УДК 550.3, 550.34.013.2

Абетов А.Е., Катренов Ж.С., Саменов Е.Р.

БЕСПРОВОДНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА В КАЗАХСТАНЕ КАК ВЕКТОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ МАСШТАБИРОВАНИЯ

		
А.Е. АБЕТОВ, доктор геол.-мин. наук, профессор Satbayev University, академик НАН РК, abetov.auez@mail.ru	**Ж.С. КАТРЕНОВ*,** Генеральный директор ТОО Samga Petroleum, докторант Satbayev University zkatrenov@samgagroup.com	**Е.Р. САМЕНОВ,** Руководитель отдела новых технологий ТОО Samga Petroleum, магистрант Satbayev University e.samenov@samgagroup.com

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

Проведённая апробация беспроводной сейсмической технологии STRYDE в Актюбинской области в зимний период обеспечила всестороннюю оценку её технологических, эксплуатационных и геолого-информационных характеристик. Полевые испытания, проведённые при преобладании отрицательных температур, позволили объективно сопоставить эффективность STRYDE с традиционными кабельными системами, выявив её потенциал в условиях повышенных требований к качеству и надёжности сейсмических работ, а главное к полученным результатам.

Ключевыми преимуществами технологии STRYDE являются высокая степень автономности, компактность оборудования, устойчивость к внешним воздействиям, снижение логистических издержек и стабильное качество регистрации данных в труднодоступных и топографически сложных районах. Интеграция с навигационно-координатной системой Trimble R7 и оборудованием NIMBLE SYSTEM обеспечила эффективное управление полевыми процессами и соответствие требованиям современной отраслевой обработки данных.

В рамках проведенных опытно-методических работ (ОМР) получен высокоинформативный временной разрез, позволяющий достоверно интерпретировать отражающие горизонты на глубинах до 8500 м и более, выявить признаки верхнепалеозойских рифовых построек, а также уточнить тектоническую и сейсмофациальную структуру северо-восточного борта Прикаспийской впадины. Сравнительный анализ с результатами, полученными при помощи кабельных систем, подтвердил преимущество STRYDE в детальности изображения, надёжности регистрации и интерпретируемости глубинных отражений.

Результаты ОМР свидетельствуют о высокой технологической зрелости и масштабируемости технологии STRYDE, обосновывает целесообразность её включения в типовые геолого-технические задания для МОГТ-2D и МОГТ-3D в рамках геологоразведочных проектов Республики Казахстан. Полученные данные обладают не только прикладной, но и

научной значимостью, способствуя уточнению геологических моделей и интерпретации глубокозалегающих слабоизученных структур.

Системная интеграция беспроводной сейсмической технологии представляет собой одно из ключевых направлений технологической трансформации геологоразведочной отрасли сектора Казахстана. Целесообразным видится расширение её применения в труднодоступных и логистически ограниченных регионах, в разнообразных природно-геологических условиях, а также развитие интерпретационных методик и моделирования, включение накопленного практического опыта в образовательные программы подготовки специалистов в области сейсморазведки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *бескабельная сейсморазведка, STRYDE, беспроводная технология, сейсморазведка нового поколения, МОГТ-2D, автономность оборудования, интерпретация, подсолевые структуры, высокоплотная сейсморазведка, системный подход, сравнительный анализ.*

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ СЫМСЫЗ СЕЙСМИКАЛЫҚ БАРЛАУ - ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯНЫҢ ВЕКТОРЫ: БАСТАПҚЫ ЕНГІЗУ НӘТИЖЕЛЕРІ МЕН АУҚЫМЫН КЕҢЕЙТУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

А.Е. АБЕТОВ, геология-минералогия ғылымдарының докторы, Satbayev University профессоры, ҚР ҰҒА академигі, abetov.auez@mail.ru;
Ж.С. КАТРЕНОВ, «Самға Петролеум» ЖШС Бас директоры, Satbayev University докторанты,
zkatrenov@samgagroup.com;
Е.Р. САМЕНОВ, «Самға Петролеум» ЖШС Жаңа технологиялар бөлімінің басшысы, Satbayev University магистранты, e.samenov@samgagroup.com.

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

Ақтөбе облысында қыс мезгілінде STRYDE сымсыз сейсмикалық технологиясының апробациясы жүргізіліп, оның технологиялық, пайдаланушылық және геологиялық-ақпараттық сипаттамаларына жан-жақты баға берілді. Теріс температура жағдайында өткен далалық сынақтар STRYDE технологиясының тиімділігін дәстүрлі кабельдік жүйелермен объективті түрде салыстыруға мүмкіндік беріп, сейсмикалық жұмыстардың сапасы мен сенімділігіне, ең бастысы, алынған нәтижелерге қойылатын жоғары талаптар жағдайындағы әлеуетін айқындады.

STRYDE технологиясының негізгі артықшылықтары – жабдықтың жоғары автономдылығы, ықшамдылығы, сыртқы әсерлерге төзімділігі, логистикалық шығындардың азаюы және қиын қолжетімді, топографиялық тұрғыдан күрделі аудандарда деректерді тұрақты сапамен тіркеу мүмкіндігі. *Trimble R7 навигациялық-координаттық жүйесімен және NIMBLE SYSTEM жабдығымен интеграциясы далалық жұмыстарды тиімді басқаруды және заманауи салалық деректерді өңдеу талаптарына сәйкестікті қамтамасыз етті.*

Жүргізілген тәжірибелік-әдістемелік жұмыстар (ТӘЖ) аясында 8500 метр және одан да терең деңгейлерде шағылдырушы горизонттарды сенімді интерпретациялауға, жоғарғы палеозой рифтік құрылымдарының белгілерін анықтауға, сондай-ақ Прикаспий ойпатының солтүстік-шығыс жиегінің тектоникалық және сейсмофациальдық құрылымын нақтылауға мүмкіндік беретін жоғары ақпараттылыққа ие уақыттық кескін алынды. STRYDE және кабельдік жүйелер арқылы алынған нәтижелердің салыстырмалы талдауы технологиясының бейнелеу нақтылығы, тіркеу сенімділігі және терең шағылуларды интерпретациялау мүмкіндігі тұрғысынан артықшылықтарын растады.

ТӘЖ нәтижелері STRYDE технологиясының жоғары технологиялық жетілуі мен ауқымдылығын көрсетеді және оны Қазақстан Республикасындағы геологиялық барлау

жобалары шеңберінде ОТНӘ-2D және ОТНӘ-3D типтік геологиялық-техникалық тапсырмаларына енгізудің орындылығын дәлелдейді. Алынған деректер қолданбалы маңызымен қатар, терең, әлсіз зерттелген құрылымдарды интерпретациялау мен геологиялық модельдерді нақтылауға мүмкіндік беретін ғылыми құндылыққа да ие.

