

ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АПТ-АЛЬБ-СЕНОМАНСКОМ ВОДОНОСНОМ КОМПЛЕКСЕ НА ПРИМЕРЕ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В связи повышением темпов глобального потепления вопросы снижения углеродного следа во всех сферах хозяйственной деятельности человечества стали формировать устойчивую парадигму в дальнейшем развитии мировой экономики.

Применительно к нефтегазовой отрасли, согласно данным мировых консалтинговых компаний, рыночную устойчивость и рост финансовых показателей преимущественно демонстрируют компании, активно реализующие стратегию декарбонизации, выполнившие реструктуризацию производственных процессов, ставя одной из ключевых целей соответствие современным принципам экологической, социальной и управленческой ответственности. Все больше мировое сообщество обращает внимания на этические аспекты бизнеса.

Компания ПАО «НК «Роснефть», как одна из крупнейших публичных нефтегазовых компаний мира, также большое внимание уделяет вопросам зелёной повестки. Одной из ключевых стратегических целей Компании является достижение углеродной нейтральности к 2050 году. В настоящей статье рассмотрен метод геологического хранения углекислого газа в водоносных пластах непосредственно на участках разрабатываемых месторождений, призванный дать качественный рост экологичности разработки. Оценены перспективы использования в качестве целевого объекта апт-альб-сеноманского водоносного комплекса на территории юга Тюменской области.

Ключевые слова: декарбонизация, углекислый газ, подземные воды, апт-альб-сеноманский водоносный комплекс, УВС, изменение климата, глобальное потепление, ПАО «НК «Роснефть», ООО «ТННЦ».



Бердова Д.В.
ООО «ТННЦ»
Ведущий специалист группы по гидрогеологическому сопровождению проектов Восточной Сибири и новых активов
dvberdova@tnnc.rosneft.ru



Шульгина А.А.
ООО «ТННЦ»
Ведущий специалист группы по гидрогеологическому сопровождению проектов Восточной Сибири и новых активов
aagudkova2@tnnc.rosneft.ru



Савельев Е.А.
ООО «ТННЦ»
Руководитель группы по гидрогеологическому сопровождению проектов Восточной Сибири и новых активов
easavelyev@tnnc.rosneft.ru



Дубовецкий В.Н.
Канд. техн. наук
ООО «ТННЦ»
Начальник управления аудита запасов и мониторинга ресурсной базы
VNDuboveckiy@tnnc.rosneft.ru



Азарова Н.О.
ООО «ТННЦ»
Начальник отдела геологического моделирования
noazarova@tnnc.rosneft.ru

С 1988 года тема борьбы с глобальным потеплением становится всё актуальнее, когда наряду с яркими промышленными и технологическими достижениями, активным ростом мировой экономики стали проявляться такие нежелательные эколого-климатические явления как повышение уровня мирового океана, деградация льдов Арктики, погодные и биологические аномалии, исчезновение редких видов животных и растений, связанные с потерей ареала обитания из-за изменения климата. Развитие ситуации по данным Организации объединенных наций (ООН) в среднесрочной перспективе грозит серьезными последствиями в виде усиления засухи, деградацией плодородных почв и мировым голодом, а также природными катаклизмами [7].

Замедление или полная остановка процессов, обуславливающих глобальное потепление, возможна за счёт минимизации или полного исключения эмиссии парниковых газов во всех

отраслях мировой промышленности [3]. Для достижения углеродной нейтральности, помимо прямого снижения эмиссии, также необходима реализация комплекса мер, включающих:

- Переработку, повторное использование и утилизацию вторичных энергетических ресурсов;
- Повышение потребления углекислого газа на этапах промышленного производства;
- Увеличение поглощающей способности природных систем;
- Использование возобновляемых источников энергии;
- Улавливание CO₂ на этапах промышленного цикла и последующее размещение в недрах.

Последнее направление, именуемое в международной практике, как CCUS (Carbon capture, utilization and storage), подразделяется на закачку CO₂ в недра для увеличения нефтеотдачи пластов и на пассивное геологическое хранение в пластах-коллекторах с возможностью обратного извлечения для промышленного использования.

Суммарная потенциальная емкость хранилищ для пассивного хранения в России составляет приблизительно 1173 Гт, при необходимости размещения до 2000 Гт [4].

Хранилища дифференцируются по типу коллектора и характеру насыщения на выработанные и истощенные нефтяные и газовые месторождения, угольные пласты, пласты каменной соли и водоносные пласты. В каждом случае они должны соответствовать заданным критериям [5]:

1. Простое геологическое строение и необходимая приёмистость.
2. Глубина залегания в интервале 600-1000 м;
3. Гидропроводность не менее 200-300 Дхсм/спз;
4. Пористость не менее 10-15 %;
5. Коллектор должен перекрываться мощной толщей непроницаемых отложений;

6. Проницаемость покрышки не должна превышать долей мД.

