	80	8,92
		90	14	1,63
		80	2,67	0,30
2	Лабиринтовый	100	1 068 678	118 742
		90	6 923	6 991
		80	3 705	411

Решением данной проблемы, возможно, является следующее:

1. добавление геологического реализма при моделировании итерационных моделей, что рассмотрено в следующем кейсе (Раздел 2.4);
2. добавление нового источника информации, способного предсказать морфологию и/или пространственное распределение фаций внутри резервуара (например, высокочастотная сейсмическая съемка или гидродинамическое прослушивание пласта).

2.4. Кейс №3. Влияние сложности архитектуры резервуара на уверенность в геологических запасах и морфологии резервуара в случае многоточечного моделирования

2.4.1. Цель и алгоритм кейса

Предыдущий кейс продемонстрирован неэффективность повышение уверенности в подсчете геологических запасах и знании морфологии резервуара при применении предложенного алгоритма разбуривания и моделирования итерационных моделей

Однако, как утверждать в Разделах 1.1.2-1.1.3, в случае систем сложной архитектуры одним из ключевых факторов в предсказании морфологии резервуара является знание геологических процессов и геометрии архитектурных единиц, сформировавшиеся под воздействием этих процессов. Таким образом, утверждается, что добавление информации о геологическом реализме в систему позволит быстрее достичь желаемой уверенности в знании геологических запасов и морфологии резервуара по сравнению с предыдущим кейсом.

Объектом исследования данного кейса является геологическая модель отложений речной системы меандрирующего типа, описанной в Разделе 2.3.4. Опробование алгоритма (Рисунок 2.19) было произведено на истинной геологической модели, используемой в кейсе №2.

Целью данного кейса является улучшение методики получения новой информации для системы высокой архитектурной сложности путем привноса геологического реализма при конструировании итерационных геологических моделей. Поскольку метод последовательного индикаторного моделирования не способен передать сложную морфологию архитектурных единиц резервуара и их вероятное пространственное расположение относительно друг друга, было принято решение перейти к методу многоточечного моделирования с использованием тренировочных изображений, отображающих потенциально возможное строение резервуара.

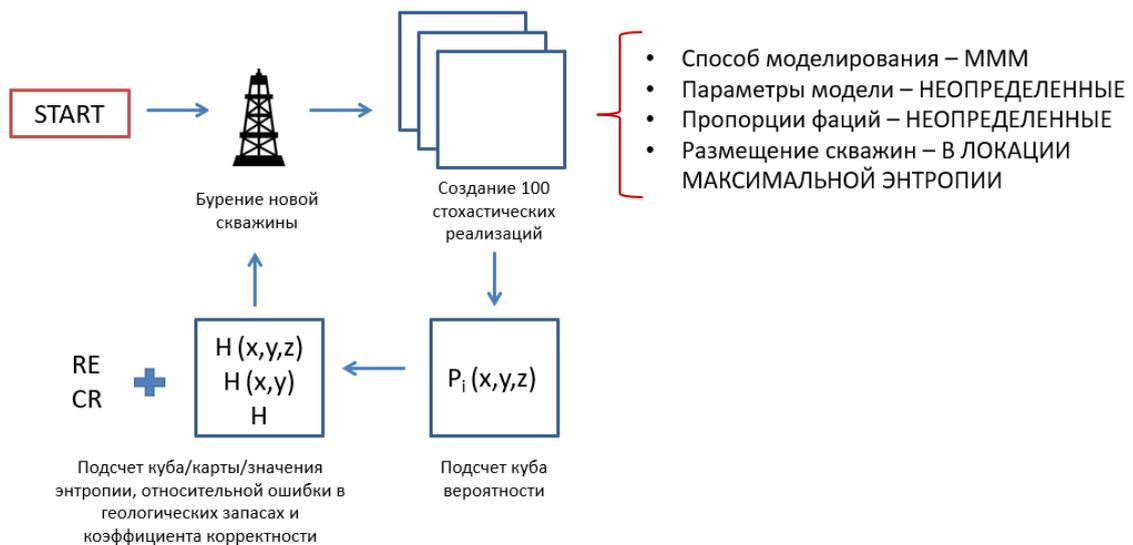


Рисунок 2.19 – Алгоритм кейса №3

Прогнозируется, что данный метод моделирования позволит добавить в систему дополнительную информацию о возможном пространственном расположении фаций. Предполагается, что это способствует более точному прогнозированию архитектурного строения резервуара, что, в итоге, приведет к следующим результатам:

1. Улучшение динамики повышения коэффициента корректности CR;
2. Улучшение динамики понижения относительной ошибки в подсчете геологических запасов RE;
3. Улучшение тактики определения локаций с максимальным значением неопределенности (информационной энтропии).

2.4.2. Параметры кейса

Кейс №3 полностью повторяет технические особенности кейса №2 за исключением метода конструирования итерационных моделей, описанных в Разделе 2.4.3. Для чистоты эксперимента локация первой разведочной скважины осталась такой же, как и в предыдущем кейсе.

2.4.3. Конструирование итерационных моделей

Чтобы внести геологический реализм с учетом геологической неопределенности были созданы три тренировочных модели, на основе которых конструировались итерационные модели (Рисунок 2.20-2.22). Поскольку единственно возможной оцениваемой геометрической характеристикой при бурении скважины является толщина фаций, для конструирования тренировочных изображений были использованы эмпирические уравнения, связывающие толщину канала и латеральные размеры флювиальных тел [35].

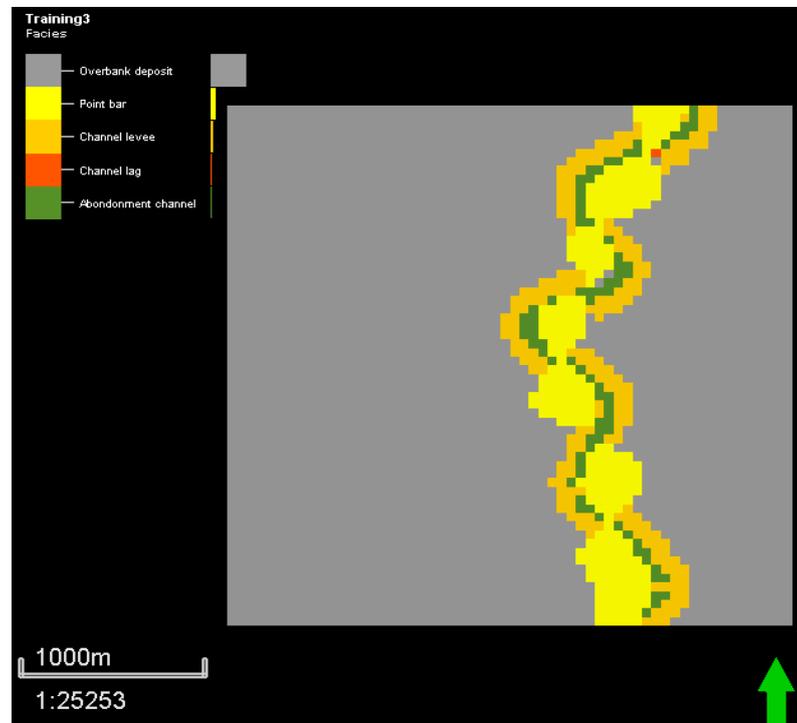


Рисунок 2.20 – Тренировочное изображение №1 для моделирования отложений речной системы меандрирующего типа