Сымсыз сейсмикалық технологияны жүйелі интеграциялау – Қазақстан геологиялық барлау секторының технологиялық трансформациясының басты бағыттарының бірі болып табылады. Бұл технологияны күрделі табиғи-геологиялық және логистикалық жағынан шектелген өңірлерде, әртүрлі экологиялық жағдайларда кеңінен қолдану, интерпретациялық әдістемелер мен модельдеуді дамыту, сондай-ақ сейсморазведка саласындағы мамандарды даярлау жөніндегі білім беру бағдарламаларына жинақталған практикалық тәжірибені енгізу орынды болып табылады.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *кабельсіз сейсмикалық барлау, STRYDE, сымсыз технология, жаңа буындағы сейсмикалық барлау, МОГТ-2D, жабдықтың автономдылығы, интерпретация, тұзасты құрылымдар, жоғары тығыздықты сейсмикалық барлау, жүйелі тәсіл, салыстырмалы талдау*

WIRELESS SEISMIC IN KAZAKHSTAN AS A VECTOR OF TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION: INITIAL IMPLEMENTATION RESULTS AND OPPORTUNITIES FOR SCALING

A.E. ABETOV, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor at Satbayev University, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, abetov.auez@mail.ru;
Z.S. KATRENOV, General Director, Samga Petroleum LLP; PhD student, Satbayev University zkatrenov@samgagroup.com;
Y.R. SAMENOV, Head of New Technologies Department, Samga Petroleum LLP; Master's student, Satbayev University, e.samenov@samgagroup.com.

K.I. SATBAYEV KAZAKH NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY,
Republic of Kazakhstan, Almaty, 050013, 22 Satbaev St.

The pilot testing of the STRYDE wireless seismic acquisition technology in the Aktobe region during the winter season enabled a comprehensive evaluation of its technological, operational, and geoinformation characteristics. The field trials, conducted under predominantly sub-zero temperatures, provided an objective comparison of the efficiency of STRYDE with conventional cabled systems, demonstrating its potential under increased demands for the quality and reliability of seismic surveys, and most importantly, for the resulting data.

The key advantages of the STRYDE technology include a high degree of autonomy, compact equipment design, resistance to environmental impacts, reduced logistical costs, and consistently high-quality data acquisition in remote and topographically challenging areas. Integration with the Trimble R7 navigation-coordinate system and NIMBLE SYSTEM equipment ensured effective management of field operations and compliance with the requirements of modern industry-standard data processing.

As part of the experimental and methodological work (EMW), a highly informative seismic time section was obtained, enabling reliable interpretation of reflective horizons at depths of up to 8,500 meters and beyond, identification of Upper Paleozoic reef structures, and refinement of the tectonic and seismofacies structure of the northeastern margin of the Pre-Caspian Basin. A comparative analysis with results obtained using cabled systems confirmed STRYDE's advantages in imaging detail, recording reliability, and interpretability of deep reflections.

The EMW results confirm the high technological maturity and scalability of the STRYDE system and justify its inclusion in standard geological and technical specifications for 2D and 3D

Common Depth Point Seismic Surveys (CDP-2D and CDP-3D) within exploration projects in the Republic of Kazakhstan. The acquired data possess not only applied but also scientific value, contributing to the refinement of geological models and the interpretation of deep-seated, poorly studied structures.

The systemic integration of wireless seismic technology represents one of the key directions in the technological transformation of Kazakhstan's exploration industry. It is deemed expedient to expand its application in remote and logistically constrained regions, across various natural and geological settings, and to advance interpretation methodologies and modeling. Furthermore, incorporating the accumulated practical experience into educational programs for training seismic exploration specialists is recommended.

***Keywords**: cableless seismic, STRYDE, wireless technology, next-generation seismic exploration, CDP-2D, equipment autonomy, interpretation, subsalt structures, high-density acquisition seismic, systems approach, comparative analysis.*

Введение

Традиционно при проведение поисково-разведочных работ на нефть и газ в осадочно-породных бассейнах Казахстана используются сейсморазведка с кабельными системами регистрации сейсмических данных. Вместе с тем, все постоянно возрастающие требования к качеству волновой картины диктуют необходимость увеличения плотности сейсмических трасс и увеличение разрешенности сейсмической записи за счет роста количества активных модулей сбора данных и групп сейсмоприёмников, что автоматически ведет к удорожанию геологоразведочных работ.

Нивелирование затрат при повышении качества и точности построения геологических моделей может быть достигнуто за счёт применения бескабельных систем сбора сейсмических данных, расширяющих возможности сейсморазведки, в том числе за счет эффективной обработки сейсмических данных.

Технологии беспроводных систем регистрации сейсмических волн в последние годы получили широкое распространение в международной практике и зарекомендовали себя как эффективный инструмент при проведении как опытно-методических, так и производственных сейсморазведочных работ. Их внедрение демонстрирует высокую эффективность в разнообразных природно-климатических и геологических условиях, что подтверждается результатами реализации проектов в таких странах, как Канада, Норвегия, ОАЭ, США, Россия, Саудовская Аравия и другие регионы с суровыми климатами — как арктического, так и аридного типа — а также в труднодоступных районах со сложным рельефом [13, 16, 17, 20].

Практическая применимость STRYDE в столь разных условиях указывает на её высокую адаптивность и надёжность, позволяя позиционировать систему как универсальное решение для высокоплотной сейсморазведки в условиях повышенной технологической сложности. К числу её ключевых технических преимуществ относятся компактность, энергоэффективность, оперативность развертывания и устойчивость к внешним воздействиям, что особенно актуально при работе в экстремальных или удалённых зонах [14, 15, 18, 19].

Таким образом, выбор технологии STRYDE для применения в Казахстане обусловлен как её техническими преимуществами, так и подтверждённой эффективностью в аналогичных климатических и географических условиях за рубежом. Международный опыт эксплуатации данной системы представляет собой весомое научное и практическое основание для её интеграции в отечественную сейсморазведочную практику, способствуя повышению эффективности, надёжности и адаптивности полевых работ [13, 18, 21].

Применение технологии STRYDE позволит оптимизировать ключевые аспекты полевого этапа: упростить развертывание оборудования в условиях сложного рельефа, гибко масштабировать систему под конкретные геологоразведочные задачи, а также существенно снизить массу аппаратуры и сократить операционные затраты при реализации будущих проектов.