В настоящей работе в качестве перспективного пласта-коллектора рассматривается глубокий вертикально изолированный апт-альб-сеноманский водоносный комплекс, соответствующий всем указанным критериям и имеющий ряд преимуществ перед другими типами хранилищ:

- региональная выдержанность границ и мощности (**Рис. 1**);
- высокие фильтрационно-емкостные свойства и их постоянство в плане и разрезе;
- застойный режим водообмена, следовательно, низкая скорость движения подземных вод;
- гарантом безопасности использования ААС ВК в качестве объекта хранения CO₂ выступает мощная регионально выдержанная пачка слабопроницаемых отложений турон-эоценового возраста, толщиной до 600 м в исследуемом районе;
- положительный мировой опыт в целом для водоносных пластов.

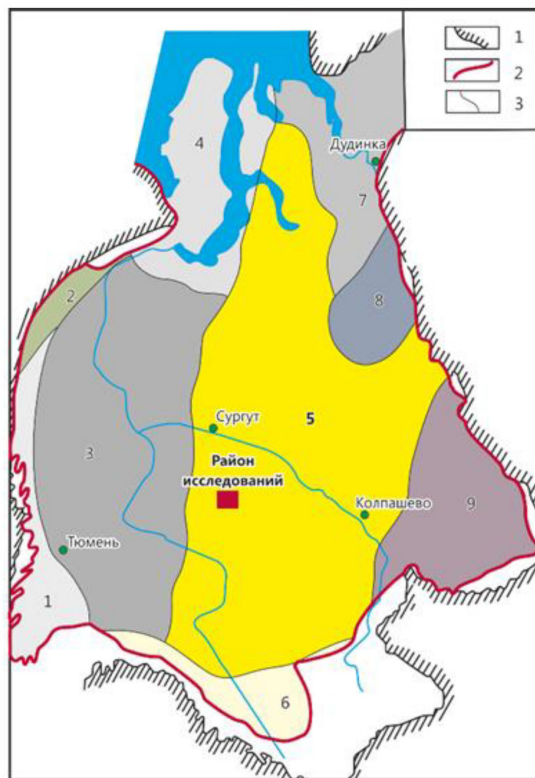
Целевой объект сложен преимущественно отложениями переслаивающихся песчаников, алевролитов с прослоями глин. Кровля комплекса залегает в интервале глубин 865-930 м. Подстилают его выдержанные слабопроницаемые отложения.

Геологическое хранение CO₂ предусматривает наличие средне- или высокоамплитудного структурного поднятия кровли пласта-коллектора (ловушки) с крутым углом падения крыльев.

В рамках настоящей статьи поиск подходящих структурных поднятий выполнен в Уватском районе Тюменской области. При выборе проектного участка также учитывалось наличие нефтепромысла с развитой инфраструктурой разрабатываемого нефтяного месторождения для сокращения возможного пути транзита уловленных парниковых газов к участку геологического хранения.

По результатам построения и анализа региональных структурных профилей на основании данных сейсморазведки по отражающему горизонту Г были выделены два структурных поднятия в кровле покурской свиты (пласт ПК1), относящиеся участкам деятельности одного из Обществ группы ПАО «НК «Роснефть».

Первое оконтурено изогипсой -780 м с высотой 15 м, второе оконтурено изогипсой -761 м с высотой 18 м. Погрешность структурных построений составляет 4,8 м. Перекрывающими отложениями данных ловушек являются глины кузнецовской свиты и нижней пачки березовской свиты (**Рис. 2**). Параметры выделенных ловушек представлены в **таблице 1**.



1-обрамление; 2-граница распространения апт-альб-сеноманских отложений; 3-граница распространения свиты; Сургут - населенный пункт и его название;

Свиты: 1 - синарская, мысовская; 2 - северо-сосвинская, ханты-мансийская, мысовская; 3 - викуловская, ханты-мансийская, уватская; 4 - танопчинская, яронгская, марресалинская; 5 - покурская; 6 - леньковская; 7 - яковлевская, долганская; 8 - яковлевская, маковская; 9 - симоновская, пировская (хийская);

Рис.1.

Схема распространения водоносного апт-альб-сеноманского комплекса на территории Западной Сибири.

Для расчета объемов ловушек построена 3D модель верхних пластов покурской свиты. Вмещающий объем ловушек пласта ПК1 для CO₂ составил: ловушка 1 – 85 млн. м³ (55 млн. т), ловушка 2 – 93 млн. м³ (60 млн. т).

Герметичность ловушек надежно подтверждается по качественному признаку перекрытия кровли покурской свиты толщей кремнисто-глинистых отложений турон-эоценового возраста мощностью до 600 м на проектом участке (**Рис. 3**), что указывает на ее высокое изолирующее качество. Породы-покрышки имеют глубоководный и прибрежно-морской генезис, по керну слагаются глинами темно-серыми, алевролитистыми.

На изучаемой площади основными объектами разработки являются пласты юрского комплекса, расположенные значительно ниже по разрезу, чем апт-альб-сеноманский водоносный комплекс, поэтому геологическое хранение CO₂ в рассматриваемом интервале не окажет влияния на разработку УВС.