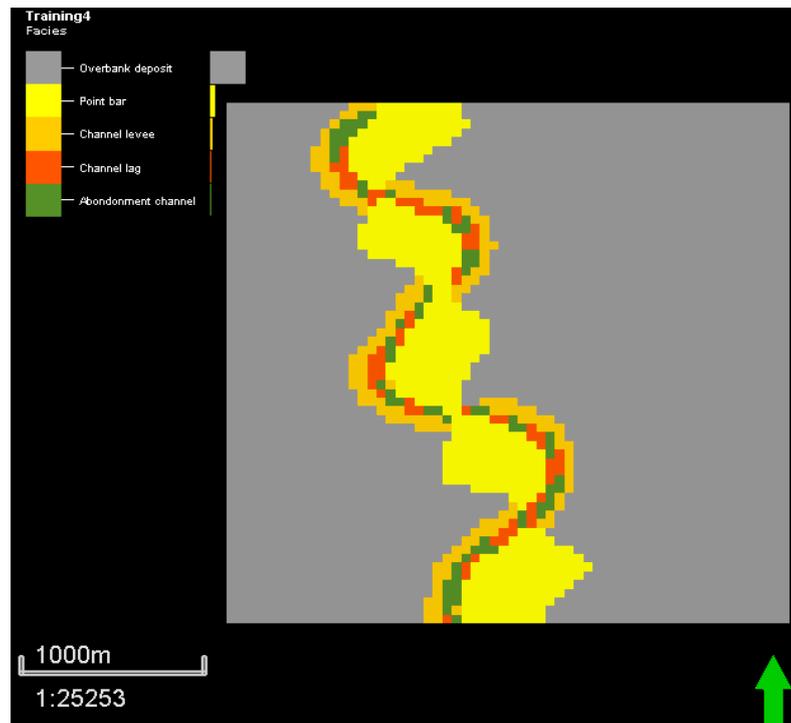


Рисунок 2.21 – Тренировочное изображение №2 для моделирования отложенной речной системы меандрирующего типа

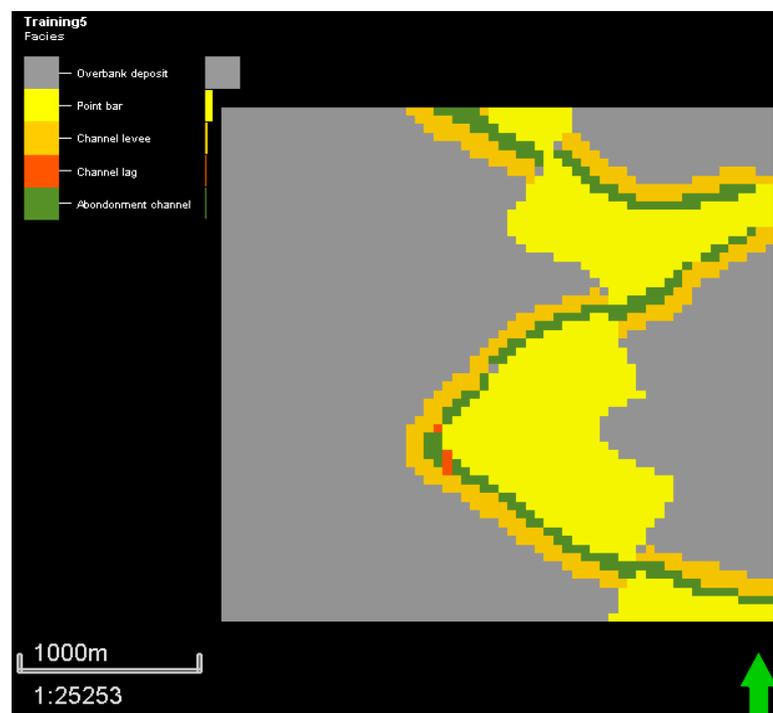


Рисунок 2.22 – Тренировочное изображение №3 для моделирования отложенной речной системы меандрирующего типа

2.4.4. Анализ полученных результатов

На Рисунке 2.23 приведены значения геологических запасов итерационных моделей сложной архитектуры, построенных по методу МММ. Согласно этому графику, требуемая уверенность в оценке геологических запасов достигается уже после бурения 7-й скважины. Таким образом, применение данного метода моделирования улучшило динамику снятия неопределенности системы, что подтверждается Рисунком 2.24, согласно которому нормированная абсолютная информационная энтропия изучаемой системы падает быстрее с появлением новой скважины в случае включения геологического реализма путем моделирования методом МММ по сравнению с классическим методом ПИМ.

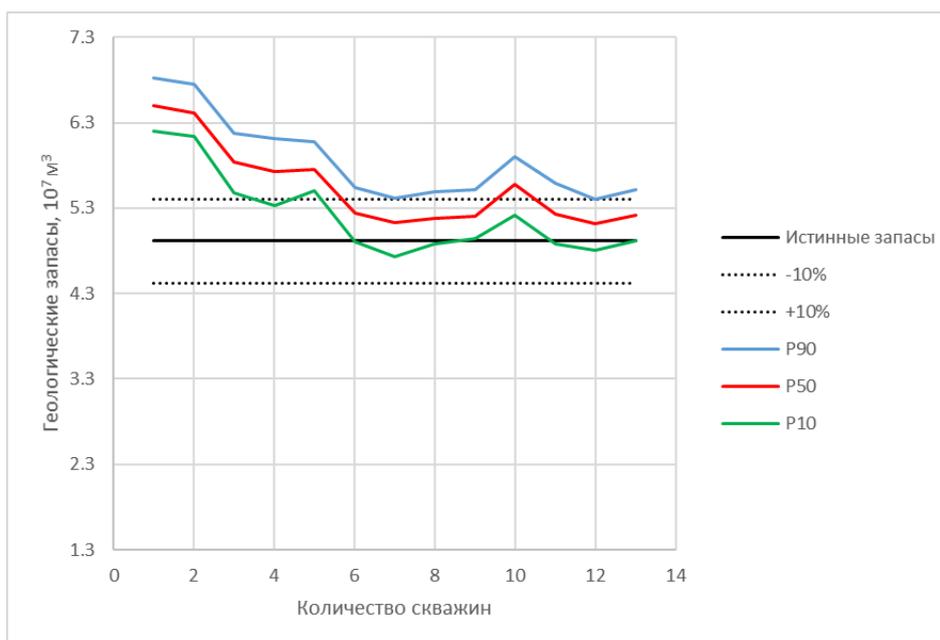


Рисунок 2.23 – Геологические запасы P10-P90 резервуара сложной архитектуры (Кейс №3)