Беря во внимание современные мировые тренды и положительный опыт проведения сейсморазведочных работ, ведущей нефтегазовой компанией Казахстана было принято решение провести полевые испытания современной бескабельной регистрирующей системой компании STRYDE-принципиально новой технологии геологоразведочных работ следующего поколения.

В целях реализации данного решения на одной из разведочных площадей расположенной в северо-восточном борту Прикаспийской впадины были проведены опытно-методические работs (ОМР) методом МОГТ-2D с применением высокоплотной беспроводной системы регистрации STRYDE с целью получения данных высокого разрешения от глубоко залегающих подсолевых отложений верхнего палеозоя

Большая плотность сейсмических наблюдений была достигнута за счет увеличения количества каналов аппаратуры систем измерения упругих колебаний как минимум в 5 раз, что было вызвано сложностью геологического строения целевых объектов на площади ОМР.

Геологический очерк. Объектами исследований опытно-методических работ (ОМР) стали подсолевые отложения верхнего палеозоя на одной из площадей на северо-восточном борту Прикаспийской впадины.

Рельеф местности представляет собой слабо волнистую равнину, рассечённую речными руслами, балками, оврагами и отдельными возвышенностями. Климат резко континентальный со значительными суточными перепадами температуры и низкой влажность воздуха. Гидрографическая сеть развита слабо и относится к бассейну реки Елек. Через площадь ОМР проходят автодороги международного и республиканского значения (Самара–Шымкент, Актобе–Орск, Актобе–Атырау и др.), а также действующие нефте- и газопроводы местного и регионального значения.

Краткая оценка ранее проведенных исследований. Площадь ОМР характеризуется неравномерной степенью изученности геофизическими методами и бурением.

В период 1980–1990-х годах, на основе гравиметрических и магнитометрических исследований, включая аэрогеофизику, была построена блоковая модель фундамента, закартированы региональные разломы и уточнены границы тектонических элементов. Однако ограниченная эффективность грави-магниторазведки в осадочном чехле обусловлена низкой контрастностью физических свойств пород и технологическими барьерами

Сейсмические данные по северо-восточному борту Прикаспийской впадины, полученные в разные годы и разными методами (МОВ, МРНП, КМПВ, МОГТ), неоднородны по качеству; часть материалов устарела и ограничена в использовании для геологической интерпретации. Тем не менее были выделены антиклинальные структуры (Александровская, Жилянская, Бестамакская и др.), приуроченные к субмеридиональным зонам.

Существенные результаты были достигнуты в ходе МОГТ-2D/3D съёмок конца 1980-х — начала 1990-х и глубокого бурения более 20 скважин, включая три параметрические, что подтвердило нефтегазоносность подсолевых отложений в стратиграфическом диапазоне от среднего девона до нижней перми. Однако изученность региона остаётся фрагментарной: пробуренные скважины сосредоточены в пределах зоны передовых складок и вскрывают лишь молассовые толщи верхнего карбона и нижней перми (рис.1)., что осложняет построение достоверной геологической модели.

Литолого-стратиграфическая характеристика разреза. Геологическое строение района ОМР включает осадочные образования от предполагаемых рифей-вендских (?) до четвертичных, при этом бурением вскрыты отложения, начиная с девона. Разрез подразделяется на подсолевой (Pz_1–P_1art) и надсолевой (P_2–Q) комплексы пород, разделённые мощной кунгурской соленосной толщей. В пределах восточного борта подсолевые отложения, начиная от девона, формируют крупные карбонатные платформы Жанажолскую и Темирскую, которые отличаются литолого- стратиграфическим составом пород [1-3, 10, 11].

Верхнекаменноугольно-нижнепермская толща сложена преимущественно сероцветными песчано-глинистыми породами с прослоями известняков и известковых гравелитов (рис.1). В сакмаро-артинских отложениях увеличивается содержание полимиктовых

конгломератов и гравелитов. Мощность вскрытых верхнекаменноугольных отложений составляет около 330 м, нижнепермских — до 4000 м. Углы падения слоёв варьируют от 15° до 70°.

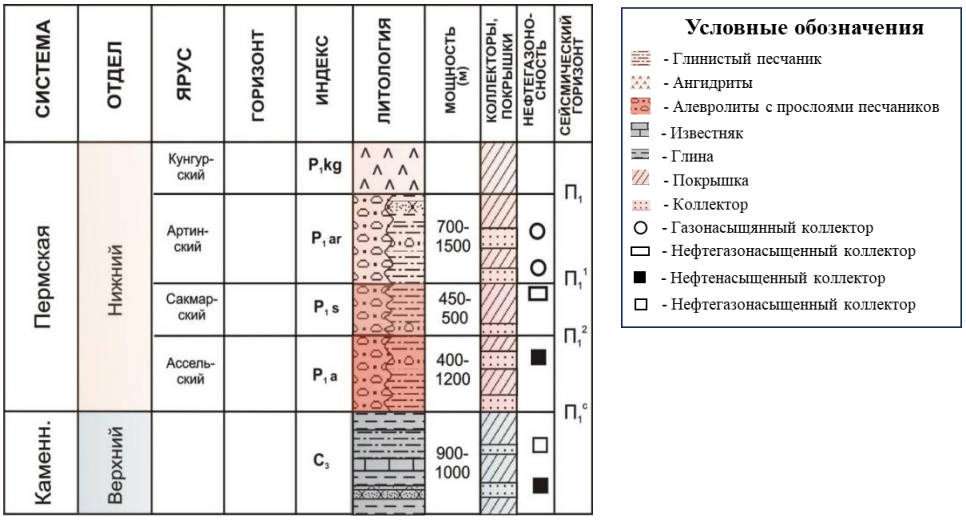


Рисунок 1 - **Сводный литолого-стратиграфический разрез подсолевых отложений Предуральского краевого прогиба (по данным Абилхасимова Х.Б., 2021)**

Литолого-фациальные зоны преимущественно соответствуют тектоническому районированию, что указывает на тесную связь седиментации с тектоникой. Однако полное совпадение границ наблюдается не всегда, поскольку тектоническое районирование отражает современную структуру, тогда как фациальное — палеогеографические особенности осадконакопления.

Тектоника. Площадь ОМР приурочена к зоне замыкания южного борта Предуральского краевого прогиба (ПКП). К югу расположены крупные нефтегазовые месторождения: Урихтау, Кенкияк, Жанажол, Алибекмола, Бозоба, Кожасай и др.