Рис.2.
Структурная карта по кровле коллекторов пласта ПК1.

Таблица 1.
Параметры выявленных ловушек.

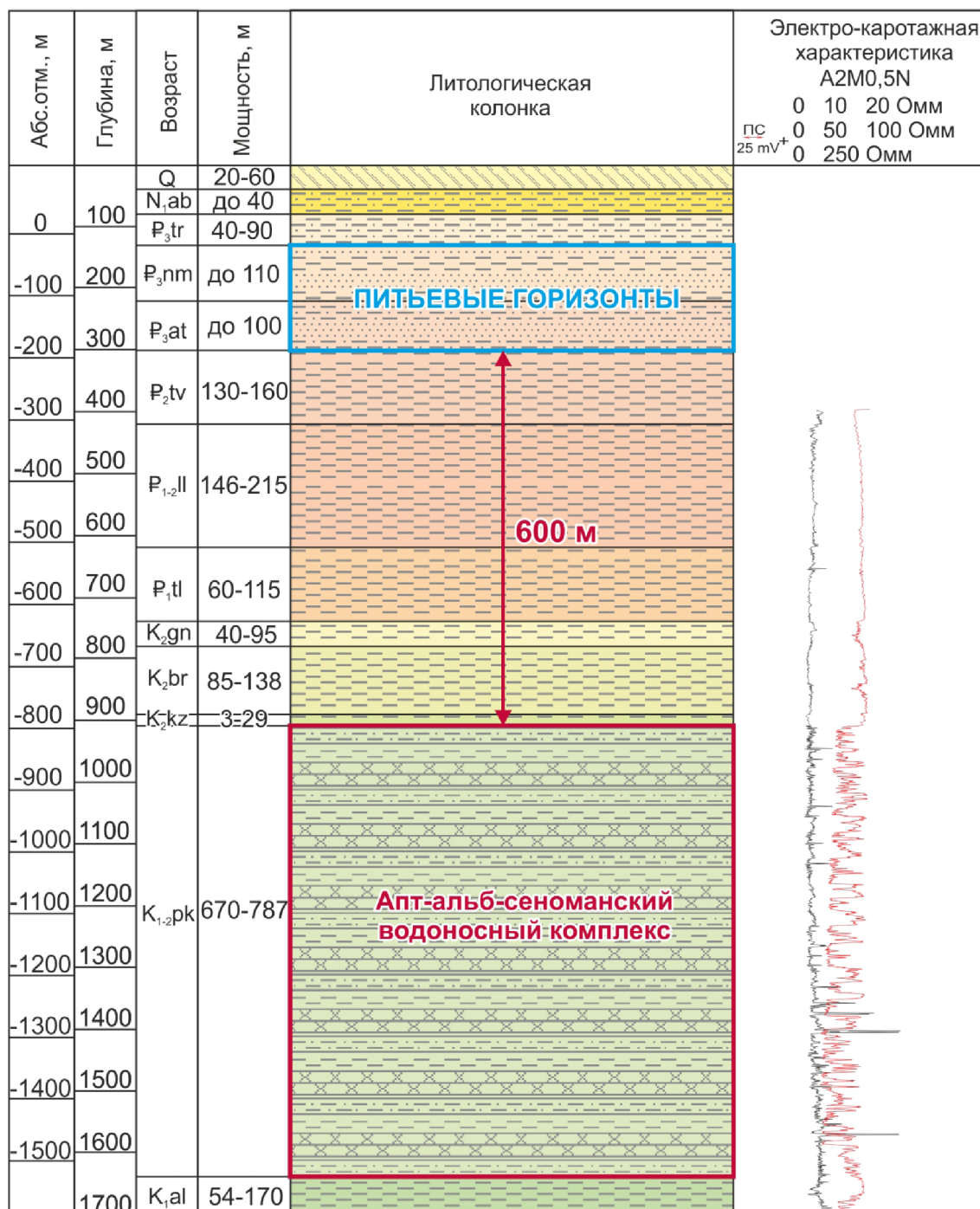
ПОКРЫШКА (Кузнецовская свита)		
Мощная толща	10-20 м	
Выдержанная по площади	Региональный репер	
РЕЗЕРВУАР		
	Ловушка 1	Ловушка 2
Замыкающая изогипса	-780 м	-761 м
Высота	15 м	18 м
Пористость, д.ед.	0,274	0,271
Пластовое давление, атм	101,97	
Пластовая температура °С	33	
Насыщенный объем, млн. м ³	85,3	92,6
Потенциальный объем, млн. т	55,02	59,69

Таким образом, на основании имеющихся количественных и качественных признаков, можно констатировать, что выявленные ловушки могут рассматриваться в качестве хранилищ CO₂.