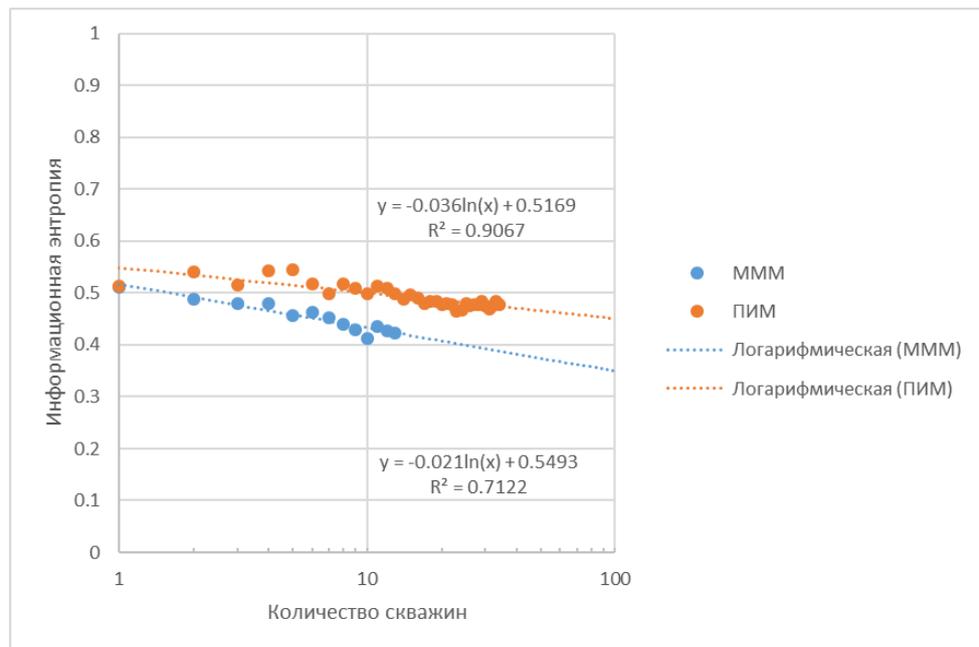


Рисунок 2.24 – Зависимость информационной энтропии систем разной архитектурной сложности от количества скважин (Кейс №3)

На Рисунке 2.25 представлена зависимость между информационной энтропией системы и относительной ошибкой в подсчете геологических запасов для случая моделирования методом МММ и ПИМ соответственно. Как видно из графика, динамика изменения относительной ошибки с уменьшением информационной энтропии осталась такой же, однако в случае применения метода моделирования МММ требуемый уровень информационной энтропии для достижения значения относительной ошибки равной нулю снизился.

Таким образом, можно заключить, что добавление геологического реализма в построение итерационных моделей значительно улучшило как динамику снятия неопределенности системы, так и требуемое значение изученности системы для достижения желаемого уровня уверенности в геологических запасах (Таблица 2.11)

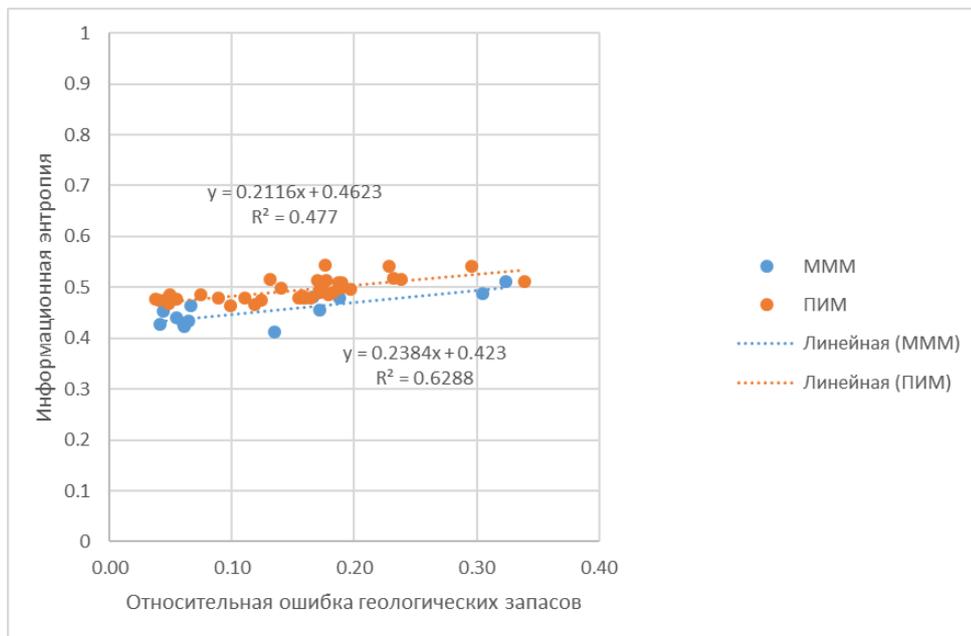


Рисунок 2.25 – Зависимость относительной ошибки в подсчете геологических запасов от информационной энтропии (Кейс №3)

На Рисунке 2.26 так же приводится зависимость информационной энтропии системы от коэффициента корректности, который выражает уверенность в знании морфологии резервуара. Для сравнительного анализа зависимости представлены так же для случая моделирования итерационных моделей с учетом геологического реализма (MMM) и без его учета (ПИМ). Согласно этим графикам, можно так же заключить, что привнос информации о возможном строении резервуара так же значительно улучшает динамику повышения уверенности в знании архитектурного строения резервуара по сравнению с результатами предыдущего кейса, хотя требуемая плотность сетки скважин все равно остается нереалистичным для выполнения условием (Таблица 2.12).

Таблица 2.11 – Значение плотности сетки скважин для достижения желаемого уровня уверенности в геологических запасах (Кейс №3)

№	Тип архитектуры	Метод моделирования	Относительная ошибка в геологических запасах	Информационная энтропия	Плотность сетки скважин, скважина/км ²
1	Лабиринтовый	ПИМ	0	0,459	5,67
			0,05	0,470	3,89
			0,1	0,480	2,70
2	Лабиринтовый	МММ	0	0,423	1,36
			0,05	0,435	1,00
			0,1	0,447	0,74

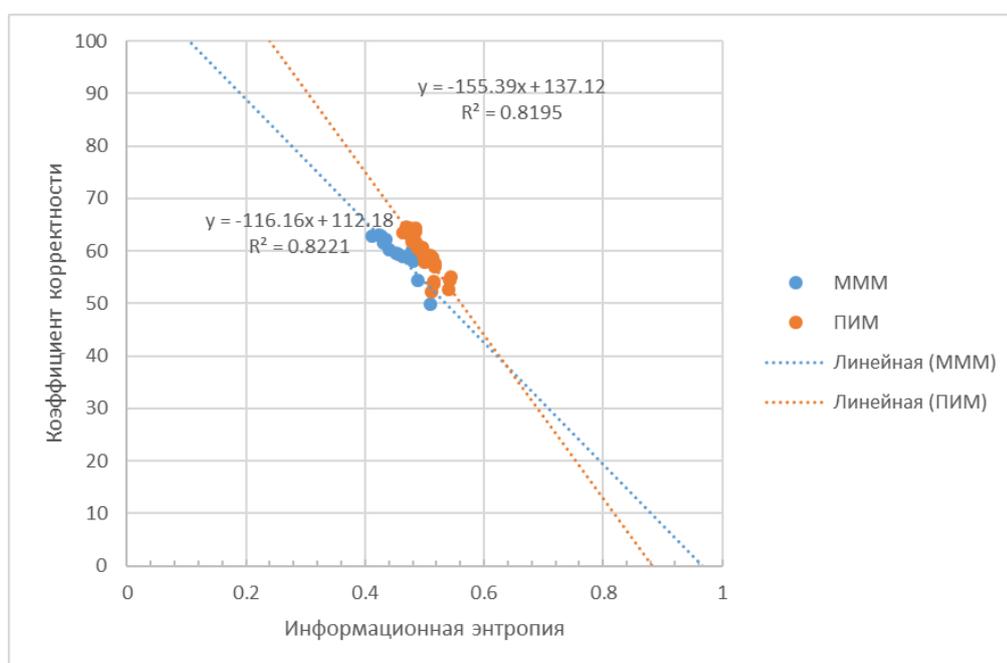


Рисунок 2.26 – Зависимость коэффициента корректности от информационной энтропии (Кейс №3)