На территории Казахстана ПКП представлен Яйсанской впадиной, ограниченной с юга Темирским блоком, с запада — Кумакским прогибом, разделяющим ПКП и Ново-Алексеевский прогиб, а также разграничивающим Кобланды-Тамдинскую карбонатную зону и Темирский блок [1, 3, 5, 7, 8]. С востока впадина граничит со структурами Актюбинского Приуралья (Рис.2).

В строении ПКП выделяются три зоны: западная, восточная и центральная. Западный борт представлен карбонатными рифами карбонового и нижнепермского возраста, сформированными в зоне ступенеобразного погружения девон-карбонатных пород. Восточный борт сложен мощной толщей терригенных флишевых отложений нижней перми (до 2700 м). Центральная зона характеризуется максимальным погружением и развитием тонких асельско-артинских фаций (5–83 м), перекрывающих карбонатные платформенные отложения и рифовые постройки возраста C_3–P_1, локализованных в пределах антиклиналей.

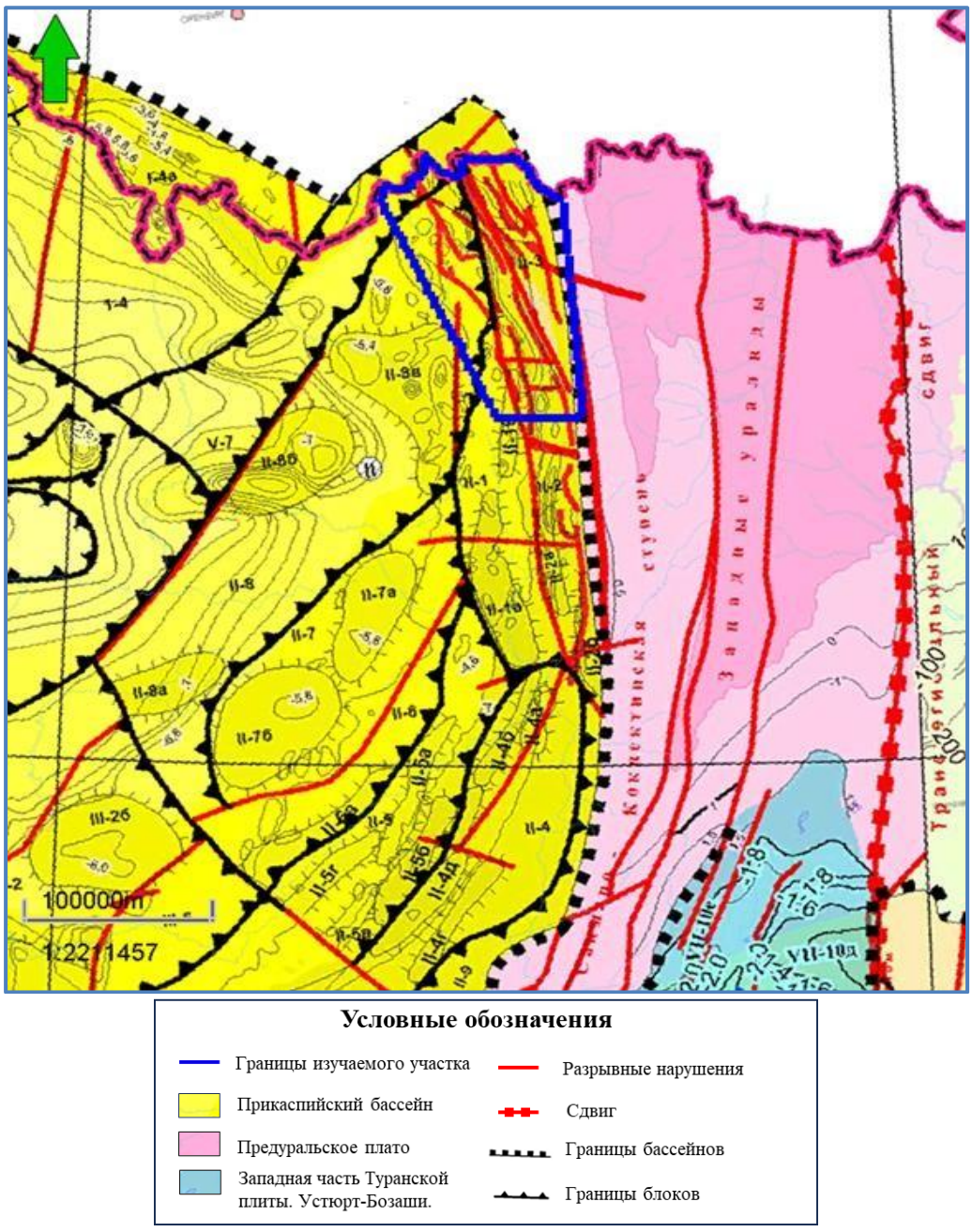


Рисунок 2 – **Тектоническая схема северо-восточного борта Прикаспийской впадины с нанесенным участком ОМР на тектонической схеме (*по данным Абилхасимова Х.Б., 2012)***

Активное прогибание ПКП в позднекаменноугольный и раннепермский периоды способствовало накоплению мощных терригенных толщ. Последующее унаследованное опускание привело к погружению органогенных подсолевых отложений — верхнедевонских и верхнегжельско-артинских — на глубины, обеспечившие их вхождение в основную фазу нефтеобразования к позднепермскому времени и концу мезозоя соответственно.

Формирование структурных ловушек, восходящих к артинскому веку, предшествовало фазе активной генерации и миграции углеводородов. Эти ловушки были эффективно экранированы мощными галогенными отложениями кунгурского яруса, что создало условия для аккумуляции и последующего сохранения залежей нефти и газа.

Структурные ловушки, сформировавшиеся в артинский век, были своевременно экранированы галогенными толщами кунгурского яруса, что обеспечило сохранность углеводородных залежей. Палеозойские отложения характеризуются резким падением в направлении

депоцентров Прикаспийской впадины по системе региональных разломов, вдоль которых формируются линейные сводовые структуры тектонического и седиментационного происхождения, игравшие важную роль в нефтегазонакоплении региона.

Нефтегазоносность. Анализ данных по мезозойским отложениям на смежных площадях (мощностью до 350 м) показывает крайне низкую нефтегазоносность, несмотря на обилие многочисленность пробуренных картировочных, разведочных, параметрических и поисковых скважин [3, 11, 12]. Газонефтепроявления зафиксированы лишь эпизодически, что указывает на маловероятность открытия в этих отложениях промышленных скоплений.

