УДК 550.8:553.98:551.7; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-5.02
https://orcid.org/0000-0003-4298-7598
https://orcid.org/0000-0001-6621-101X
https://orcid.org/0000-0002-0635-6652
https://orcid.org/0009-0006-5574-8659
https://orcid.org/0009-0000-9181-2247
https://orcid.org/0009-0005-9895-2185

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ИЛИЙСКОГО БАССЕЙНА ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ CO_2



С.А. ИСТЕКОВА,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
s.istekova@satbayev.university



А.В. ЛОГВИНЕНКО,
PhD, ведущий научный сотрудник,
a.logvinenko@satbayev.university



Д.С. КАИРОВ,
магистр технических наук, старший научный сотрудник,
Dkairov@ssmoil.kz



Е.Н. НАРИМАНОВ,
старший научный сотрудник,
Y.narimanov@idsolutions.kz

Н.К. СЛАМБЕК, докторант, *Slambek.n@stud.satbayev.university*
Г.К. БЕКБАЛТИНА, докторант, *Bekbaltina.G@stud.satbayev.university*

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. К.И. САТПАЕВА
Республика Казахстан, 050013, Алматы, ул. Сатпаева, 22

В статье представлены результаты анализа геолого-геофизических и гидрогеологических данных, накопленных на сегодняшний день по Илийскому осадочному бассейну для выявления потенциальных геологических структур, способных удерживать и хранить диоксид углерода (CO_2), выделяемый промышленными объектами Алматы и Алматинской области, при географически благоприятных и экономически выгодных условиях.

Использованы данные сейсморазведочных работ, бурения и скважинных исследований, для изучения особенностей геологического строения глубоких стратиграфических горизонтов и структурно-тектонических условий их залегания.

По результатам геологического моделирования в ПО Petrel, построены структурная, литологическая и петрофизическая модели, что позволило определить эффективные коллекторские толщины юрского резервуара, способного удерживать CO_2. По скважинным данным дана количественная оценка распределения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов юрских отложений. Рассчитан их эффективный поровый объем, достигающий 2 918,6 тыс. м^3. Гидродинамические условия для глубин залегания миоцен-палеогеновых и юрских песчаников превышают критические параметры для диоксида углерода, при которых CO_2 переходит в сверхкритическое флюидное состояние. Это позволяет рассматривать данные горизонты как резервуары, способные к поглощению и долгосрочному безопасному хранению CO_2.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Жаркентская впадина, Юрский горизонт, резервуар, коллектор, покрышка, сейсморазведка, бурение, водоносность, диоксид углерода.*

ІЛЕ БАССЕЙНІНІҢ CO_2-НЫ ЖЕР АСТЫНДА САҚТАУ ӘЛЕУЕТІН БАҒАЛАУ

С.А. ИСТЕКОВА, геология-минералогия ғылымдарының докторы, профессор, *s.istekova@satbayev.university*
А.В. ЛОГВИНЕНКО, PhD, жетекші ғылыми қызметкер, *a.logvinenko@satbayev.university*
Д.С. КАИРОВ, техника ғылымдарының магистрі, аға ғылыми қызметкер, *Dkairov@ssmoil.kz*
Е.Н. НАРИМАНОВ, аға ғылыми қызметкер, *Y.narimanov@idsolutions.kz*
Н.К. СЛАМБЕК, докторант, *Slambek.n@stud.satbayev.university*
Г.Қ. БЕКБАЛТИНА, докторант, *Bekbaltina.G@stud.satbayev.university*

Қ.И. СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ЗЕРТТЕУ ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Қазақстан Республикасы, 050013, Алматы, Сәтпаев к., 22

Мақалада Алматы қаласы мен Алматы облысының өнеркәсіптік объектілері бөлінетін көмірқышқыл газын (CO_2) қолайлы геоклиматтық және экономикалық тиімді жағдайларда ұстауға және сақтауға қабілетті әлеуетті геологиялық құрылымдарды анықтау үшін Іле шөгінді бассейні бойынша бүгінгі күнге дейін жинақталған геологиялық-геофизикалық және гидрогеологиялық деректерді талдау нәтижелері ұсынылған.

Терең стратиграфиялық горизонттардың геологиялық құрылысының ерекшеліктерін және олардың жатуының құрылымдық-тектоникалық жағдайларын зерделеу үшін сейсмикалық барлау жұмыстарының, бұрғылау және ұңғымалық зерттеулердің деректері пайдаланылды.

Petrel БҚМ-де жүргізілген геологиялық модельдеу нәтижелері бойынша құрылымдық, литологиялық және петрофизикалық модельдер салынды, бұл CO_2 ұстап тұруға қабілетті юра резервуарының тиімді коллекторлық қалыңдығын анықтауға мүмкіндік берді. Ұңғы-

ма деректері бойынша юра шөгінділері коллекторжыныстарының сүзгілік-сыйығу қасиеттерінің таралуына сандық баға берілді. Олардың тиімді кеуекті көлемі есептеліп, 2 918,6 мың м³ құрады. Миоцен-палеоген және юра құмтастарының жату тереңдігіндегі гидродинамикалық жағдайлар көмірқышқыл газының критикалық параметрлерінен асады, бұл жағдайда CO_2 аса сындық флюидті күйге ауысады. Бұл аталған горизонттарды CO_2-ні сіңіруге және ұзақ мерзімді қауіпсіз сақтауға қабілетті резервуарлар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *Іле ойпаты, Юра горизонты, резервуар, коллектор, жапқыш қабат, сейсмобарлау, бұрғылау, сулы қабаттар, көмірқышқыл газы.*

ASSESSMENT OF THE ILI BASIN POTENTIAL FOR UNDERGROUND CO_2 STORAGE

S.A. ISTEKOVA, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, *s.istekova@satbayev.university*
A.V. LOGVINENKO, PhD, leading researcher, *a.logvinenko@satbayev.university*
D.S. KAIROV, master of technical sciences, senior researcher, *Dkairov@ssmoil.kz*
Y.N. NARIMANOV, senior researcher, *Y.narimanov@idsolutions.kz*
N.K. SLAMBEK, PhD candidate, *Slambek.n@stud.satbayev.university*
G.K. BEKBALTINA, PhD candidate, *Bekbaltina.G@stud.satbayev.university*

KAZAKH NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER K.I. SATBAYEV
The Republic of Kazakhstan, 050013, Almaty, Satbayev str., 22

The article presents the results of an analysis of geological, geophysical, and hydrogeological data accumulated to date for the Ili sedimentary basin to identify potential geological structures capable of trapping and storing carbon dioxide (CO_2) emitted by industrial facilities in Almaty and the Almaty Region under geographically favorable and economically viable conditions.

Data from seismic exploration, drilling, and well studies were used to study the features of the geological structure of deep stratigraphic horizons and the structural-tectonic conditions of their occurrence.

Based on the results of geological modeling in the Petrel software, structural, lithological, and petrophysical models were constructed, which made it possible to determine the effective reservoir thicknesses of the Jurassic storage formation capable of trapping CO_2. Based on well data, a quantitative assessment of the distribution of reservoir properties (porosity and permeability) for the Jurassic deposits was performed. Their effective pore volume was calculated, reaching 2,918.6 thousand m^3. The hydrodynamic conditions at the depth intervals of the Miocene-Paleogene and Jurassic sandstones exceed the critical parameters for carbon dioxide, at which CO_2 transitions into a supercritical fluid state. This allows these horizons to be considered as reservoirs capable of absorbing and ensuring the long-term, safe storage of CO_2.