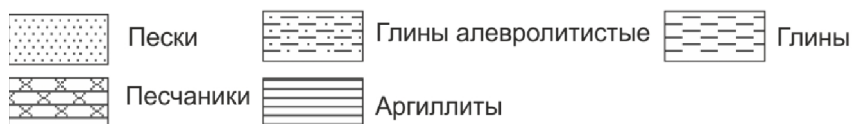
Для дальнейшей оценки перспектив эксплуатации выявленных ловушек в ААС ВК были проанализированы процессы взаимодействия размещаемого углекислого газа с породой пласта-коллектора, а также технологические аспекты.

Удержание и хранение CO₂ в водоносных коллекторах осуществляется посредством нескольких механизмов [4]:

- структурное улавливание – наличие ловушки, за пределы которой CO₂ не способен мигрировать;
- гидродинамическое улавливание – так как диоксид углерода обладает меньшей плотностью, чем вода, он будет продвигаться вверх



Условные обозначения:



Примечание: цвет геологического подразделения определяется его возрастом в соответствии с общей стратиграфической шкалой России

Рис.3. Сводный геолого-геофизический разрез участка исследований.

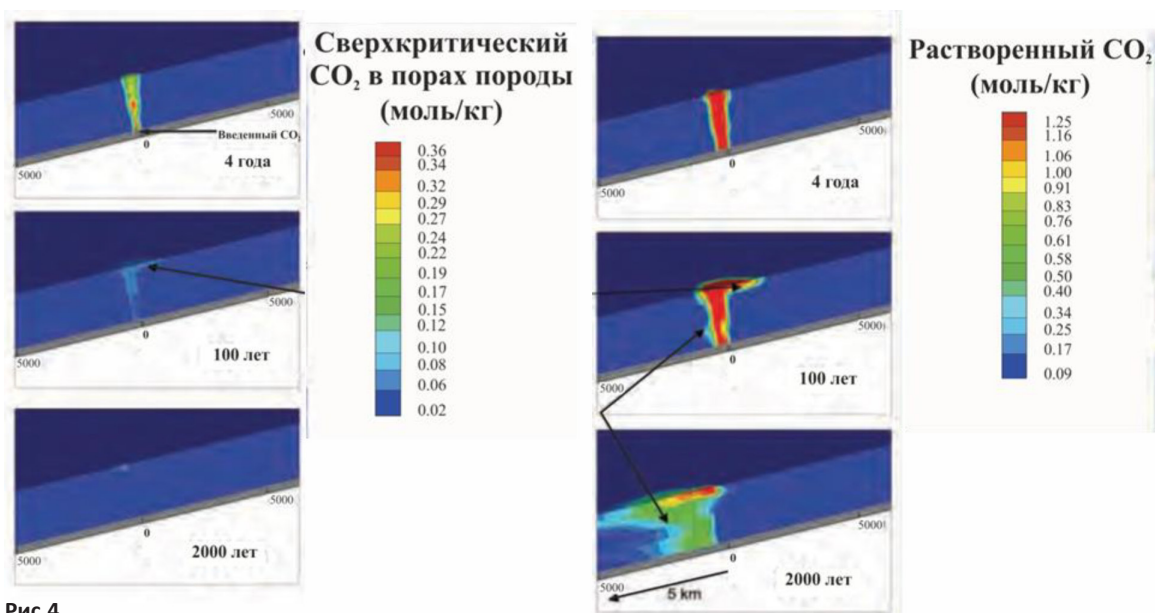


Рис.4. Моделирование размещения CO₂ в пласт [6].