Таблица 2.12 – Значение плотности сетки скважин для достижения желаемого уровня уверенности в знании морфологии резервуара (Кейс №3)

№	Тип архитектуры	Метод моделирования	Коэффициент корректности	Информационная энтропия	Плотность сетки скважин, скважина/км ²
1	Лабиринтовый	ПИМ	100	0,23	118 742
			90	0,30	6 991
			80	0,36	411
2		МММ	100	0,10	3 795
			90	0,19	443
			80	0,27	51

Таким образом, можно сделать вывод, что добавление априорной информации о геологическом реализме при оценке геологических запасов систем сложной архитектурной сложности значительно улучшает показатели корректности подсчета геологических запасов и знания морфологии резервуара, что подтверждает выдвинутые предположения в Разделах 1.1.2 и 1.1.3.

3 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ

Как было показано в Главе 2 значение информационной энтропии имеет достоверную корреляцию с относительной ошибкой в подсчете геологических запасов и (Рисунок 2.16) и коэффициентом корректности (Рисунок 2.18), которые характеризуют уверенность в соотношении пропорций фаций и, соответственно, геологических запасах и морфологии резервуара. Несмотря на то, что эти параметры не могут быть рассчитаны в реальной жизни, поведение информационной энтропии при добавлении новой информации в условиях архитектурной стационарности исследуемого объекта (Пункт 2 Раздела 2.1) всегда в среднем будет вести к повышению уверенности в его знании.

Однако если в начале жизни месторождения невозможно оценить вклад новой информации в повышение уверенности в знании геологических запасов и морфологии резервуара, то все же остается возможным оценить стоимость уменьшения неопределенности системы.

Согласно проведенным исследованиям, информационная энтропия имеет вид логарифмической функции в зависимости от количества информации (скважин). Согласно природе логарифмической зависимости (Рисунок 3.1) вклад каждой последующей скважины в снижение информационной энтропии становится меньше.

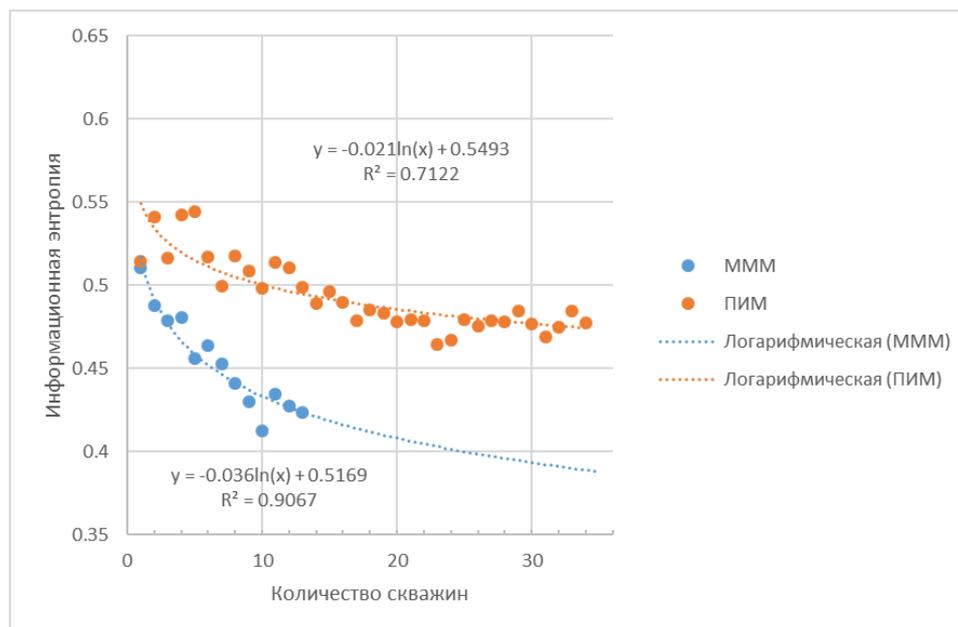


Рисунок 3.1 – Зависимость информационной энтропии от количества информации (скважин)

На ранних стадиях разработки возможно оценить значение информационной энтропии так же легко как стохастические геологических запасы. Поскольку энтропия является свойством не самой системы, а знания системы, то её поведение может позволить спрогнозировать стоимость среднего уменьшения неопределенности системы при бурении новой скважины в зоне предполагаемой архитектурной стационарности.

Рассмотрим 3 шага исследования геологической модели флювиальных отложений, построенным методом МММ: после бурение 4, 8 и 12 скважин. На Рисунке 3.2 приведены значения информационной энтропии системы, а так же линии тренда, построенные на основе 4, 8 и 12 значений.

По полученным после бурения трендам оценивался средний вклад в снижение неопределенности планируемой скважины (5, 6 или 13) и разница между прогнозируемым и фактическим значением. Согласно результатам (Таблице 3.1) вклад в снижение информационной энтропии бурением 5 разведочной скважины значительно превышает вклад бурением 8 или 13 скважины.

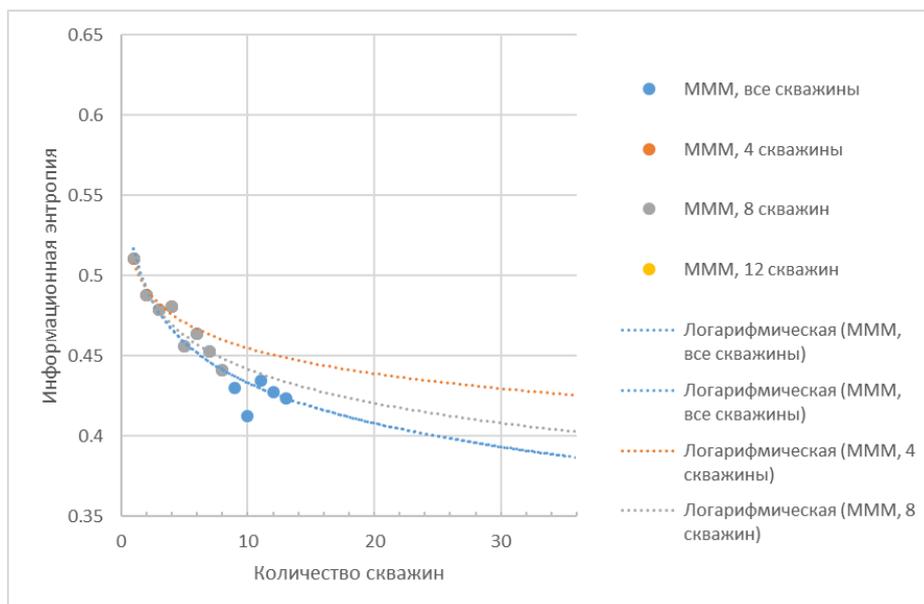


Рисунок 3.2 – Линии тренда зависимости информационной энтропии от количества информации (скважин), построенные на основе всех данных, 4, 8 и 12 скважин

Таблица 3-1 – Прогнозируемые вклад в снятие неопределенности системы при бурении новых скважин

№	Новая скважина	Прогнозируемое снижение информационной энтропии	Фактическое снижение информационной энтропии	Ошибка в прогнозировании значения
1	5	0.021	0.025	0,004
2	9	0.003	0.010	0.007
3	13	0.002	0.004	0.002

Таким образом, оценивая динамику поведения информационной энтропии, изменяющейся пределах от 0 до 1, можно спрогнозировать потенциальное снижение информационной энтропии при бурения новой разведочной скважины.