В толще верхнепермских красноцветов на Джусинской складке отмечены битуминозность и асфальтовые прожилки. Следы сероводорода и битумов установлены в одновозрастных известняках на Жилянской, Петропавловской и Белогорской структурах.

Значительные нефтегазопроявления отмечены в кунгурских отложениях Джусинской складки, а также в пределах Актюбинско-Биштамакской и Западно-Актюбинской структур. Нефтегазопроявления также установлены в артинских и подстилающих отложениях нижней перми и карбона, в частности, на Петропавловской и Жилянской складках.

В каменноугольных породах Александровской, Петропавловской и Белогорской структур зафиксированы проявления газа в виде выпотов, примазок и характерного запаха. При этом коллекторские свойства пород в целом невысоки: общая пористость песчаников колеблется от 7,3% (Петропавловская складка) до 11,3% (Западно-Актюбинская структура), открытая — от 7,2% до 9,0%.

Для докунгурских отложений нижней перми характерны сравнительно благоприятные емкостно-фильтрационные свойства, с тенденцией к улучшению в западном направлении. Так, на Петропавловской площади общая пористость составляет 9,3%, открытая — 7,8%; на Жилянской складке — 10,0% и 8,4% соответственно. На наиболее запалощадях, таких как Западно-Актюбинская и Актюбинско-Биштамакская структуры, значения достигают 11,3% (общая) и 9,0% (открытая), что свидетельствует о возрастающем коллекторском потенциале в данном направлении.

Широко развиты трещиноватые и кавернозные коллекторы, в образцах керна из которых зафиксированы прямые признаки наличия нефти. Фильтрационные свойства трещиноватых пород оцениваются как удовлетворительные.

Коллекторы ПКП характеризуются сложным строением, что требует специфических методов их вскрытия и опробования. Выделяются четыре основных типа коллекторов: порово-трещиноватый, кавернозно-порово-трещинный, трещинный и поровый.

Аппаратурно- методическое обеспечение и данные. Протяжённость опытного профиля МОГТ-2D составила 25 км. Отработан он был на территории с выраженным пересечённым рельефом, включая пойменные участки реки и развитую овражную сеть. При проектировании и выполнении ОМР особое внимание уделялось минимизации влияния возможных источников техногенных шумов, таких как автомобильная трасса Актобе–Атырау и Западно-Казахстанская железная дорога с интенсивным железнодорожным движением.

Дополнительную сложность при проведении работ обусловили зимние полевые условия: средняя высота снежного покрова составляла 10–30 см, а средняя температура воздуха достигала −16 °C.

На начальном этапе ОМР были решены задачи, нацеленные на изучение и анализ интенсивности полезного сигнала, микросейсм, их соотношение, а также доминантная частота сигнала во временном интервале регистрации.

Перед началом работ: а) выполнена рекогносцировка местности; б) определены возможности передвижения сейсмических бригад по профилю и установке полевого оборудования в необходимом количестве.

Проведены тестовые работы и определена оптимальная методика установки регистрирующего оборудования, способы их установки, обеспечивающую надлежащего контакт сейсмоприемников с грунтом.

Для оценки качества контакта сейсмоприемников (нодов) с грунтом и изучения влияния микросейсмов на регистрируемые данные было организовано тестирование датчиков на соприкосновение с грунтом. В рамках этих работ были развернуты три тестовые линии, каждая из которых включала по 10 датчиков, что позволило определить оптимальные условия их установки.

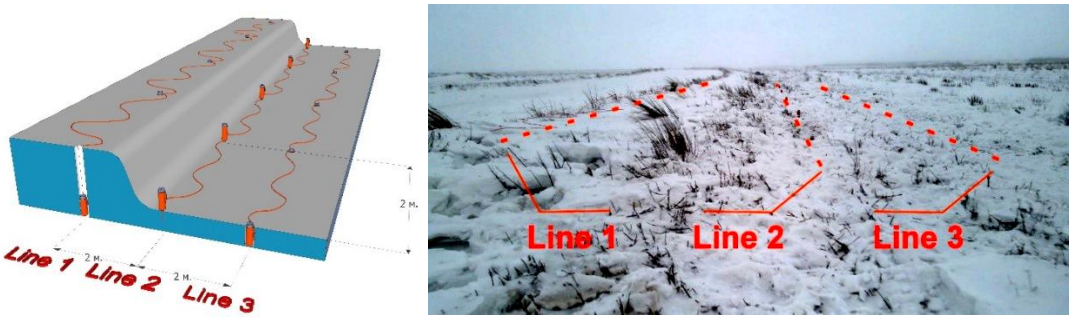


Рисунок 3-**Тест на контакт нодов с грунтом (снежным покровом)**

По линии 1 сейсмоприемники устанавливались в снег до соприкосновения с грунтом, без использования технологического штыря. По линии 2 сейсмоприемники устанавливались в утрамбованный снег с использованием технологического штыря. По линии 3 сейсмоприемники устанавливались с заглублением в грунт без использования технологического штыря (рис.3).

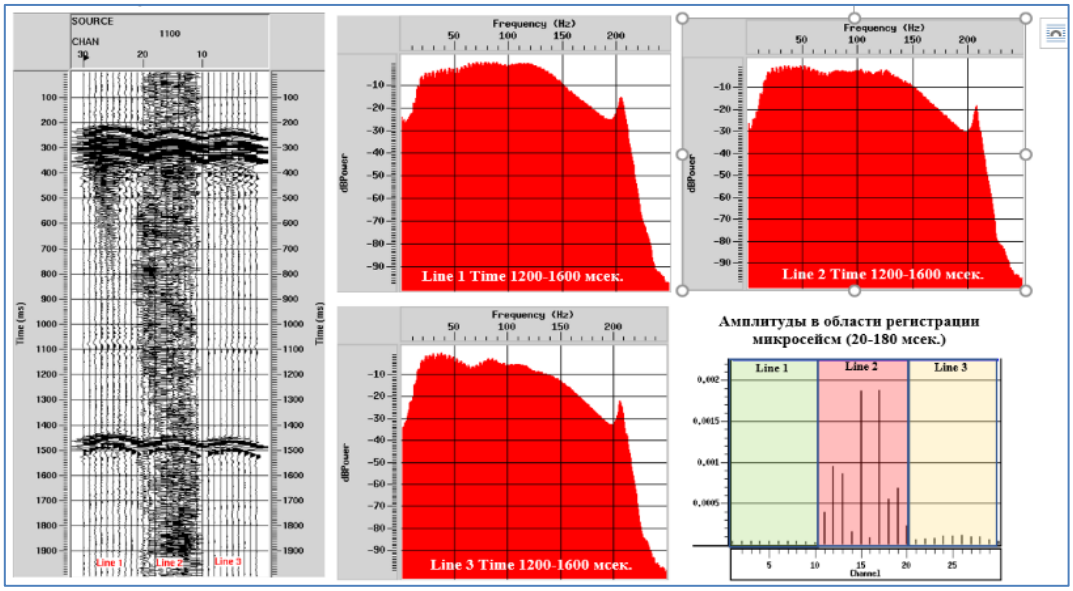


Рисунок 4- **Волновая картина по результатам теста**

Рисунок 5 – **Обобщённые амплитудно-частотные характеристики волновой картины и амплитудная характеристика в области регистрации микросейсм**