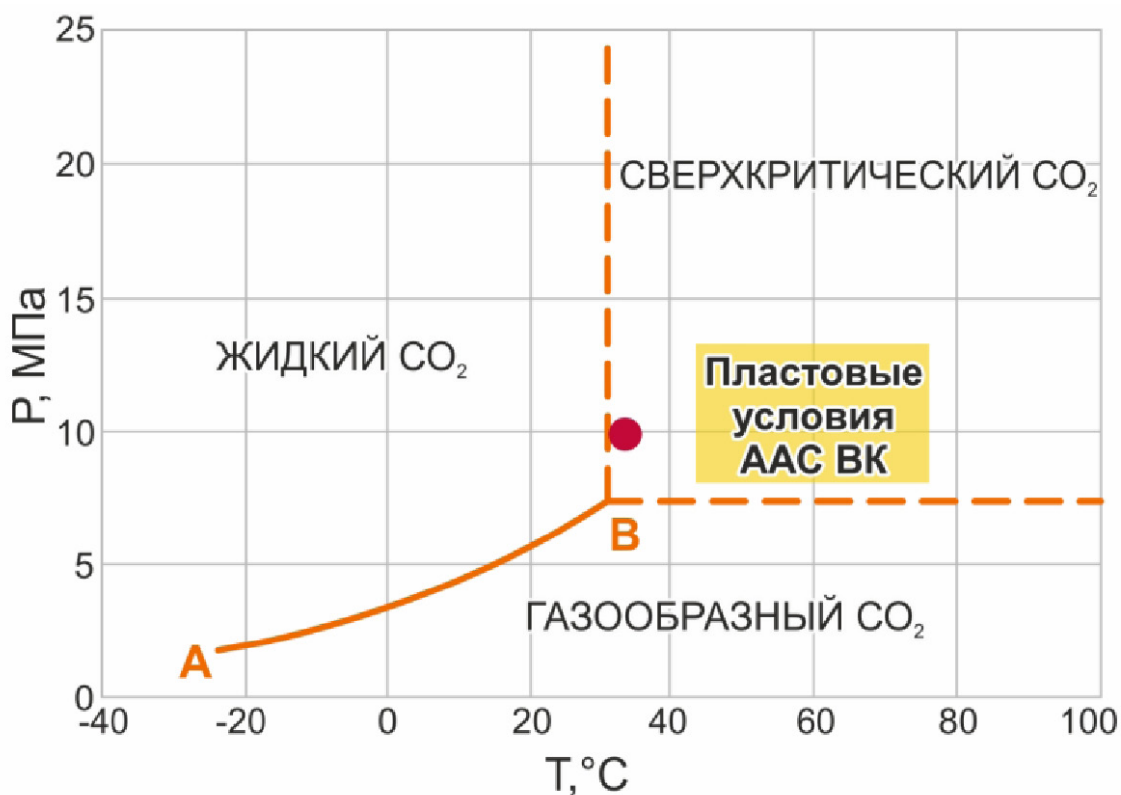


Рис.5. Диаграмма фазовых состояний CO₂.

до флюидопора и вдоль него, оттесняя пластовый флюид;

- улавливание путем растворения – в результате растворения углекислого газа водой, нейтрализуются его агрессивные свойства;
- минеральное улавливание – при взаимодействии CO₂ с породами и пластовым флюидом образуются твердый осадок или водные растворы.

В тоже время существует несколько путей миграции CO₂ по разрезу: молекулярная диффузия и растворение углекислого газа породами пласта и покрышки; вовлечение карбонизированной воды в поток пластовых вод. Данные процессы являются длительными, эффект которых может наблюдаться не ранее чем через 100 лет после размещения (Рис. 4), поэтому они не