KEYWORDS: *Zharkent Depression, Jurassic horizon, reservoir, collector, seal, seismic exploration, drilling, water-bearing capacity, carbon dioxide.*

Введение. Захоронение CO_2 входит в состав комплексной технологии по улавливанию, использованию и хранению углерода Carbon capture, utilization and storage (CCUS) и является важным этапом на пути сокращения выбросов диоксида углерода в атмосферу, способствующей уменьшению парникового эффекта в атмосфере и экологической безопасности жизнедеятельности человека [1, 2].

Одной из доминирующей составляющей CCUS является выявление и подготовка подземных резервуаров под закачку CO_2 в пласты горных пород, которые способны к его поглощению и долгосрочному безопасному хранению [3].

Мировой опыт показывает, что существуют различные геологически благоприятные условия захоронения углекислого газа в недрах. Основные из них – это пласты истощенных залежей углеводородов и минерализованные подземные водоносные горизонты. Существует практика хранения углекислого газа в неразрабатываемых угольных пластах, соленосных и базальтовых формациях [4-7]. Наиболее благоприятные для этих целей являются геологические комплексы, сформированные в древних осадочных бассейнах, которые широко распространены на всех континентах нашей планеты. К этим бассейнам приурочены многочисленные нефтегазоносные провинции с основными мировыми запасами углеводородов. В их пределах в процессе изучения геологического строения установлены природные резервуары для закачки и хранения природного газа и захоронения диоксида углерода [8].

К природным резервуарам для хранения CO_2 предъявляются жесткие требования к наличию надежных ловушек, покрышек и высоких фильтрационно-емкостных свойств коллекторов. Наиболее благоприятными объектами для этого являются истощенные залежи углеводородов. Наличие подробной геолого-промысловой информации по ним существенно снижает неопределенность при выборе хранилища и мониторинге закачанного газа [9, 10].

Основными критериями выбора геологического резервуара для хранения CO_2 являются наличие надежных структурных или стратиграфических ловушек с непроницаемыми покрышками, высокопористых и проницаемых пород-коллекторов (включая водоносные горизонты с пористостью от 10–20%), а также оценка тектонических разломов на предмет рисков утечки. Долгосрочная безопасность обеспечивается капиллярным удержанием газа в порах, его растворением в пластовых водах и прогнозируемыми минеральными реакциями с вмещающими породами [11, 12]. Неполные данные по этим характеристикам могут привести к неправильным расчетам объема резервуара для закачки и большим рискам хранения CO_2 [13].

Сегодня в Республике Казахстан стоит острый вопрос повышение экологической безопасности жизнедеятельности населения вблизи крупных городов и промышленных центров. Формирование эмиссии CO_2 происходит в основном за счет выбросов в сферах электроэнергетики и теплоснабжения, транспорта и металлургии (*рисунок 1*).

Гидродинамическое моделирование подтвердило высокий потенциал малоизученной Прииртышской впадины для хранения CO_2. Тем не менее, исследования носят региональный характер из-за отсутствия детальных лабораторных данных (PVT-свойств, геохимии и фазовых проницаемостей) [14].

Региональная оценка [15] охватывала лишь осадочные бассейны Западного Казахстана, оставляя без внимания Илийский бассейн вблизи Алматы (транспортировка газа на расстояние более 1000 км нерентабельна). В рамках Программы низкоуглеродного развития АО «НК «КазМунайГаз» при поддержке ТОО «КМГ Инжиниринг» подготовил пилотный проект CCUS для закачки CO_2 с целью увеличения нефтеотдачи истощенных пластов.

Скрининг источников выбросов и геологические изыскания в Прикаспийском, Устюрт-Бузачинском и Мангышлакском бассейнах показали, что наибольшим потенциалом для хранения CO_2 обладают терригенные отложения нижнего и среднего мела



Рисунок 1 - **Карта выбросов CO_2 на территории Республики Казахстан [3].**

Мангышлака и запада Устюрт-Бузачинского бассейна при региональных покрышках из позднемеловых мергелей и глин. Оценка носит предварительный характер.

Сегодня высокие уровни годовых выбросов углекислого газа, превышающие 2 миллиона тонн, отмечаются в крупнейшем регионе юга республики в городе Алматы и Алматинской области. Этот феномен обусловлен наибольшей концентрацией многочисленных предприятий, заводов, ТЭЦ и других производственных объектов в регионе [16, 17].

В Казахстане нет действующих объектов утилизации CO_2, а вопросы наличия ловушек и резервуаров изучены слабо. Несмотря на высокий геологический потенциал недр, для развития CCUS необходимы целенаправленные исследования, анализ имеющихся данных и разработка законодательных требований к хранилищам, что позволит оценить общий потенциал страны и сформировать государственную стратегию.

Авторы проанализировали геологические и гидрогеологические данные по Южному Казахстану для поиска структур, способных хранить выбросы CO_2 от промышленных объектов Алматы и области. Из-за отсутствия нефтяных месторождений упор сделан на глубокие засоленные водоносные горизонты с учетом технико-экономической целесообразности.

Материалы и методы исследования

Для Казахстана хранение в пористых геологических средах, как в целом, так и в осадочных бассейнах, считается наиболее жизнеспособным вариантом хранения CO_2 [18, 19]. Как отмечалось ранее, наиболее эффективные потенциальные места

хранения включают истощенные резервуары углеводородов и глубокие засоленные водоносные пласты. По мнению многочисленных исследователей, в мире минерализованные водоносные пласты обладают самым высоким потенциалом для хранения CO_2 [20].

Водоносные пласты юга Казахстана подходят для хранения CO_2 при условии достаточной мощности, латерального распространения, высокой пористости и проницаемости, наличия надежной флюидоупорной покрышки и глубины залегания более 800 м, обеспечивающей переход углекислого газа в сверхкритическое состояние [21, 22].

Исключительно важное значение для успешного геологического хранения CO2 имеет выбор местоположения хранилища, а также возможность оценки его фильтрационных характеристик. Перед выбором места расположения резервуара должна быть информация о геологических условиях: имеется ли достаточно объемная и проницаемая формация; обеспечит ли перекрывающая порода эффективную герметизацию и не нарушат ли целостность герметизации заброшенные или действующие скважины. Для решения этих задач в мировой практике используется традиционная методика, разработанная для разведки нефтяных и газовых месторождений, выявления резервуаров для подземных газохранилищ и мест для удаления жидких отходов [23-25].

Настоящее исследование направлено на точечное изучение геологических формаций Алматинского региона, построение геолого-гидродинамической модели процесса хранения CO_2 и выполнение технико-экономической оценки возможности его захоронения. Для Алматинской области наиболее перспективным, технологически эффективным и, экономически выгодным для захоронения CO_2 является Илийский осадочный бассейн [26].

Западная граница проходит вдоль хребта Кендыктас и Шу-Илийских гор. В пределах впадины сформированы два крупных прогиба: на востоке – Восточно-Илийский (Жаркентский), на западе – Алматинский (Западно-Илийский), разделенные между собой Богутинской седловиной [27]. Илийский бассейн, схожий с Ферганским и Жонгарским бассейнами, обладает прогнозируемым нефтегазовым потенциалом. Наиболее перспективен Жаркентский прогиб, аналогичный продуктивной Жонгарской впадине в КНР [28]. В этой мезо-кайнозойской грабен-синклинали на бортах развиты богатые органикой юрские отложения, а Пенджинская структура выделяется как наиболее перспективная на газ [29].