В качестве источника возбуждения сигнала использовалась кувалда с ударом по металлической платформе. На рисунке 4 показана зарегистрированная в результате теста волновая картина.

На рис. 5 демонстрируются обобщённые амплитудно-частотные характеристики волновой картины и амплитудная характеристика в области регистрации микросейсм (20-180 мсек).

Учитывая интенсивность микросейсмического шума, регистрируемого датчиками наиболее оптимальным и технологичным признан вариант с установкой в снег до соприкосновения с землёй.

Источник возбуждения. В качестве источников возбуждения упругих колебаний применялась группа низкочастотных вибраторов, оснащённых электронной системой синхронизации и управления VE-432, а также позиционирующими модулями Trimble R7 для точного определения координат пунктов возбуждения.

Свип-сигнал характеризовался следующими параметрами: длительность — 14 с, диапазон частот — от 1,5 до 96 Гц, конусность — 0,5 с, усилие на грунт — 65%.

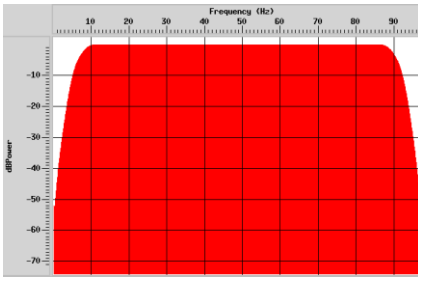


Рисунок 6- **Амплитудно-частотная характеристика опорного сигнала вибрационного источника**

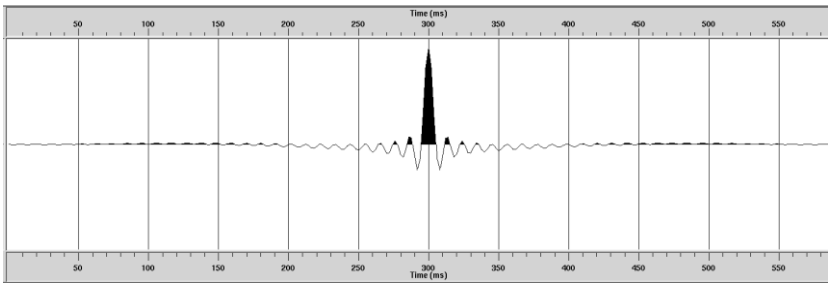


Рисунок 7- **Автокорреляционная функция опорного сигнала вибрационного источника**

На каждом пункте одновременно работало 2–4 вибратора, с количеством накоплений 1–2. Анализ амплитудно-частотных характеристик и графиков излучаемого сигнала (рис. 6, 7) показал, что уровень нелинейных искажений находится в допустимых пределах.

Аппаратура и оборудование. Регистрационный комплекс NIMBLE SYSTEM включает три основные компонента:

1. Пьезоэлектрический сейсмоприемник, обеспечивающий непрерывную регистрацию сейсмического сигнала с момента инициализации (установки) до деинициализации (смотки). Конструкция предусматривает автономную работу каждого нода (рис. 8).
2. Модули NEST — мобильные устройства для зарядки датчиков и считывания с них данных (рис. 8).
3. Сервер с установленным специализированным программным обеспечением необходимым для управления модулями NEST, реконструкции сейсмических данных и контроля качества записей, полевой обработки данных без необходимости передачи данных в обрабатывающий центр.



Модуль зарядки и считывания данных с датчиков (NEST)



Инициализатор с зарядным устройством

Рисунок 8 - **Элементы регистрационного комплекса NIMBLE SYSTEM**

Таблица 1 - **Технические характеристики нода (сейсмоприемника)**

Характеристика	Значение
Тип сенсора	Пьезоэлектрический акселерометр
Шаг дискретизации	1, 2 мсек.
Полярность	SEG
Аналого-цифровой преобразователь	24-bit Sigma-Delta
Полоса частот	1-125 Hz.
Коэффициент предварительного усиления	0dB 16dB
Максимальный входной сигнал	0.6g 0.1g
Плотность шума	22ng/sqrt(Hz) @ 16dB
Время записи	28 дней (24 часа запись)
Срок хранения	> 18 месяцев при комнатной температуре
Поддерживаемые GNSS системы	GPS, GLONASS
Вес	150g
Рабочий режим температур	- 40°C to +70°C
Время зарядки	<4 часов

Устройство инициализации представляет собой специализированный компонент (Таблица 1), обеспечивающий беспроводное взаимодействие между нодом и программным обеспечением через канал Bluetooth. В процессе инициализации, осуществляемой при установке нода в устройство, в его память передаются конфигурационные параметры, включая характеристики режима регистрации, пространственное положение в пределах профиля, а также настройки, обеспечивающие синхронизацию с глобальной навигационной спутниковой системой (GNSS). Кроме того, осуществляется фиксация момента инициализации.

В процессе деинициализации, проводимой при завершении регистрации и извлечении оборудования, устройство инициирует остановку записи и осуществляет сохранение временной метки, полученной от GNSS, в память нода, что обеспечивает точную привязку завершения съёмки ко времени.

В качестве контроллеры и управления навигационной программой использовался портативный планшетный компьютер NAUTIZ X6.

Использование такого оборудования позволяет сейсмической бригаде осуществлять установку оборудования без предварительной разбивки пунктов приёма топогеодезической службой сейсморазведочной партии.

Управление системой осуществлялось посредством серверной станции, выполнявшей функции центрального элемента взаимодействия между оператором и регистрирующим оборудованием. Серверная станция обеспечивала визуализацию процессов через графический интерфейс, координировала работу подключённых устройств серии NEST, а также осуществляла приём, хранение и первичную обработку данных, поступающих от сейсмических нодов.