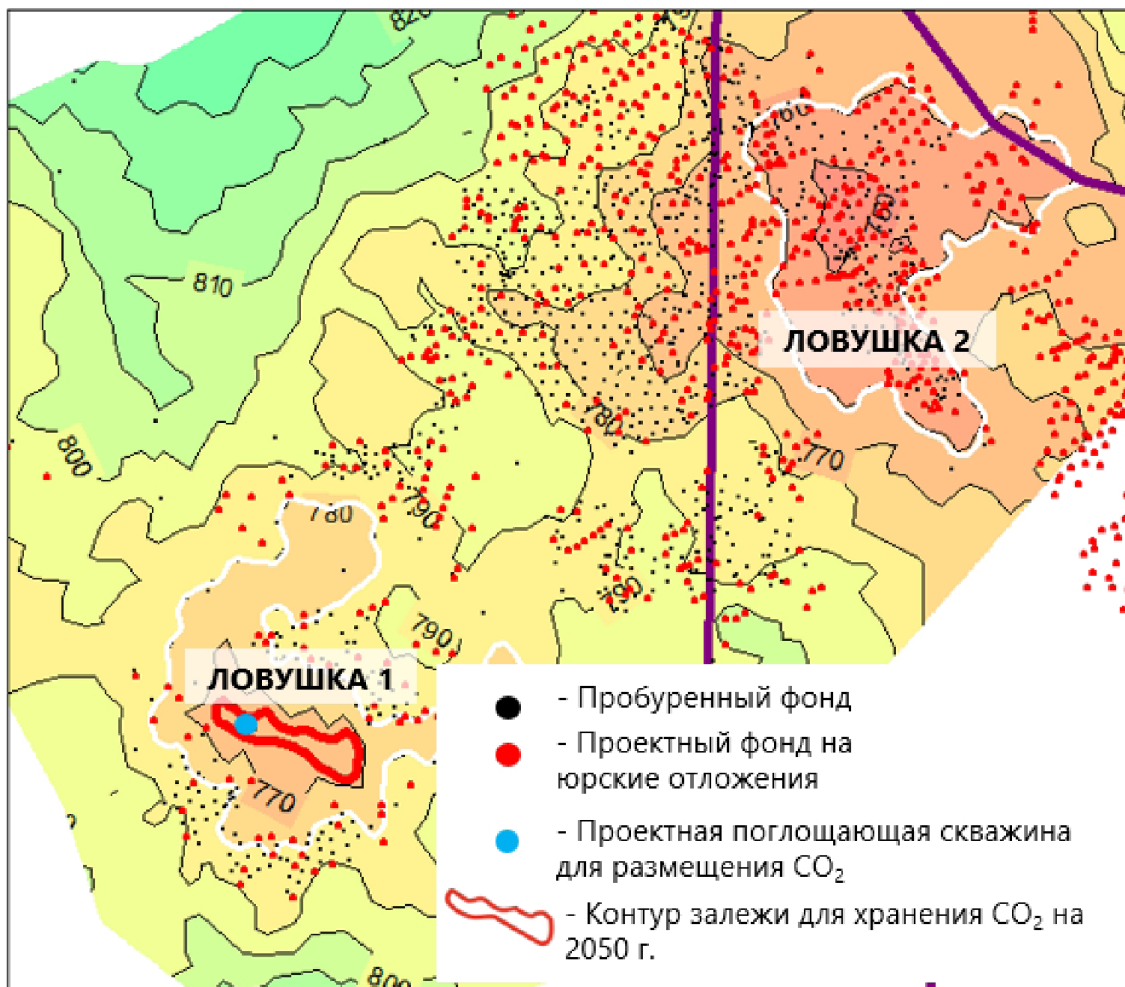


Рис.6. Фонд скважин месторождений.

будут оказывать существенного влияния на изменение условий хранения.

Согласно термобарическим условиям ААС ВК, размещаемый газ будет находиться в сверхкритическом состоянии, обладая одновременно свойствами жидкости и газа (Рис. 5) [2]. В данном состоянии он проявляет себя как газоподобный сжимаемый флюид, с плотностью близкой к плотности жидкого состояния, вязкость близка к значениям газа. Диоксид углерода в таком агрегатном состоянии выступает в роли растворителя. Его объем уменьшается от 1000 м³ на поверхности до 3,2 м³ на глубине 1 км [6].

В связи повышением растворяющих свойств CO₂ при переходе в сверхкритическое состояние в процессе закачки необходимо минимизировать количество скважин, находящихся в контуре выявленных ловушек. Как видно на рисунке 9 ловушка 2 охвачена фондом существующих и проектных скважин, следовательно, не подходит в качестве подземного хранилища (Рис. 6).

Выбросы, которые планируется уловить с последующим размещением в целевой объект бу-

дут формироваться за счёт работы двух газотурбинных электростанций, обеспечивающих работу промысла. Суммарный объем улавливаемого диоксида углерода за 28 лет (срок достижения углеродной нейтральности) составит около 7,9 млн. м³ (5 млн т.) [1]. Оценка, выполненная на основе трехмерного геологического моделирования ловушки 1, указывает, что после закачки всего планируемого объема в пласт ГВК установится на а.о. – 770 м (Рис. 7), пластовое давление поднимется до 168 атм, что ниже давления прорыва газа через флюидоупор, равного 262,5 атм.

Непосредственное улавливание и закачка CO₂ на проектом участке может быть реализовано в несколько последовательных этапов (Рис. 8). После выделения CO₂ на источнике эмиссии происходит его улавливание методом сорбции, либо мембранной фильтрацией с последующей очисткой и осушкой. Далее газ транспортируется по трубопроводам и размещается в водоносном пласте посредством нагнетательных скважин.

Для обеспечения безопасной эксплуатации хранилища, независимо от вида пласта-коллек-