При наличии информации о стоимости геологоразведочных работ возможно так же спрогнозировать их ценность. Рассмотрим данный аспект на там же примере бурения новой разведочной скважины с проведением по-

следующих геологоразведочных работ по определению фациального строения резервуара с оценочной стоимостью 100 000 000 рублей. Как видно из Таблицы 3.2 ценность каждой последующей геологоразведочной работы, вычисленная как площадь под графиком на Рисунке 3.3, уменьшается. Таким образом, можно заключить, что ценность проведения геологоразведочных работ падает с количеством новой информации.

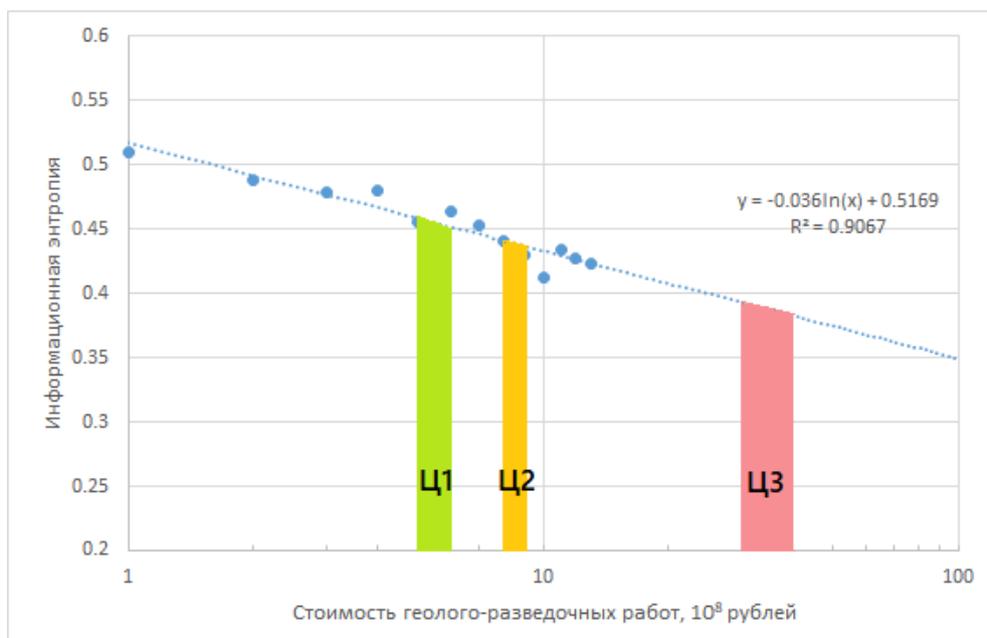


Рисунок 3.3 – Зависимость информационной энтропии от стоимости геологоразведочных работ

Таблица 3.2 – Ценность проведения геологоразведочных работ

№	Новая скважина	Прогнозируемое снижение информационной энтропии	Стоимость проведения геологоразведочных работ	Ценность проведения геологоразведочных работ (Ц)
1	5	0.021	100 000 000	2 100 000
2	9	0.003	100 000 000	300 000
3	13	0.002	100 000 000	200 000

4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Данный раздел соответствует требованиям нормативных документов и законодательству об охране окружающей среды. В данном разделе рассмотрены основные источники влияния на недра при бурении разведочных и эксплуатационных скважин [36].

При планировании хозяйственной деятельности в пределах водоохраняемой зоны водных объектов необходимо соблюдать мероприятия по предотвращению загрязнения и истощения вод.

При планировании бурения новых скважин учитываются водоохраняемые зоны водных объектов. Прокладка инженерных сетей в единой отведенной полосе, строительство кустов и эксплуатационных скважин позволит сократить негативное воздействие и сконцентрировать его в строго выделенной области.

Следующие работы подразумевают негативный эффект на недра в процессе разработки месторождения: перфорация водо- и нефтенасыщенных продуктивных пластов преимущественно добывающими, нагнетательными и водозаборными скважинами. В процессе заканчивания скважин возможно загрязнение буровым раствором и его составляющими, закачка воды в продуктивные интервалы. При строительстве негативно влияет такой фактор, как изъятие грунта для строительства площадок и дорог [37].

При строительстве и эксплуатации скважин основным негативным фактором является поступление углеводородов и пластовых вод в водоносные горизонты в результате перетоков по затрубю вследствие некачественного цементирования скважин, нарушении целостности обсадных колон и/или несоответствии конструкции скважин требованиям и целям.

Строительство эксплуатационных и разведочных скважин влечет за собой загрязнение подземных водных объектов, проявляющееся в поглощение составляющих частей бурового раствора, обвала стенок скважин, перелив воды и др.

При строительстве и бурении скважин образуются отходы, такие как шлам, буровой раствор, сточные буровые воды, являющиеся основными загрязняющими агентами.

4.1. Буровые работы

В процессе буровых работ наибольшему негативному воздействию подвергаются зоны вокруг скважин в приповерхностных условиях и воды подземных горизонтов в глубинных условиях [36].

С целью сокращения перетока нефти в процессе строительства и эксплуатации скважин в проницаемые водонасыщенные породы в скважинах должны быть предусмотрены мероприятия по спуску кондуктора для отсечения механически неустойчивых отложений. Так же разобщение водоносных горизонтов должно производиться посредством спуска эксплуатационной колонны. Для обеспечения высоких изоляционных способностей должно быть проведено цементирование всех обсадных колонн. Гидравлические испытания определяют качество крепления скважин. Предусмотренные конструкции и технологии строительства скважин мнут обеспечить надежную герметизацию водо- и нефтеносных горизонтов, что позволит предотвратить межпластовые перетоки и загрязнение подземных вод.

Для того, чтобы рационально и эффективно использовать недра, а также охранять недра от негативного воздействия должен предусматриваться ряд мер, включающих в себя установку противовыбросового оборудования на случай возможного фонтанирования скважин и последующего загрязнения окружающей среды при бурении скважины под эксплуатационную колонну и хвостовик, изоляцию водо- и нефтяных пластов посредством цементирования, закачку воды при извлечении углеводородов из продуктивного пласта, ликвидацию скважин по планам, одобренных Ростехнадзором и местным органам управления по предупреждению и ликвидации открытых фонтанов.

4.2. Водная среда

Поверхностный сток при бурении скважин должен быть отведен за зону санитарной охраны, где также запрещено любое строительство сооружений и объектов, не имеющие участия в эксплуатации водозаборных объектов. В целях защиты водоносных горизонтов от микробиологического и химического загрязнений в радиусе 60 м запрещается размещение складов горюче-смазочных материалов, химических реагентов, шламохранилищ [38, 39].