Регистрирующий комплекс NIMBLE представляет собой ультрапортативную многоканальную систему, характеризующуюся высокой степенью автоматизации и масштабируемостью. Архитектура комплекса допускает конфигурацию до 30 000 каналов в рамках одного проекта. Все операции по зарядке устройств и выгрузке данных могут выполняться одним оператором, что значительно повышает операционную эффективность. Конструктивные особенности системы предусматривают возможность ежедневной ротации до 3240 нодов, что обеспечивает непрерывность наблюдений и гибкость в организации сейсмических работ.

Кроме того, применение комплекса NIMBLE исключает необходимость предварительного топогеодезического разметочного этапа для размещения приёмных пунктов, что сокращает подготовительное время и снижает нагрузку на полевые подразделения сейсморазведочной партии.

Результаты опытно-методических работ

Топографо-геодезические работы. Проводились обособленным геодезическим комплексом (приёмники Trimble R7 в комплекте с радио и спутниковой антенной и планшетных компьютеров Nautiz X6) параллельно с основной съёмкой.

В рамках оптимизации геодезической съёмки координаты, полученные в процессе работ, автоматически сохранялись как в памяти сейсмического датчика, так и в планшетном компьютере Nautiz X6. Это позволило значительно сократить численность топографо-геодезического персонала и снизить трудоёмкость работ.

Обработка полученных данных осуществлялась в сейсмической станции Nimble с использование программы SurveyQCv2 входящей в состав программного обеспечения регистрирующей системы. Система координат, используемая в программном обеспечении, EPSG:32640 - WGS 84 / UTM zone 40N.

Установлена зависимость определения высот от типа решения геодезической задачи. В центральной части профиля выявлено отклонение значений, зарегистрированных в режиме RTK (Рис. 9). Такое отклонение по всей видимости связано с изменением положения базовой станции и отсутствием корректировок её характеристик при перемещении на другую позицию.

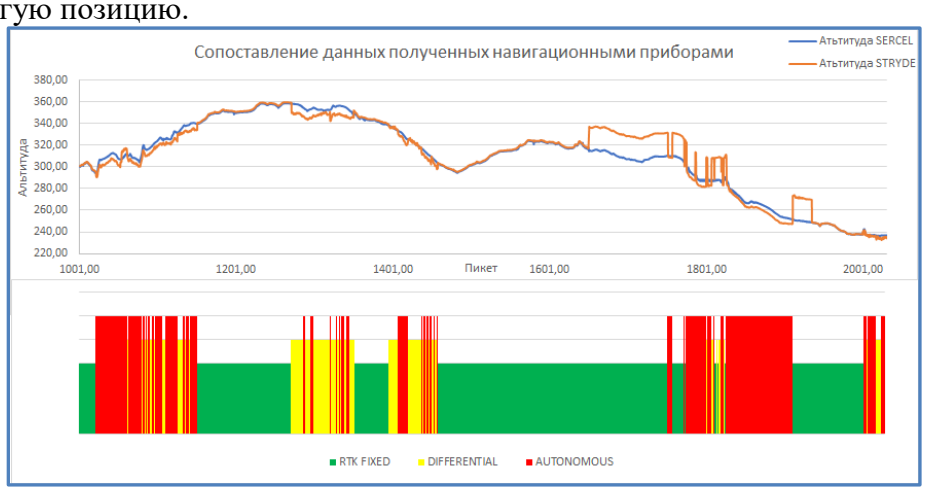


Рисунок 9 - **Сопоставление альтитуд зарегистрированных при проведении разбивочных работ производственной съёмки и ОМР**

В ходе полевых работ координаты сейсмических датчиков (нодов) определялись в автономном и дифференциальном режимах с постоянным контролем фактического положения. Для проверки корректности размещения оборудования был осуществлён повторный выезд на местность. Итоговые координаты были внесены в каталог и SPS-файлы для последующей передачи в вычислительный центр

Анализ полученных GPS-данных показал целесообразность применения технологий получения дифференциальных поправок от низкоорбитальных спутников (режим RTX) с целью повышения точности позиционирования и исключения зависимости от триангуляционных пунктов. Вместе с тем, следует отметить, что встроенные в датчики модули навигации обеспечивают лишь периодическую регистрацию координат, пригодную для подтверждения положения, определённого внешним навигационным оборудованием, поскольку без дифференциальной коррекции точное определение позиции недоступно.

Сейсмическая съемка по опытному профилю с применением бескабельной системы регистрации сейсмических волн была Проведена с использованием беспроводной технологии STRYDE в рамках комплексной программы, реализуемой на основной площади с применением кабельной системы Sercel 428XL. В целях повышения плотности наблюдений в стандартную приёмную схему с интервалом 25 м была интегрирована дополнительная нодальная подсистема с шагом 5 м. Это позволило существенно увеличить плотность сети регистрации и обеспечить функционирование более 5000 активных каналов (таблица 2).

Регистрирующие ноды устанавливались с незначительным смещением от основной оси сейсмического профиля — на расстоянии 2,5 м от створа, занятого групповыми приёмниками кабельной системы. Монтаж оборудования осуществлялся двумя полевыми бригадами, в составе каждой из которых было по 4–5 специалистов. Такая организация труда обеспечивала высокую производительность при развёртывании и демонтаже приёмной системы (таблица 2).

Таблица 2 - **Методика проведения полевых ОМР**

Параметр	Проектное значение	Фактическое значение
МЕТОДИКА И ОБЪЁМ РАБОТ		
Вид съёмки	МОГТ-2Д	МОГТ-2Д
Количество физических наблюдений	1031	965
Количество пунктов приёма	5151	5119
Объём работ (пог.км.)	30	25.75
Шаг ОГТ, м	2.5	2.5
Кратность прослеживания	280	280
ВОЗБУЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ		
Способ возбуждения колебаний	Вибрационный	Вибрационный
Вибрационный источник	Низкочастотный вибратор	Низкочастотный вибратор
Тип свип-сигнала	ЛЧМ	ЛЧМ
Начальная частота (Гц.)	1.5	1.5
Конечная частота (Гц.)	96	96
Длительность свип-сигнала (сек.)	14	14
Конусность (мсек.)	300	500
Количество накоплений	2	1-2
Количество источников в группе	4	2-4
База группы (м.)	36	36