В районе выполнены полевые сейсморазведочные работы МОГТ-2D по сети профилей, расположенные с учетом зоны выклинивания верхнепермских отложений и проходящие вкрест простирания основных перспективных на выявление пластов-коллекторов структур. Осуществлена переобработка ранее выполненных сейсмических данных компанией PGC-Services по стандартному графу обработки с применением глубинной миграция до суммирования (PSDM) в среде современных геоинформационных систем. При геологической интерпретации сейсмических данных широко использовались результаты по пробуренным в разные годы параметрическим и поисковым скважинам. Всего по площади Жаркентской впадины пробурено 22 скважины различного назначения, в т.ч.: 18 – в западной и юго-западной части бассейна, 4 – в центральной части (*рисунок 2*).

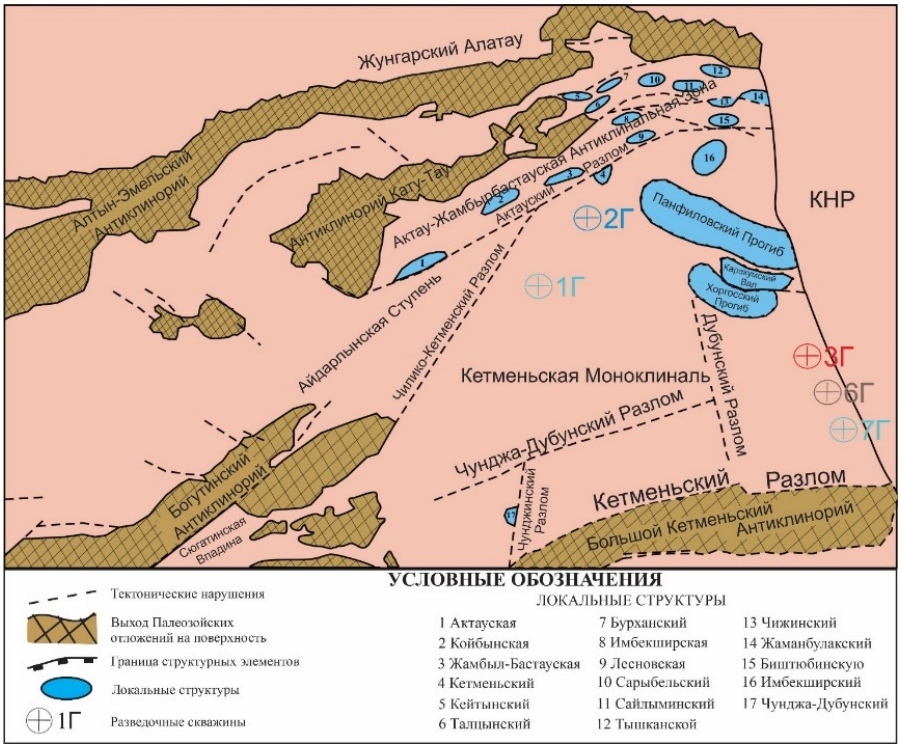


Рисунок 2 - **Жаркентский прогиб. Структурно-тектоническая схема**

С 1980-х годов для поиска перспективных участков в прогибе проводились комплексные геолого-геофизические исследования, перешедшие в последние десятилетия на уровень высокоразрешающей сейсморазведки с невзрывными источниками. В районе выполнены профильные работы МОГТ-2D с глубинной миграцией (PSDM), а их интерпретация опирается на данные 22 скважин Жаркентской впадины (18 на западе/юго-западе и 4 в центре) (*рисунок 3*).

Большинство этих скважин сопровождались работами ГИС, сейсмокаротажом и описанием геологического разреза по данным керна. Использованы данные по глубоким скважинам 1Г, 2Г, 3Г, 5Г, 6Г, 7Г, 1Т, 2Т, 3Т, 4Т, 5Т, 6Т, по которым вскрыты мезакайнозойские отложения, а также осадочные эффузивные отложения палеозоя.

Бурение скважины 1-П уточнило строение восточного Илийского прогиба, подтвердив наличие пермских и мощных водоносных юрских отложений [30]. Методика исследования базировалась на анализе более чем 30-летних геолого-геофизических данных по миоцен-палеогеновым и юрским горизонтам Жаркентской впадины, а также на переинтерпретации профилей МОГТ-2D с помощью современного ПО (Open Works, Kingdom, Petrel), что позволило построить новые структурно-тектонические модели и выявить в песчаных коллекторах мощностью от 10 м потенциальные герметичные структуры для изоляции CO_2.

Исследования включали сбор и цифровизацию геолого-геофизических данных, критический анализ предшествующих интерпретаций, обработку сейсмических материалов с построением карт интервальных скоростей, создание глубинно-ско-

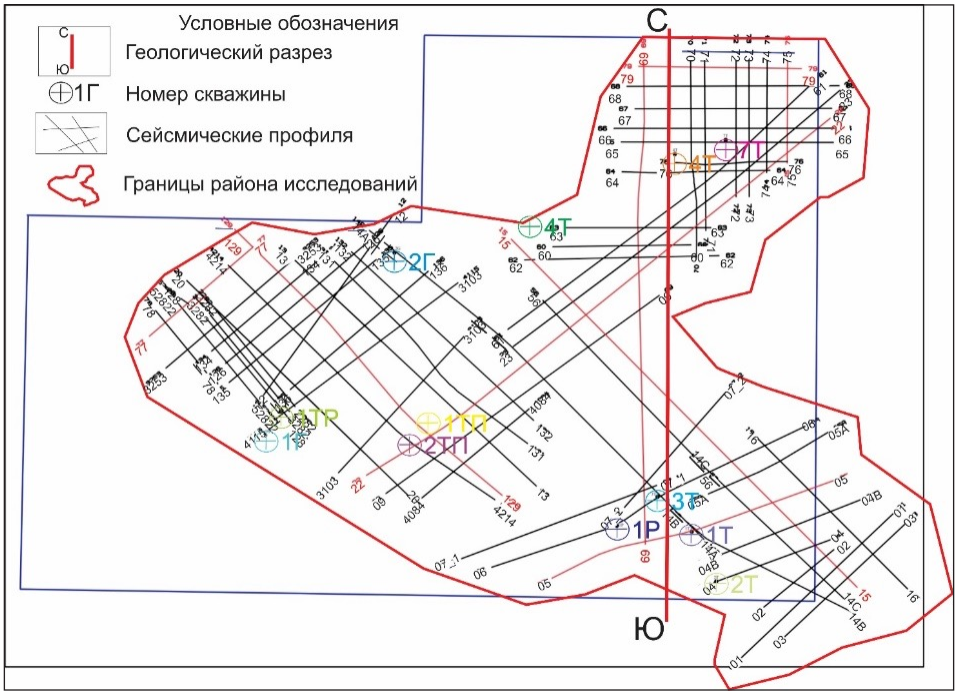


Рисунок 3 - **Жаркентский прогиб. Схема геолого-геофизической изученности [18]**

ростной модели среды, а также построение структурных карт и карт изохрон. На основе сейсмокаротажа глубоких скважин построена скоростная модель Жаркентской впадины, отражающая сложную латерально-глубинную изменчивость разреза [19]. Выделено четыре основных интервала пластовых скоростей: четвертичные отложения (1670–2000 м/с), третичные (2000–3000 м/с), триас-юрские (3000–3500 м/с) и пермские (3500 м/с). Общие значения пластовых скоростей закономерно увеличиваются с глубиной от 2700 м/с (скв. 7Г) до 4000 м/с (скв. 1Г, 5Г). Рассчитанные по сейсмическим данным глубины сравнивались с разбивками по скважинам, полученным по сейсмическому каротажу (СК) и данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП) (*рисунок 4*).