С целью снижения негативных воздействий на водную среду в процессе разработки и исследования месторождения могут быть предусмотрены следующие действия:

1. возведение амбаров, в которых дно и стенки отделаны глинистым грунтом, и обвалованных кустовых площадок с гидроизоляцией;
2. повторная возможность использования воды в процессе бурения эксплуатационных скважин;
3. использование такого объема воды, которое сохраняет баланс их изымания;
4. установление зоны санитарной охраны скважин;
5. полный сбор и снижение опасности отходов, полученных в результате бурения;
6. организация сбора производственных и дождевых стоков на кустовых площадках по водоотводным организованным стокам с последующим поступлением стоков на очистные сооружения.

Применение данные мероприятий и действий позволит наиболее эффективно и рационально использовать водные ресурсы и максимально снизить негативное влияние и воздействие при разработке месторождения и строительстве объектов на фонд подземных вод.

4.3. Обращение с отходами бурения

При разработке и исследовании месторождений образуются такие отходы, как буровой шлам, отработанные растворы, сточные воды. Такие отходы должны быть переработаны, при необходимости обезврежены, при необходимости захоронены в согласии с предъявляемыми требованиями нормативных документов, а также природоохранных органов государственного контроля.

При разработке и исследовании месторождений для снижения негативного воздействия и эффекта должен применяться комплекс, включающий в себя строительство амбаров для сбора, накопления и обезвреживания буровых отходов, которые должны быть размещены за пределами водных объектов и охраняемых зон.

С целью контроля утечек возможных токсичных агентов в амбарах, предназначенных для хранения шлама, должны быть установлены противодиффузионные экраны по периметру амбаров из глинистого грунта.

После буровых работ амбары, предназначенные для хранения шлама, должны быть подвержены рекультивации. Жидкие отходы в данном случае поступают на очистные сооружения производственных и дождевых стоков. Очищенная жидкая фаза в дальнейшем будет использоваться для поддержания пластового давления. Рекультивация твердых веществ отходов бурения осуществляется в пределах амбара путем засыпки грунтом [40, 41].

Перечисленные меры, нацеленные на минимизацию ущерба и негативного воздействия, предусмотрены в процессе строительства объектов и эксплуатации скважин.

4.4. Охрана недр в процессе эксплуатации скважин

Охрана недр при эксплуатации месторождения должен включать в себя контроль работы эксплуатационных скважин в соответствии с технологическим режимом, с сохранением структуры продуктивных пластов, соблюдение рациональной выработки углеводородов, применение мер, пресекающих преждевременное обводнение скважин, а также разгазирование пластов, проведение мероприятий, нацеленных на предупреждение возможных аварийных ситуаций при проведении любого рода работ. Одним из главных приоритетных мероприятий должен являться контроль за выработкой запасов, обеспечиваемый на протяжении эксплуатации месторождения.

Мероприятия по охране недр являются составной частью всех основных технологических процессов в процессе обустройства и эксплуатации месторождения, направленные на обеспечение безаварийности и эффективности извлечения природных ресурсов.

При падении пластового давления в продуктивных пластах в рыхлых или слабосцементированных песчаных породах, залегающих на глубине не более 2 км, возрастом не старше эоцена, наблюдается проседание земной поверхности.

При нарушении герметичности скважин возможны межпластовые перетоки, фонтанирование скважин. В аварийном состоянии продуктивных пластов должна быть предусмотрена автоматическая блокировка скважин. Причиной разгерметизации обсадных колонн является электрохимическая коррозия наружной поверхности труб. В связи с этим, должны быть меры по предотвращению возможной коррозии, включающие в себя применение оборудования из коррозионностойкой стали и защитных металлических и неметаллических покрытий, цементирование колонн скважин от забоя до устья скважин.

При эксплуатации скважин зона вблизи поверхности вокруг скважин подвергается высоким нагрузкам, так же, как и верхние секции колонн, под-

верженные высоким температурам и напряжениям. Все эти негативные аспекты ухудшают условия крепления ствола скважин, а также герметичность самих обсадных колонн. Конструкция скважин должна предусматривать теплоизолированные устьевые арматуры.

Согласно технологическим рекомендациям необходимо своевременно выполнять изоляционно-ликвидационные работы в скважинах, подлежащих ликвидации или консервации. Эти меры предупреждают негативный эффект на рациональное и эффективное использование природных ресурсов.

При строительстве и освоении скважин контроль за охраной недр и окружающей средой осуществляется службой охраны окружающей среды, которая выполняет буровые работы.

Осуществление экологического мониторинга на территории месторождений необходимо для своевременного информирования природопользователя, а также органов управления государственной службы мониторинга о состоянии природной среды. Данные меры помогают осуществлять своевременную оценку и анализ состояния природной среды на изучаемом месторождении.

В связи с негативным влиянием некоторых техногенных производственных факторов нефтяного промысла на окружающую среду на месторождениях должна быть принята комплексная программа по обеспечению мониторинга за состоянием воздушной среды, поверхностных и подземных вод, почвы с использованием гидрохимического, гидробиологического, радиационного мониторинга, а также мониторинг донных отложений. Утвержденным планом данные виды работ должны осуществляться четырежды в год в установленные сроки.

Выше рассмотренные мероприятия и действия по снижению негативных эффектов и неблагоприятного воздействия на окружающую среду и недр призваны повысить эффективность и безаварийную работу нефтепромысла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам данной работы было выяснено, что информационная энтропия может выступать в качестве метрики неопределенности и изученности системы, которая линейно коррелируется со степенью уверенности в расчете геологических запасов и знании морфологии резервуара. Таким образом, информационная энтропия может выступать в качестве качественного показателя динамики изменения уверенности в запасах и строении резервуара при добавлении новой информации.

Было выяснено, что резервуары разной степени сложности архитектуры имеют разную динамику в снятии неопределенности коллектора, что являлось ключевым различием между этими системами в процессе симулирования исследования резервуаров путем бурения новых скважин и обновлении информации о пропорциях фаций системы и их пространственном расположении внутри скважины. Таким образом, была подтверждена гипотеза о том, что для систем сложного архитектурного строения требуется больше информации (скважин) для достижения такой же степени уверенности в запасах как в случае простых систем.

Немаловажным результатом этой работы является подтверждение гипотезы, что корректное предсказание пространственного распределения фаций и их пропорций в резервуаре сложной архитектурой строения чувствительно к геологическому реализму, закладываемому в моделировании. Путем многоточечного моделирования было наглядно показано, что знание о возможной геометрии песчаных тел позволяет увеличить эффективность симулированных геологоразведочных работ в два раза.