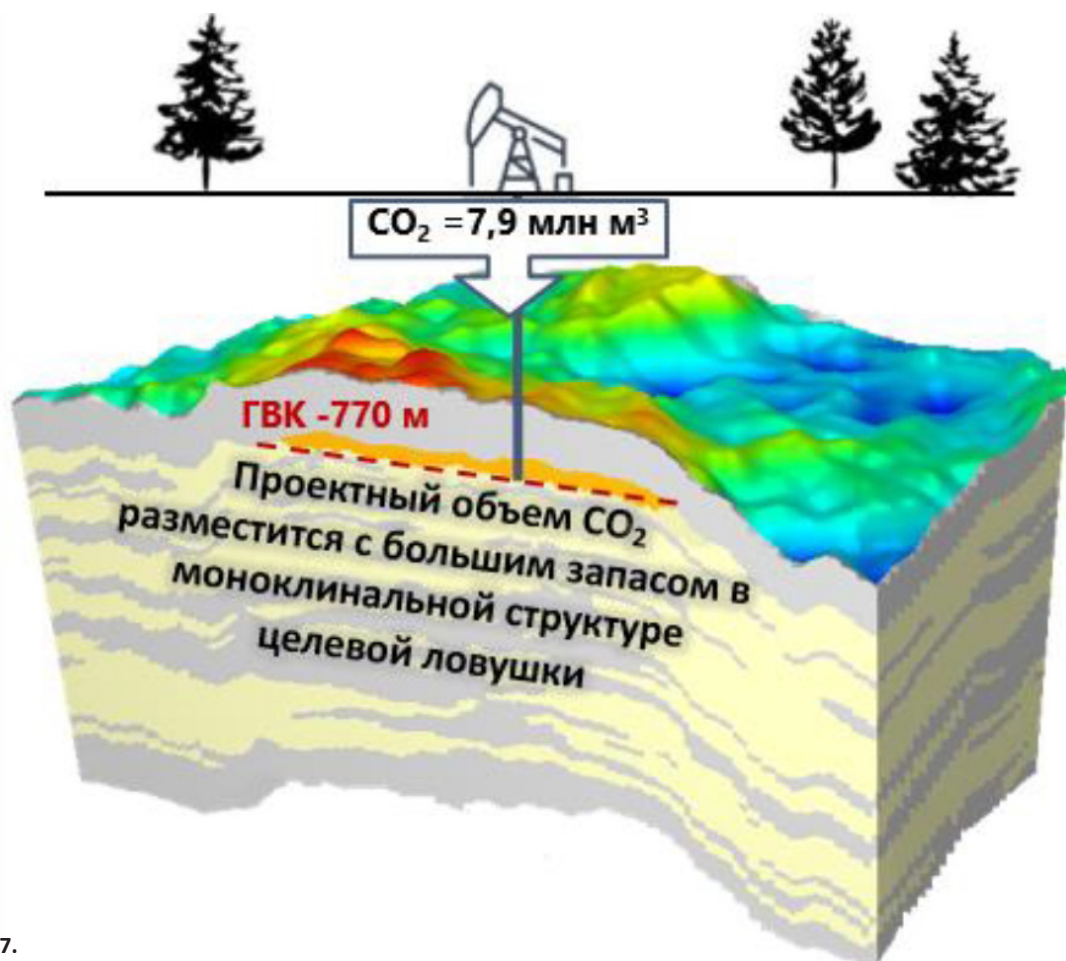


Рис.7. Модель ловушки диоксида углерода на конец закачки.

Источниками выделения CO₂ являются выхлопы с **объектов нефтегазового промысла** и **энергогенерирующего оборудования**

- Методы выделения CO₂:**
- ✓ Абсорбционный
 - ✓ Адсорбционный
 - ✓ Кальциево-карбонатный
 - ✓ Мембранное разделение
 - ✓ Криогенный

В стадии **очистки** CO₂ происходит также **осушка** и изменение фазового состояния

Транспортировка CO₂ по трубопроводам. (Процесс схож с транспортом природного газа)

Размещение CO₂ в **водоносные пласты** в пределах или вблизи действующих месторождений

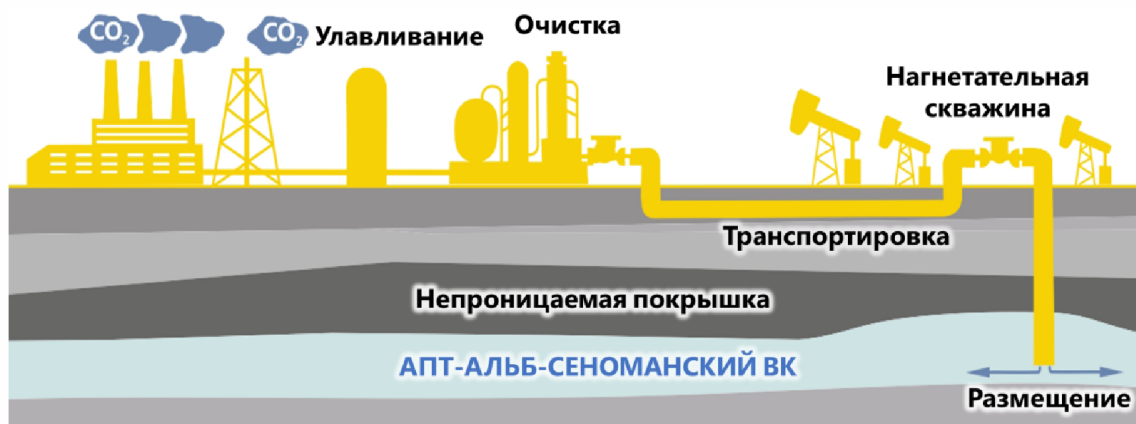


Рис.8. Концептуальная схема интеграции установки по размещению CO2 в водоносные пласты.

тора, необходимо вести мониторинг недр с учётом специфики размещаемого флюида:

- Глубинные методы:
 - дефектоскопия скважинного оборудования;
 - ИНГК насыщенность CO₂ в наблюдательных скважинах;
 - отбор проб подземных вод из водозаборных скважин, эксплуатируемых для целей ППД, для контроля за содержанием карбонатов;
- Операционные процессы:
 - учет объема, размещаемого CO₂ на устье;
 - контроль состояния газопроводов;
 - замер давления и температуры CO₂;
 - моделирование (геологическое, гидрогеохимическое, геомеханическое, гидродинамическое);
- Поверхностные методы:
 - спутниковая геодезия для наблюдения за деформацией поверхности просадка/выпучивание;
 - использование метода Дистанционного зондирования Земли для отслеживания изменения окружающей среды;
 - измерение концентрации CO₂ в воздухе над почвой;
 - 4Д сейсмика;
 - микросейсмика;
 - ГИС контроль герметичности эксплуатационных колонн;
 - наблюдение за целостностью трубопроводных сетей для транспортировки CO₂ посредством современных систем контроля с машинным обучением.