Оценка гидродинамического режима Восточно-Илийской впадины проведена в результате изучения закономерностей распространения подземных термальных вод в различных стратиграфических комплексах пород осадочного чехла, анализа карт гидрохимической зональности термальных вод, карт распределения среднего геотермического градиента по впадине, результатов оценки ресурсов термальных вод (*рисунок 5*).

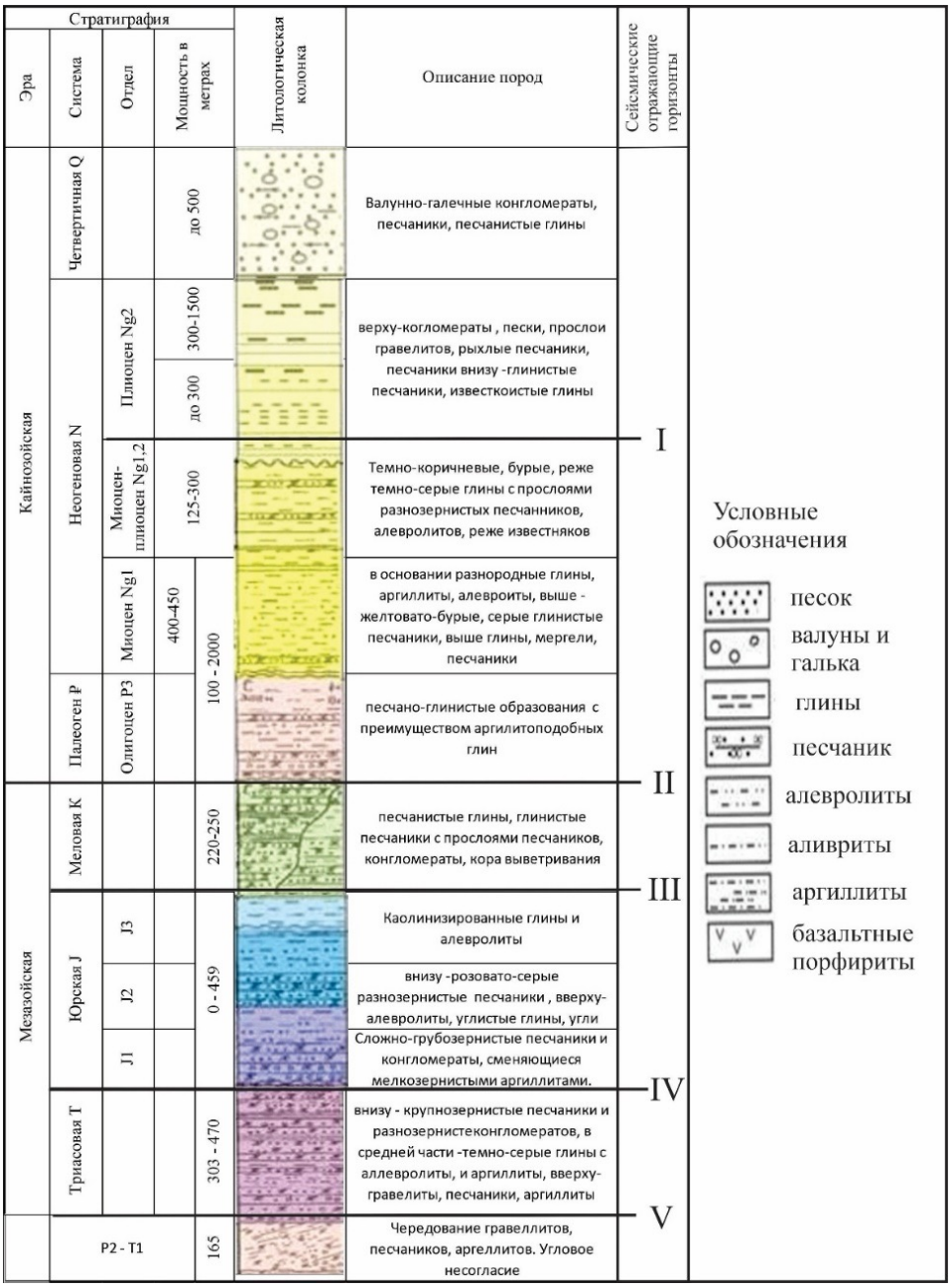


Рисунок 4 - **Сводная стратиграфическая колонка мезозойско-кайнозойских комплексов Восточно-Илийского прогиба**

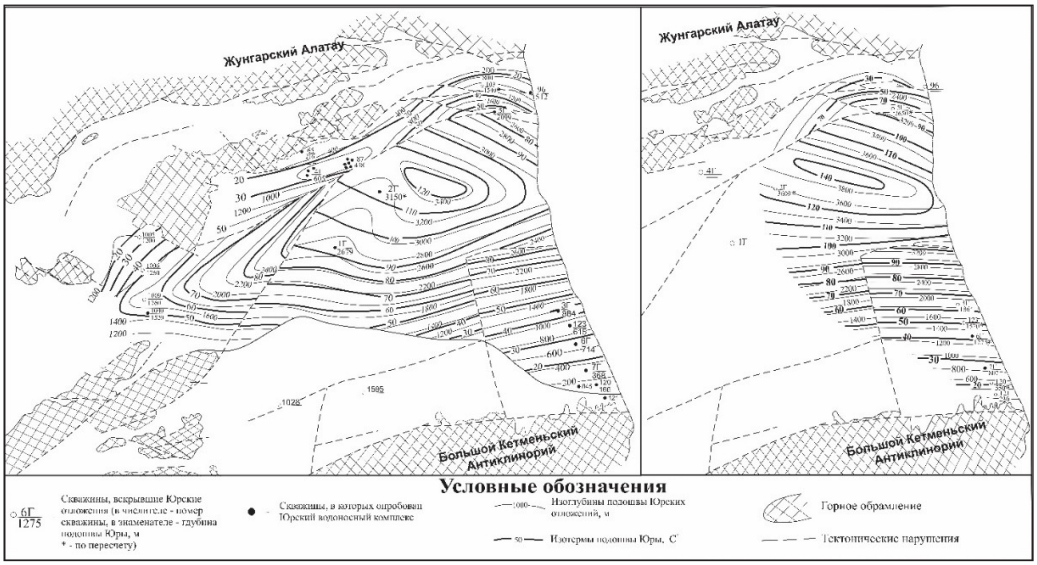


Рисунок 5 - **Карта водоносных комплексов Жаркентской впадины: слева – юрский, справа – неогеновый комплексы [18].**

Результаты и обсуждение

Анализ геолого-геофизических и гидрогеологических данных Жаркентской впадины позволил определить ключевые критерии выделения резервуаров для хранения CO_2, включающие структурно-тектонические условия (наличие надежных антиклинальных ловушек), литолого-стратиграфические комплексы (породы-коллекторы с высокими емкостно-фильтрационными свойствами) и гидрогеологические факторы (выдержанные водоносные пласты с надежными региональными покрышками).

Структурно-тектонические условия выявления резервуара

Сложный скоростной разрез Жаркентской впадины характеризуется ростом интервальных скоростей с юга на север и градиента с востока на запад из-за изменения мощности осадков и уплотнения пород. Анализ юрских горизонтов показывает латерально-глубинную изменчивость скоростей под влиянием осадконакопления и дизъюнктивной тектоники.