В заключении, было продемонстрировано практическое применение информационной энтропии как меры изученности системы в финансовом менеджменте при планировании будущих геологоразведочных работ на основе уже имеющейся информации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Larue, D. K., and J. Hovadik. «Why Is Reservoir Architecture An Insignificant Uncertainty In Many Appraisal And Development Studies Of Clastic Channelized Reservoirs?» *Journal of Petroleum Geology*, vol. 31, no. 4, 2008, pp. 337–366., doi:10.1111/j.1747-5457.2008.00426.x.
- 2 Pyrcz, Michael J., and Clayton V. Deutsch. *Geostatistical Reservoir Modeling*. Oxford University Press, 2014.
- 3 Dromgoole, P., and R. Speers. «Geoscore; a Method for Quantifying Uncertainty in Field Reserve Estimates.» *Petroleum Geoscience*, vol. 3, no. 1, 1997, pp. 1–12., doi:10.1144/petgeo.3.1.1.
- 4 Jensen, Jerry L. *Statistics for Petroleum Engineers and Geoscientists*. Prentice Hall, 1997, pp. 390
- 5 Dreyer, Tom "Significance of tidal cyclicity for modelling of reservoir heterogeneities in the Lower Jurassic Tilje Formation, mid-Norwegian shelf" *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 72 (2), 1992, pp. 159-170
- 6 Dreyer, Tom. «Geometry and Facies of Large-Scale Flow Units in Fluvial-Dominated Fan-Delta-Front Sequences.» *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 69, no. 1, 1993, pp. 135–174., doi:10.1144/gsl.sp.1993.069.01.07.
- 7 Miall, Andrew D. «Architectural-Element Analysis: A New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits.» *Earth-Science Reviews*, vol. 22, no. 4, 1985, pp. 261–308., doi:10.1016/0012-8252(85)90001-7.
- 8 Miall, Andrew D., Friend, Peter F. «The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology.» *Geological Magazine*, vol. 134, no. 3, 1997, pp. 409–421., doi:10.1017/s0016756897276983.
- 9 Tyler, Noel, and Robert J. Finley. «Architectural Controls On The Recovery Of Hydrocarbons From Sandstone Reservoirs.» *The Three-Dimensional Facies Architecture of Terrigenous Clastic Sediments and Its Implications for Hy-*

- drocarbon Discovery and Recovery, 1991, pp. 1–5., doi:10.2110/csp.91.03.0001.
- 10 Yu, Xinghe, et al. «Clastic Hydrocarbon Reservoir Sedimentology.» *Advances in Oil and Gas Exploration & Production*, 2018, doi:10.1007/978-3-319-70335-0.
 - 11 Webber, K.j., and L.c. Van Geuns. «Framework for Constructing Clastic Reservoir Simulation Models.» *Journal of Petroleum Technology*, vol. 42, no. 10, 1990, pp. 1248–1297., doi:10.2118/19582-pa.
 - 12 Donselaar, Marinus E., and Irina Overeem. «Connectivity of Fluvial Point-Bar Deposits: An Example from the Miocene Huesca Fluvial Fan, Ebro Basin, Spain.» *AAPG Bulletin*, vol. 92, no. 9, 2008, pp. 1109–1129., doi:10.1306/04180807079.
 - 13 Dijkers, A.J. «Geology in Petroleum Production - A Primer in Production Geology.» *Developments in Petroleum Science*, 1985, doi:10.1016/s0376-7361(08)x7012-8.
 - 14 БембельС. Р. «Геология и картирование особенностей строения месторождений нефти и газа Западной Сибири: монография» / С. Р. Бембель. – Тюмень: ТИУ, 2016. – 215 с
 - 15 Barrell, J. «Rhythms and the Measurements of Geologic Time.» *Geological Society of America Bulletin*, vol. 28, no. 1, 1917, pp. 745–904., doi:10.1130/gsab-28-745.
 - 16 Wagoner, John C. van. *Sequence Stratigraphy Applications to Shelf Sandstone Reservoirs: Outcrop to Subsurface Examples*. American Association of Petroleum Geologists, 1992.
 - 17 Noad, Jon. «The Use of Field Analogues in the Correlation and Static Reservoir Methodology Used in the Tern Field, Northern North Sea, UK.» *Marine and Petroleum Geology*, vol. 21, no. 4, 2004, pp. 485–497., doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.03.006
 - 18 SEPMStrata, www.sepmstrata.org/page.aspx?&pageid=767&3.

- 19 Miall, Andrew D. *Principles of Sedimentary Basin Analysis* / Andrew D. Miall. Springer, 1999.
- 20 Howell, John A., et al. «Sedimentological Parameterization of Shallow-Marine Reservoirs.» *Petroleum Geoscience*, vol. 14, no. 1, 2008, pp. 17–34., doi:10.1144/1354-079307-787.
- 21 Ford, Grace L., and David R. Pyles. «A Hierarchical Approach for Evaluating Fluvial Systems: Architectural Analysis and Sequential Evolution of the High Net-Sand Content, Middle Wasatch Formation, Uinta Basin, Utah.» *AAPG Bulletin*, vol. 98, no. 7, 2014, pp. 1273–1303., doi:10.1306/12171313052.
- 22 Zhao, Junwei, et al. «Research on Meandering River Reservoir Deposition Architecture and 3D Modeling of the Gudao Oil Field in the Bohai Bay Basin.» *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 8, no. 1, 2017, pp. 73–83., doi:10.1007/s13202-017-0381-8.
- 23 Donselaar, M.e. «Reservoir Architecture Modelling for Geothermal Energy Production - Case Study of the Delft Sandstone Member, West Netherlands.» *78th EAGE Conference and Exhibition 2016*, 2016, doi:10.3997/2214-4609.201600596.
- 24 Damsleth, Elvind, et al. «A Two-Stage Stochastic Model Applied to a North Sea Reservoir.» *Journal of Petroleum Technology*, vol. 44, no. 04, 1992, pp. 402–486., doi:10.2118/20605-pa.
- 25 Wellmann, J. Florian, and Klaus Regenauer-Lieb. «Uncertainties Have a Meaning: Information Entropy as a Quality Measure for 3-D Geological Models.» *Tectonophysics*, vol. 526-529, 2012, pp. 207–216., doi:10.1016/j.tecto.2011.05.001.
- 26 Potter, K., et al. «Visualization of Uncertainty without a Mean.» *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 33, no. 1, 2013, pp. 75–79., doi:10.1109/mcg.2013.14.
- 27 Shannon, C. E. «A Mathematical Theory of Communication.» *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, 1948, pp. 379–423., doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

- 28 Wellmann, J. «Information Theory for Correlation Analysis and Estimation of Uncertainty Reduction in Maps and Models.» *Entropy*, vol. 15, no. 12, 2013, pp. 1464–1485., doi:10.3390/e15041464.
- 29 Wellmann, Jan Florian, et al. «Towards a Quantification of Uncertainties in 3-D Geological Models.» 2011, doi:10.5242/iamg.2011.0147.
- 30 Howell, John A., et al. «Sedimentological Parameterization of Shallow-Marine Reservoirs.» *Petroleum Geoscience*, vol. 14, no. 1, 2008, pp. 17–34., doi:10.1144/1354-079307-787.
- 31 Castro, A. Scarlet, et al. "The Stanford VI reservoir." *Stanford Center for Reservoir Forecasting*, 2005
- 32 Safari, safariidb.com/study/12100.
- 33 James D. Howard, Diane Kamola, Arma. «Depositional Facies of Cretaceous Spring Canyon Member, Blackhawk Formation, Book Cliffs, Utah: ABSTRACT.» *AAPG Bulletin*, vol. 66, 1982, doi:10.1306/03b59e59-16d1-11d7-8645000102c1865d.
- 34 Donoso, M. Jose "A contribution to improve facies object modeling of meandering rivers depositional system" *Theses, Stanford University, Department of Energy Resources Engineering*, 2016
- 35 Gibling, M. R. «Width and Thickness of Fluvial Channel Bodies and Valley Fills in the Geological Record: A Literature Compilation and Classification.» *Journal of Sedimentary Research*, vol. 76, no. 5, 2006, pp. 731–770., doi:10.2110/jsr.2006.060.
- 36 ГОСТ 12.0.003–74.ССБТ. «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1).» М.: Изд-во стандартов, 1974, №12.1.005-74, 25 с.
- 37 ГОСТ 17.1.3.12-86. «Охрана природы. Гидросфера. Общие правила охраны вод от загрязнения при бурении и добыче нефти и газа на суше.» М.: Изд-во стандартов, 1986, №17.1.3.12-86, 5 с.
- 38 ГОСТ 17.1.3.06-82. «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране подземных вод.» М.: Изд-во стандартов, 1982, №17.1.3.06-82, 2 с.