Таким образом, рассмотренный проектный участок и объект размещения в будущем могут позиционироваться, как типовое решение для организации подземного хранилища CO₂

по месту расположения источника выбросов на значительной территории Российской Федерации.

Для дальнейшего развития системы улавливания и хранения парниковых газов необходима актуализация и оптимизация нормативного регулирования данных процессов, проработка методов налогового и иного стимулирования пользователей недр с целью интенсификации геологоразведочных работ по выявлению перспективных резервуаров.

Экономический эффект проекта во многом будет зависеть от политических и рыночных факторов, а также государственной стратегии декарбонизации.

Выводы:

1. Проблематика декарбонизации и достижение углеродной нейтральности являются острыми вопросами, определяющими как технологическую, так и политическую повестку дня.

2. Достижение углеродной нейтральности может быть обеспечено посредством реализации нескольких направлений технологической декарбонизации, одним из которых может являться геологическое хранение углекислого газа в глубоких водоносных пластах.

3. В данной статье рассмотрены перспективы организации подземного хранилища CO₂ в апт-альб-сеноманском водоносном комплексе на юге Западной Сибири. Вместимость выявленной ловушки составила 55 млн т. при потребности 5 млн т., что оставляет возможность для масштабирования и размещения в выявленном резервуаре дополнительных объемов CO₂ от иных источников эмиссии. **XXI**

Литература

1. Габриэлайтене И. Как разрабатывать план действий для устойчивого энергетического развития (ПДУЭР). Часть II Базовый кадастр выбросов. Люксембург, 2014. 42 с.
2. Дорохин В.Г. Методика использования углекислого газа в различных агрегатных состояниях на подземных хранилищах газа: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2017. 119 с.
3. Закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» № 296-ФЗ от 02.07.2021.
4. Клубков С., Емельянов К., Зотов Н. CCUS: Монетизация выбросов CO₂. VYGON Consulting, 2021. 48 с.
5. Михайловский А.А., Костиков С.Л. Критерии пригодности ловушек водоносных пластов ПХГ для создания долгосрочных резервов газа, Газовая промышленность № 11 (745), 2016.
6. Что в самом деле означает геологическое хранение CO₂?. CO₂GeoНет Европейская Сеть Экспертов, 2012. 20 с.
7. <https://www.un.org/ru/climatechange/science/causes-effects-climate-change> дата обращения 31.08.2023.

UDC: 551.588.74

D.V. Berdova, Tyumen Petroleum Research Center, Lead specialist of the Team of Hydrogeological Support of Projects in East Siberia and New Assets, dvberdova@tnnc.rosneft.ru

A.A. Shulgina, Tyumen Petroleum Research Center, Lead specialist of the Team of Hydrogeological Support of Projects in East Siberia and New Assets, aagudkova2@tnnc.rosneft.ru

E.A. Savelyev, Tyumen Petroleum Research Center, Team Leader of the Team of Hydrogeological Support of Projects in East Siberia and New Assets, easavelyev@tnnc.rosneft.ru

V.N. Dubovecky, Tyumen Petroleum Research Center, Head of the Reserves Audit and Resource Base Monitoring Division VNDuboveckiy@tnnc.rosneft.ru

N.O. Azarova, Tyumen Petroleum Research Center, Head of the Geological Modeling Department, noazarova@tnnc.rosneft.ru

A CASE STUDY OF THE SOUTH OF WEST SIBERIA TO CONSIDER HYDRO-GEO-ECOLOGICAL ASPECTS OF UNDERGROUND STORAGE OF CARBON DIOXIDE IN THE APTIAN-ALBIAN-CENOMANIAN AQUIFER COMPLEX

Abstract: In the context of increasing global warming rates, the considerations on carbon footprint reduction in all spheres of human economic activity began to form a sustainable paradigm in the further development of the world economy.

According to the global consulting companies, the market stability and growth in financial performance in the oil and gas industry are predominantly demonstrated by companies that proactively implement a decarbonization strategy and have restructured their production processes, with one of their key goals being compliance with modern principles of environmental, social, and management responsibility. The global community is increasingly paying attention to the ethical aspects of business.

Rosneft Oil Company, being one of the largest public oil and gas players in the world, also pays great attention to the green agenda issues. One of the Company's key strategic goals is to achieve carbon neutrality by 2050.

This paper discusses the technology of geological storage of carbon dioxide in aquifers directly within the developed fields, designed to provide a qualitative increase in the environmental friendliness of development. The prospects of the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer complex in the south of the Tyumen Region to be used as a storage target have been assessed.

Keywords: decarbonization, carbon dioxide, groundwater, Aptian-Albian-Cenomanian aquifer complex, raw hydrocarbons, climate change, global warming, Rosneft Oil Company, Tyumen Petroleum Research Center (TNNC).