Структурные карты по целевым отражающим горизонтам осадочной толщи показали особенности морфологии поверхности стратиграфических комплексов:

1. I отражающий горизонт (подошва плиоцена $–N_2$);
2. II отражающий горизонт (подошва миоцен-палеогена N_1-Pg);
3. III горизонт (подошва меловых отложений);
4. IV отражающий горизонт (подошва юрских отложений);
5. V отражающий горизонт (кровля палеозоя);

На структурной карте по I отражающему горизонту Северо-Кетменьской моноклинали выделяются Пенджинская антиклиналь, Усекская моноклиналь и поднятие Айдарлы. Трехмерная модель (*рисунок 6*) демонстрирует их границы, примыкающие тектонические нарушения и унаследованность развития в пермо-триасовом, юрском и меловом комплексах.

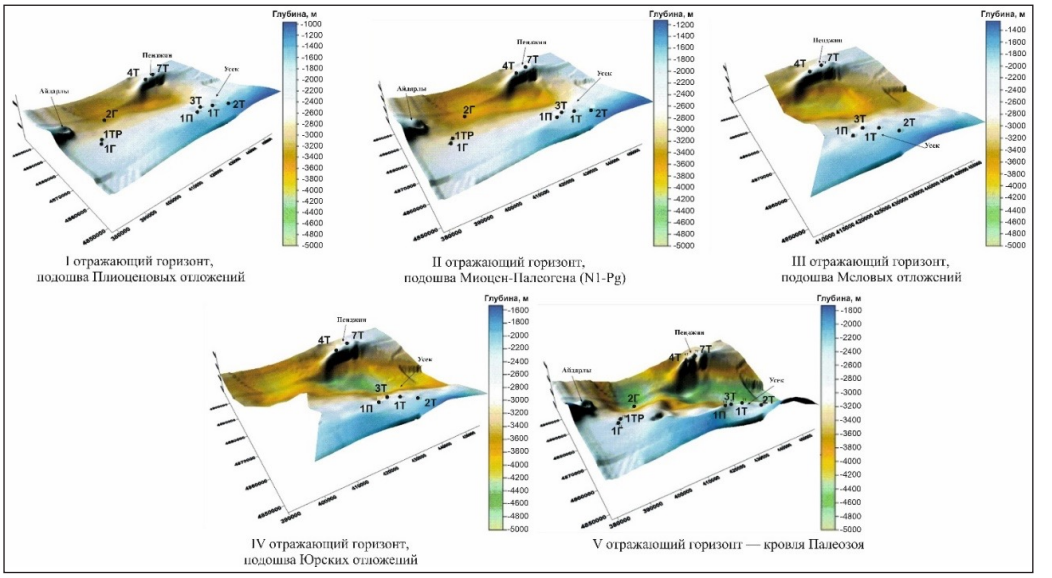


Рисунок 6 - **Жаркентский прогиб. Структурные карты по отражающим горизонтам [18]**

Наиболее интересная Пенджинская антиклиналь субширотного простирания на западе ограничена изогипсой минус 2500 м, размеры ее достигают 15х5 км, амплитуда 600 м, площадь 75 км^2. Структура разбита малоамплитудным разломом меридионального направления. В западной периклинальной части антиклинали пробурены скважины 4Т и 7Т, которые вскрыли отложения плиоцена на глубине минус 2160 м и 2050 м соответственно. Структура восточной переклиналью уходит в КНР. В южном направлении от Пенджинской структуры происходит резкое погружение осадочного чехла (Панфиловская мульда), а отложения плиоцена в мульде залегают на отметке минус 3600 м. Площадь повсеместно осложнена разрывными нарушениями, крутыми наклонами отражающих границ и резкой сменой фациального состава отложений.

Усекская моноклиналь на юго-востоке чехла характеризуется залеганием плиоценовых отложений на глубинах от -1100 до -1996 м, в то время как структура Айдарлы (с глубинами до -2460 м) представляет собой овальное поднятие по V горизонту площадью 6,25 км² и амплитудой 100 м, осложненное тектоническими нарушениями. В целом выявленные локальные поднятия и дизъюнктивные нарушения формируют перспективные тектонически экранированные ловушки для потенциальных резервуаров CO_2, что обосновывает их детальное изучение.

Анализ литолого-стратиграфического состава осадочной толщи

На основе имеющегося литологического описания скважин установлено, что в составе фундамента Илийской впадины участвуют отложения орогенного комплекса, представленные в большинстве случаев эффузивными образованиями пермской системы широко развитыми на крыльях Кетменского хребта, Зайлийского и Жонгарского Алатау. С орогенным этапом связаны крупные тектонические движения с появлением древних широтных разломов, по которым произошло погружение Илийской впадины и ее формирования как области седиментации. Заложение Илий-

ской впадины связано с верхним палеозоем, и в течение всего мезозоя и кайнозоя она была вовлечена в процессы прогибания, наиболее активизировавшиеся в неоген-четвертичное время (*рисунок 7*) [29].

Фациальная среда осадконакопления изучена по результатам скважинных исследований, включая стратиграфическую разбивку, литологическую колонку, генерализованное литологическое описание пород по ярусу, а также каротажные диаграммы [20, 21].

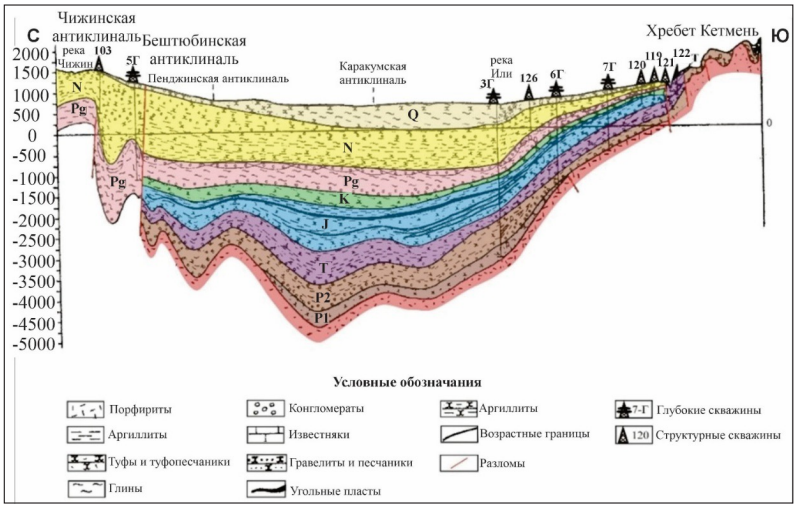


Рисунок 7 - **Геологический разрез восточной части Илийской впадины поллинии [18]**

По данным [18], отложения пермо-триасового комплекса наиболее вероятно представлены фациями конусов выноса (включая делювий, пролювий) с элементами флювиальной системы с разветвленной речной системой. В скважине 4Т триасовый комплекс по генерализованному литологическому описанию представлен темно-серыми алевролитами, с тонкослоистыми прослоями серого тонкозернистого песчаника с глинистыми темно серыми, черными сланцами и с остатками флоры. Эти данные предполагают возможное развитие междолинной аллювиальной системы (*рисунок 8*).