- 39 ГОСТ 17.1.3.06-82. «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране подземных вод.» М.: Изд-во стандартов, 1982, №17.1.3.06-82, 2 с.
- 40 ГОСТ 17.4.1.02-83. «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения.» М.: Изд-во стандартов, 1983, 17.4.1.02-83, 4 с.
- 41 ГОСТ 17.4.3.02-85. «Охрана природы. Почвы. Требования к охране плодородного слоя почвы при производстве земляных работ. » М.: Изд-во стандартов, 1985, 17.4.3.02-85, 3 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Heterogeneity of reservoir architecture

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ТМ71	Клименко Ника Валерьевна		19.08.2019

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученое звание, степень	Подпись	Дата
профессор	Оксана О. С.	д.г.-м.н.		19.08.2019

1.2 Heterogeneity of reservoir architecture

The concept of reservoir architecture was first proposed by Andrew Miall [7, 8]. This term describes the relationship between morphology, size, direction and layering of architectural elements and characterizes the qualitative and quantitative distribution of the reservoir. The architectural elements are sedimentary bodies, which can be distinguished from each other on the basis of geometry, scale and facial characteristics [7]. Their role can be played by ribbon-like channels, laterally extended sheet-like deposits of distal fan and river floodplains, sand lenses of point bars, etc.

According to [9], reservoirs of different depositional environment show different degrees of horizontal and vertical architectural complexity or heterogeneity. Heterogeneity of the reservoir architecture is a product of geological processes that have formed sediments. It follows that an understanding of these processes is a key factor in predicting the morphology and size of architectural elements in the interwell space. Moreover, an understanding of the geological processes provides an opportunity to predict the complexity of the reservoir according to the matrix of architectural heterogeneity, constructed on the basis of lateral and vertical complexity and heterogeneity (Figure 1) and associated with specific sedimentary conditions (Figure 2).

According to [10], the following types of architectures can be separately identified to describe the heterogeneity of reservoir architecture (Figure 3, Table 1): 1) layered type; 2) mosaic type; 3) labyrinth type.

Each of these types has its own distinctive characteristics, which should be taken into account both in the development and research of the field. Moreover, the architecture of the reservoir determines the cohesion and continuity of sand bodies [11] and is an indicator for choosing the approach of geomodelling (Figure 3). That is why it is necessary to consider these types of reservoir architectures in more detail.

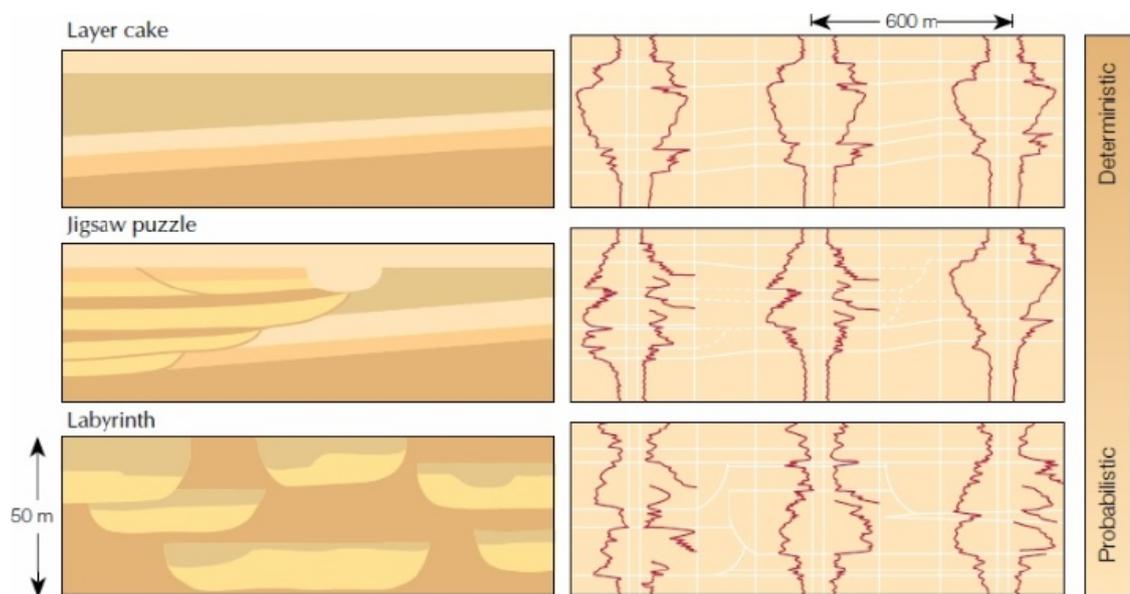


Figure 4 – Reservoir Architecture Types [10]

1.2.1 Layered Reservoir Architecture

Layered architectural reservoirs consist of either very laterally extended sedimentary bodies (formed under stable hydrodynamic conditions) or a series of small bodies closely adjacent to each other (formed under conditions of active lateral migration of the distribution channel). The main characteristic of this type of architecture is a high degree of lateral communication. Sandbodies with their distinctive petrophysical properties are laterally distributed over a large area without any strong changes in properties. The thickness of the sandy body may be variable, but it changes gradually. The boundaries between sand bodies are usually graded, but they can also be filtration barriers.

To simulate this type of architectural heterogeneity, it can be used a small number of wells and a deterministic approach, which in this case is an adequate method of predicting the nature of the distribution of the reservoir in the interwell space.

1.2.2 Reservoir architecture mosaic type

Reservoirs of this type consist of a series of woven sand bodies of small size without large clayey intervals between them. The reservoirs often alternate laterally with low-permeability or impenetrable barriers. Impermeable barriers can also be observed between two overlapping sand bodies. A characteristic feature of this type of architecture is that, despite the alternation with non-collector, sand bodies have a good lateral distribution and the thickness of the collector, usually powerful and sustained.

A deterministic approach may not be sufficient to simulate this type of reservoir architecture, particularly in the early stages of field development. A model of this type of architecture is recommended to be built using stochastic modelling methods. To reliably predict the lateral distribution of sandstones, more wells will be needed, as well as a good understanding of the geological processes that have formed the reservoir under study.

1.2.3 Reservoir architecture labyrinth type

The labyrinth type reservoir consists of a series of insulated groups of sand lenses overlapping with each other. A single sand body has a small size and limited lateral distribution. Groups of sand bodies can be either completely isolated from each other or connected by a weak layer of weakly permeable sandstone [12] (Figure 4).

A large number of wells with a small distance between them will be required to accurately predict the distribution of sand bodies. Since sandstones of this type of reservoir, as a rule, rarely correlate in the interwell space [13], it is impossible to construct a model of this type of architecture by the deterministic method. A stochastic method in this case is the only method capable of predicting morphology and reservoir size in the interwell space, but for the effective use of this meth-

od it requires good knowledge of the geological processes that have formed the reservoir, as well as more information and, consequently, more wells.