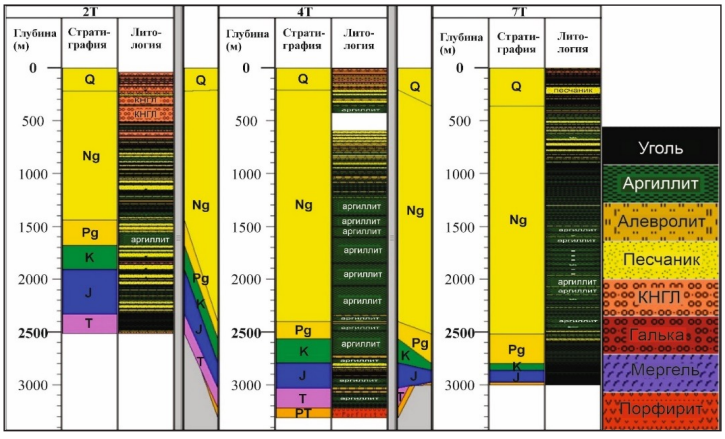


Рисунок 8 - **Общая литолого-стратиграфическая схема по скважинам 2Т, 4Т, 7Т**

Триас-юрские отложения, сформированные в речных и прибрежных фациях (скв. 2Т), включают угле- и органически обогащенные слои с потенциалом нефтематеринских толщ. Непрерывная глинистая толща верхнего мела и палеогена (скв. 4Т) выступает в роли регионального флюидоупора, а вышележащий кайнозойский озерно-речной комплекс с песчано-алевролитовыми прослоями (скв. 4Т, 7Т) формирует потенциальные коллекторы для миграции флюидов.

По скважинным данным, коллекторские свойства разреза оцениваются как хорошие. В пермской эффузивно-терригенной толще мощностью в сотни метров (с улучшением свойств от скв. 6Г к 3Г) доминируют туфопесчаники. В верхней перми коллекторами служат конгломераты и пропластки песчаников, перекрытые надежным хемогенно-терригенным флюидоупором.

Главные коллекторские горизонты приурочены к мезозойскому комплексу. В нижнем триасе коллектора представлены мелкозернистыми песчаниками с открытой пористостью 18-23%, проницаемостью 8–45 мД. Аналогичная по фильтрационно-емкостным свойствам песчано-конгломератовая толща выделяется в составе верхнего триаса. Пористость песчаников, занимающих до 70% объема отложений юрского периода, составляет 20–26%, проницаемость – от 40 мД до 100 мД. Меловые песчаники характеризуются открытой пористостью 20–30%.

Для кайнозойского комплекса отмечается ухудшение коллекторских свойств в целом. Однако проницаемые толщи встречаются по всему разрезу. Например, плиоценовые песчаники обладают открытой пористостью 10-22%.

В гидрогеологическом отношении Жаркентский артезианский бассейн в пределах Восточно-Илийского прогиба является относительно крупным многоярусным бассейном, областями питания которого служит его горные обрамления с абсолютными отметками до 3500 м. На территории выпадает большое количество осадков, широко развиты ледники, что способствует образованию постоянного подземного стока во впадину, где происходит формирование термальных вод. По данным гидрогеологических исследований выделяется семь водоносных комплексов: пермский, триасовый, юрский, меловой, палеогеновый, неогеновый и четвертичный.

В Жаркентской впадине выделяются пермский (от 1200 м) и триасовый (от 1080 м, на Усекской площади – от 2620 до 2990 м) термоводоносные комплексы, приуроченные к осадочно-эффузивным образованиям, песчаникам и конгломератам под надежными региональными покрышками.

Юрский комплекс на Усекской площади представлен нижне- и среднеюрскими песчаниками (до 70% разреза, с пористостью 20–26% и проницаемостью до 120 мД), разделенными глинистым водоупором мощностью от 220 м. Меловые горизонты, вскрытые на глубинах 782 и 2290 м, разделены глинистой пачкой и содержат ультрапресные воды различного состава (включая хлоридно-кальциевые в скв. 2Т). Палеоген-неогеновые отложения (50–2600 м) демонстрируют рост минерализации с юга на северо-запад, а четвертичный комплекс сформирован гидравлически взаимосвязанными аллювиально-пролювиальными образованиями предгорной зоны.

Следует отметить, что воды Жаркентской впадины термальные, в прогибе с глубины 2800-3600 м начинается геотермальная зона с температурой воды 75-100 °С

и больше (до 165 ^{0}C), причем в южной части её эта зона залегает глубже до 3600 м, чем в центральной.

Анализ материалов по Илийской впадине подтверждает благоприятные условия для хранения CO_2, причем наибольшим потенциалом обладают глубокие зоны Северо-Кетменьской моноклинали, сопредельные участки Коктальской мульды и восточная часть прогиба (Жаркентская впадина) с тремя локальными поднятиями: Айдарлы, Пенджин и Усек.

В разрезе этих структур выделено пять ключевых горизонтов (от палеозоя до плиоцена), среди которых миоцен-палеогеновый и юрский комплексы содержат песчаные коллекторы мощностью от 10 м с высокими фильтрационными свойствами. Озерные глины верхнеюрской кайргалинской свиты и верхнемел-палеогеновая глинистая толща служат региональными покрышками для триас-юрских и неоген-палеогеновых резервуаров. Широкое развитие разломной тектоники дополнительно формирует тектонически экранированные ловушки, оптимально отвечающие требованиям для изоляции CO_2.

В западной части Илийского бассейна (Алматинский прогиб) осадочный чехол представлен континентальными красноцветными неоген-четвертичными отложениями на палеозойском фундаменте, что делает структуру бесперспективной для формирования резервуаров. В то же время Жаркентская впадина обладает благоприятным разрезом, включающим триас-юрские терригенно-угленосные газогенерирующие толщи, потенциально коллекторскую меловой песчаную толщу и мощный палеоген-неогеновый региональный флюидоупор.

Жаркентский прогиб имеет мощную толщу осадочных отложений (до 5000 м), а в разрезе прогиба отложения перми, триаса и юры достигают мощности 1200 м. В нижнетриасовой толще природные резервуары могут достигать до 60% от ее объема. В кайнозойских отложениях коллекторские горизонты выявлены во всех стратиграфических подразделениях. Литологически они представлены преимущественно мелкозернистыми песчаниками с открытой пористостью 18–23%. В юрских и меловых отложениях природные резервуары составляют до 70% разреза. Коллекторы характеризуются открытой пористостью до 20–26% и высокой проницаемостью.

Выявленные локальные поднятия Айдарлы, Пенджин и Усек расположены в зонах, характеризующихся наиболее благоприятными геолого-структурными условиями, мощными, выдержанными по литологическому составу термоводоносными горизонтами, с повышенными значениями коллекторских свойств (Кп до 30%, Кпр. до 100 мД), залегающие на больших глубинах (от 2-х до 3,6 км), перекрытые водоупором, представленного пачкой глин, площадью, достигающей до несколько сотен квадратных километров. Многочисленные разрывные нарушения могут служить экранирующими свойствами для локальных ловушек.

Гидрогеологические условия определяются тесной связью подземных вод палеозойских и мезо-кайнозойских отложений (хлоридно-кальциевых и гидрокарбонатно-натриевых, с содержанием I, Br, B) с коллекторами. Высокое гипсометрическое положение обрамления впадины формирует крупные артезианские бассейны, связывая большинство локальных ловушек с действующей водонапорной системой.

Гидродинамика Восточно-Илийского прогиба контрастна: южная часть дренируется пресными напорными водами, тогда как северная зона изолирована от обла-

сти питания системой надвигов. Эти особенности определяют выбор участков под закачку, причем юрский водоносный горизонт с коллекторами мощностью более 10 м под надежными глинистыми покрышками полностью отвечает критериям для безопасного хранения CO_2.

Подсчет эффективного объема коллектора выполнен на основе фациального распределения коллекторских свойств в ПО Petrel. Моделирование геологических формаций осуществлено с применением технологии геостатического анализа и включало в себя построение структурной, литологической и петрофизической моделей.

При структурном моделировании размер ячейки по вертикали определялся с учетом степени литологической расчлененности разреза, а также минимальной мощности прослоев, составляющей 0,4 м. Глубина залегания моделируемого горизонта изменяется в пределах от –1566 м до –3700 м. Площадь моделирования составила 1 323 758 200 м².

Моделирование литологического параметра проводилось в упрощенном виде: толща пород была разделена на коллекторы и неколлекторы. Средняя мощность коллекторских интервалов принята на основании скважинных данных. После этого был построен трендовый куб для распределения литологических свойств в пределах трехмерной геологической модели методом SIS (Sequential Indicator Simulation). Для описания пространственной корреляции применялась сферическая модель вариограммы (Spherical) с общим пороговым значением (Total sill) 1,0 и эффектом самородка (Nugget) 0,0001.

Радиусы корреляции принимались равными 5000 м по главным и второстепенным горизонтальным направлениям и 5 м по вертикали, что отражает выраженную латеральную протяжённость и ограниченную вертикальную связность песчаных тел. Гистограмма распределения литологии по данным каротажа, апскейленных ячеек и итоговой 3Д модели показывает высокую степень их соответствия. Доля неколлекторских пород (фация 0) составляет около 51,5–51,7 %, тогда как доля коллекторов (фация 1) – 48,3–48,5 %. Минимальные расхождения между исходными данными и результатами моделирования (менее 0,2 %) свидетельствуют о корректном воспроизведении статистического распределения фаций и сохранении литологической структуры резервуара при построении геологической модели.

На основе литологического куба построена карта эффективных коллекторских толщин и посчитан эффективный объем водоносного горизонта – 15 776,1 тыс. м^3.

Согласно имеющимся скважинным данным, пористость коллектора здесь изменяется в пределах 12–22,5% при среднем значении 18,5, из чего следует, что эффективный поровый объем водоносного горизонта юрских отложений составляет 2 918,6 тыс. м^3. При этом проницаемость по керновым данным варьирует от 3,3 до 300,2 мД при среднем значении 127,6 мД, что позволяет рассматривать данный горизонт как перспективный объект для промышленной закачки CO_2.

Количественная оценка эффективной ёмкости юрского водоносного горизонта выполнена в соответствии с методикой IEAGHG для глубоких водоносных формаций. Расчёт проводился по выражению [31]:

$M_{CO_2} = V_{pore} E \rho_{CO_2}$, где

V_{pore} – эффективный поровый объём,

E – коэффициент эффективности хранения,

ρCO_2 – плотность CO_2 в пластовых условиях.

Эффективный поровый объём исследуемого юрского горизонта составляет 2 918,6 тыс. м³. Для обломочных коллекторов, к которым относятся песчаники исследуемого горизонта, согласно IEAGHG приняты коэффициенты эффективности 1,86%, 2,70% и 6,00%, соответствующие оценкам P10, P50 и P90. При пластовом давлении 255,7 бар и температуре 88,6 °C расчётная плотность сверхкритического CO2 составляет около 628,4 кг/м³. В результате эффективная ёмкость хранения оценивается в 34,11 тыс. т CO2 для P10, 49,52 тыс. т для P50 и 110,05 тыс. т для P90 (*Таблица 1*). Полученные значения представляют предварительную объёмную оценку и должны быть уточнены по результатам гидродинамического моделирования.

Таблица 1 - **Оценка эффективной ёмкости хранения CO_2 в юрском водоносном горизонте**

Сценарий IEAGHG	Коэффициент E, %	Доступный объём порового пространства, м³	Ёмкость, тыс. т CO_2
P10	1,86	54 286	34,11
P50	2,70	78 802	49,52
P90	6,00	175 116	110,05

Рассчитанные гидростатическим и геотермическим методами пластовое давление (255,7 бар) и температура (88,6 °C) на глубине 2600 м превышают критические параметры CO_2 (31,1 °C, 7,38 МПа). Это гарантирует переход углекислого газа в сверхкритическое состояние и его эффективное растворение в пластовых водах, что подтверждает пригодность горизонта для безопасного долгосрочного хранения CO_2.

Заключение и выводы

На основе комплексного анализа геолого-геофизических и гидрогеологических материалов получены следующие итоговые результаты оценки потенциала Илийского осадочного бассейна для подземного хранения CO_2:

- Научно обоснована возможность создания подземных хранилищ углекислого газа в Алматинском регионе, причем наиболее перспективной структурой является Жаркентская впадина, тогда как Западный (Алматинский) прогиб признан бесперспективным. В восточной части впадины выделены перспективные локальные структуры (Айдарлы, Пенджин и Усек).

- По результатам геостатического моделирования в ПО Petrel эффективный объем коллектора юрского водоносного горизонта составляет 15 776,1 тыс. м³, а его эффективный поровый объем – 2 918,6 тыс. м³ (при средней пористости 18,5% и проницаемости 127,6 мД).

- Термобарические параметры на глубине 2600 м (давление 255,7 бар, температура 88,6 °C) обеспечивают переход CO_2 в сверхкритическое состояние с плотностью 628,4 кг/м³.

- Эффективная емкость хранения CO_2 по методике IEAGHG оценивается в 34,11 тыс. т (P10, E = 1,86 %), 49,52 тыс. т (P50, E = 2,70 %) и 110,05 тыс. т (P90, E = 6,00 %). Надежную региональную покрышку формируют глинистые отложения верхней юры и мела.

Для дальнейшего освоения необходим комплекс дополнительных исследований, включая высокоразрешающую сейсморазведку 3D, поисково-разведочное бурение с отбором керна и численное гидродинамическое моделирование.

Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23490423).

ЛИТЕРАТУРА

1. McLaughlin H., Littlefield A.A., Menefee M., Kinzer A., Hull T., Sovacool B.K., Bazilian M.D., Kim J., Griffiths S. Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2023. – Vol. 177. – 113215. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113215.
2. Peres C.B., Resende P.M.R., Nunes L.J.R., Morais L.C.D. Advances in Carbon Capture and Use (CCU) Technologies: A Comprehensive Review and CO2 Mitigation Potential Analysis // Clean Technologies. – 2022. – Vol. 4. – P. 1193-1207. https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040073.
3. Global Status of CCS 2020: Report. – Melbourne: Global CCS Institute, 2020. – 44 p.
4. Mo J.M., Xue V., Holdren J.P. Carbon capture, utilization and storage: technologies and costs in the US context. – Belfer Center for Science and International Affairs, 2022. URL: https://www.belfercenter.org/publication/carbon-capture-utilization-and-storage-technologiesand-costs-us-context.
5. Дымочкина М.Г. и др. Геологический потенциал улавливания и хранения диоксида углерода в Российской Федерации // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 12. – С. 20–23. [Dymochkina M.G. et al. Geologicheskiy potentsial ulavlivaniya i khraneniya dioksida ugleroda v Rossiyskoy Federatsii // Neftyanoe khozyaystvo. – 2021. – No. 12. – P. 20–23.]
6. Соломон С. Хранение углекислого газа: геологическая и экологическая безопасность — исследование на примере газового месторождения Слейпнер (Sleipner) в Норвегии. – Осло: Фонд Беллона, 2007. – 128 с.
7. Пушкарева Д.А. Международный опыт, проблемы и перспективы подземной утилизации кислых неуглеводородных газов // Вести газовой науки. – 2021. – № 1(46). – С. 209–221. [Pushkareva D.A. Mezhdunarodnyy opyt, problemy i perspektivy podzemnoy utilizatsii kislykh neuglevodorodnykh gazov // Vesti gazovoy nauki. – 2021. – No. 1(46). – P. 209–221.]
8. Bachu S. Screening and ranking of sedimentary basins for CO2 sequestration in geological media in response to climate change // Environmental Geology. – 2003. – Vol. 44. – P. 277–289. https://doi.org/10.1007/s00254-003-0762-9.
9. Gunter V.D., Benson S., Bachu S. The Role of Hydrogeological and Geochemical Sequestration in Sedimentary Basins for Reliable Geological Storage of Carbon Dioxide // Geological Society of London, Special Publication. – 2004. – № 233. – P. 129–145. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.233.01.09.
10. Геологическое хранение CO_2 в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии: первичный анализ потенциала и политики : Отчет ЕЭК ООН [Geological Storage of CO_2 in Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia: Initial Analysis of Potential and Policy: UNECE Report]. – Geneva, 2021. – 45 p.
11. Bock B., Richard Rhudy R., Herzog H., Klett M. Economic evaluation of CO2 storage and sequestration efficiency improvement options. – 2003. – 476 p. URL: https://doi.org/10.2172/826435.

12. Bradshaw J., Bachu S., Bonijoly D., Burruss R., Holloway S., Christensen N.P., MathiassenO.M. CO2 storage capacity estimation: issues and development of standards // Energy Procedia. – 2007. – Vol. 1. – P. 62–68. https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00027-8.
13. Celia M.A., Nordbotten J.M., Bachu S., Dobossy M., Court B. Risk of leakage versus depth of injection in geological storage // Energy Procedia. – 2009. – № 1 (1). – P. 2573–2580. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.022.
14. Хусаин Б.Х, Даржоков Т.Д., Кенесары А.Ж., Тюлебаева Р.А. Гидродинамическое моделирование закачки и хранения CO2 в водоносном горизонте Прииртышского осадочного бассейна // Нефть и Газ. – 2025. – № 3 (147). – С. 158–166. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2025-3.10.
15. Abuov E., Nurlan S., Woojin Lee. CO2 storage potential in sedimentary basins of Kazakhstan // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2020. – Vol. 103. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103186.
16. Салимбаева Р.А. Экологические проблемы Южного Казахстана и их влияние на строительство экономического пояса вдоль нового Шелкового пути // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12-6. – С. 1105–1108. [Salimbayeva R.A. Ekologicheskie problemy Yuzhnogo Kazakhstana i ikh vliyanie na stroitelstvo ekonomicheskogo poyasa vdol novogo Shelkovogo puti // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2015. – No. 12-6. – P. 1105–1108.]
17. Kobegenova Kh.N., Sadykova D.A., Medeuova G. Ecological condition of the city of Almaty // Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences. – 2020. – Vol. 7 (9). – P. 295–302. https://doi.org/10.38065/euroasiaorg.157.
18. 18. Атлас нефтегазоносных и перспективных осадочных бассейнов Республики Казахстан [Atlas of Oil and Gas Bearing and Prospective Sedimentary Basins of the Republic of Kazakhstan] / У. Акчулаков, Г.Г. Жолтаев, Б.М. Куандыков и др. – Астана, 2014. – 97 с.
19. Map of petroleum potential of Kazakhstan. 1:250000 / Ed. by S.Zh. Daukeeva, B.S. Uzhkenova, A.A. Abdullina et al. – 2002.
20. Chadwick A., Arts R., Bernstone C. et al. Best practice for the storage of CO_2 in saline aquifers. – UK: British Geological Survey, 2008. – 267 p. https://static.ngu.no/FileArchive/91/CO2STORE_BPM_final_small.pdf.
21. Смоляр В. А. Современные условия формирования подземных вод на территории Южно-Балхашского и Копа-Илийского водоносных бассейнов // Геология и охрана недр. – 2019. – № 2 (71). – С. 67–77. [Smolyar V. A. Present-day conditions of groundwater formation in the territory of South Balkhash and Kopa-ili groundwater basins. Geology and protection of mineral resources. - 2019. - № 2 (71). - P. 67–77.]
22. Absametov M.K. et al. Perspektivy osvoeniya gidrogeotermalnykh i gidrogeomineralnykh resursov Kazakhstana [Prospects for the development of hydrogeothermal and hydrogeomineral resources of Kazakhstan] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2014. – Vol. 325. – No. 1. – P. 110–118.
23. 23. Вдовухина Т.В., Искакова Г.К. Водные ресурсы Казахстана и их использование. – Алматы, 1995. – 233 с. [Vdovukhina T.V., Iskakova G.K. Water resources of Kazakhstan and their use. – Almaty, 1995. – 233 p.]
24. Абилхасимов Х.Б. Закономерности пространственного размещения природных резервуаров Прикаспийской впадины // Геология нефти и газа. – 2007. – № 6. – С. 11–18. [Abilkhasimov K.B. Spatial placement features of natural reservoirs in the Pre-Caspian depression // Geology of Oil and Gas. – 2007. – No. 6. – P. 11–18.]

25. Жолтаев Г.Ж., Абильхасимов Х.Б. Седиментационные модели и перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений Прикаспийской синеклизы и Устюрта // Геология регионов Каспийского и Аральского морей. – Алматы: КазГЕО, 2004. – С. 296–306. [Zholtaev G.Zh., Abilkhasimov Kh.B. Sedimentological models and petroleum potential of Paleozoic deposits of the Caspian syneclise and Ustyurt // Geology of the Caspian and Aral Sea Regions. – Almaty: KazGEO, 2004. – P. 296–306.]
26. Череповицын А.Е., Смирнова Н.В., Ильинова А.А. О захоронении CO2 в геологических формациях: экономико-общественные аспекты // Ресурсы. Информация. Снабжение. Конкуренция. – 2013. – № 4. – С. 171–174. [Cherepovitsyn A.E., Smirnova N.V., Ilyinova A.A. CO2 sequestration in geological formations: socio-economic aspects // Resources. Information. Supply. Competition. – 2013. – No. 4. – P. 171–174.]
27. Геология СССР. Южный Казахстан. Т. XL, кн. 1–2 / гл. ред. А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1971. – 574 с. [Geology of the USSR. Southern Kazakhstan. Vol. XL, Book 1–2. – Moscow: Nedra, 1971. – 574 p.]
28. Алексеев В.П. и др. Тектоника, формации и нефтегазоносность межгорных впадин. Средняя Азия и Казахстан. – М.: Наука, 1988. – 128 с. [Alekseev V.P. et al. Tectonics, formations, and petroleum potential of intermountain depressions. Central Asia and Kazakhstan. – Moscow: Nauka, 1988. – 128 p.]
29. Оздоев С.М., Попов В.А., Тлеуберди Н. Условия образования пород в истории геологического развития Илийской впадины в связи с перспективами нефтегазоносности // Нефть и газ. – 2019. – № 3 (111). – С. 6–13. – URL: https://neft-gas.kz/f/sm_ozdoev_va_popov_n_tleuberdi.pdf (дата обращения: 12.10.2026).
30. Tulemissova Zh.S., Buslov M.M. Geodynamic conditions of formation of sedimentary basins of South Kazakhstan (Shu-Sarysu, Pre-Balkhash, Ili) // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2019. – V. 319. – P. 5-7. https://doi.org/10.1088/1755-1315/319/1/012021.
31. Phillips, C. CO2 Conditioning Technologies: Strategies & Cost Consideration for Commercial Deployment / C. Phillips, S. Ferguson, S. Florence [et al.]. – 2026. – (Technical Report; № 2026-06). https://doi.org/10.62849/2026-06.