Усилие на грунт (%)	65	65
ПРИЁМ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ		
Система наблюдений	Центральная, симметрич-ная, ПВ между каналами	Центральная, симмет-ричная, ПВ между кана-лами
Число активных каналов	2796	2796/5151
Число датчиков на канал	1	1
Соединение сейсмоприёмников в группе	НЕТ	НЕТ
Тип датчика	Пьезоэлектрический, од-нокомпонентный	Пьезоэлектрический, однокомпонентный
База группирования сейсмоприём-ников	НЕТ	НЕТ
Шаг ПП, м	5	5
Номера ближайших к ПВ каналов	1398 и 1399	-
Минимальное удаление ПВ-ПП м	2.5	2.5
Максимальное удаление ПВ-ПП, м	6 987.5	6 987.5/25 750
РЕГИСТРАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ		
Длина записи, с	8	8
Шаг дискретизации, с	0.002	0.002
ФВЧ	Выкл	Выкл
ФНЧ	0.8 Nyquist Lin	0.8 Nyquist Lin
Предварительное усиление	0 dB	0 dB

После проведения инструктажа и обучения персонала, бригады приступили к установке сенсоров на производственном профиле, при этом особое внимание уделялось логистике снабжения регистрирующими модулями в контрольных точках профиля — местах, где

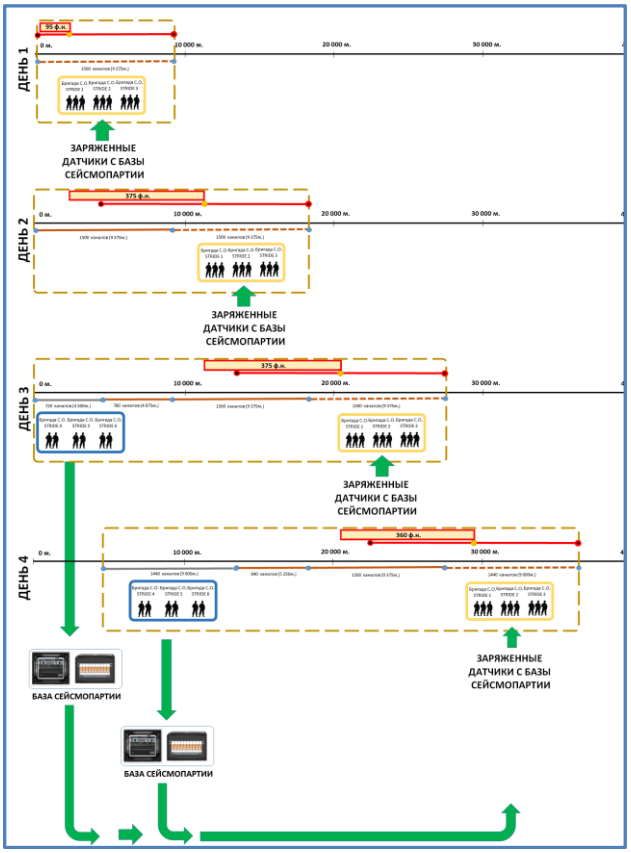


Рисунок 10 - **Принципиальная схема цикла «установка-подбор-зарядка/считывание-установка»**

заканчивалась предыдущая партия оборудования и требовалось её пополнение для продолжения работ. Оптимизация этих процессов позволила рассматривать возможность дальнейшего сокращения численности полевого персонала без ущерба для темпов установки.

Проведённый анализ трудозатрат, временных параметров и статистических характеристик, полученных в ходе ОМР, подтвердил высокую операционную эффективность технологии STRYDE. Установлено значительное сокращение времени, необходимого на монтаж одного нода в условиях стандартной восьмичасовой рабочей смены, по сравнению с аналогичными процедурами при использовании традиционных кабельных систем регистрации, что подтверждает практическую целесообразность внедрения беспроводных решений в геофизическую практику.

Принципиальная схема формирования цикла «установка-подбор-зарядка/считывание-установка» продемонстрирована на рис 10. Такая схема может меняться в зависимости от объёмов работ (методики работ), количества привлекаемого оборудования и особенностей выполняемого проекта климатических, орогидрографических и т.д.).

Регистрация данных. Процесс регистрации сейсмических данных осуществлялся в сложных метереологических условиях, связанных с неблагоприятными климатическими условиями. Тем не менее, запланированный объём сейсмических наблюдений был выполнен в полном объёме, за исключением отдельных участков, примыкающих к объектам инфраструктуры, где установка нодов оказалась невозможной по объективным причинам. Развёртывание приёмной системы в целом осуществлено с высокой степенью соответствия проектной схеме, за исключением ряда пунктов, расположенных вблизи транспортных коридоров и технологических проездов, где установка оборудования была затруднена из-за ограничений по доступу и требованиям безопасности

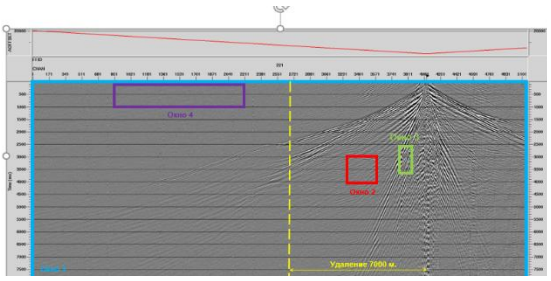


Рисунок 11 - **Пример типовой сейсмограммы**

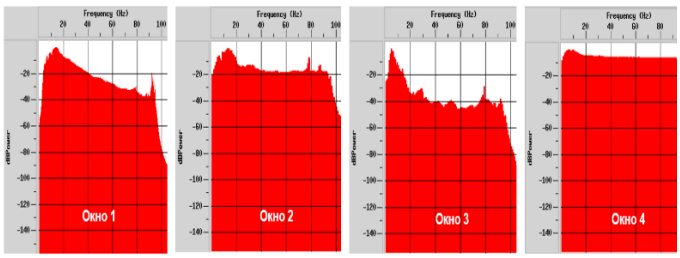


Рисунок 12 - **Амплитудно-частотные характеристики**

Пример типовой сейсмограммы, полученной в ходе ОМР, иллюстрирует удовлетворительное качество регистрации волн и может служить репрезентативной оценкой параметров среды (рис.11). Нормированные амплитудно-частотные характеристики, рассчитанные в заданных временных окнах, позволяют проанализировать спектральное содержание сигнала и убедиться в корректной работе нода (рис.12).

Обработка зарегистрированных данных. Обработка полученных результатов выполнялась по специальному графу-обработки, отражающим последовательность технологических этапов, направленных на получение качественного волнового поля и построение достоверного временного разреза.

На начальной стадии (этапы Data Reformatting, Geometry QC – Base Reference Image и Brute Velocity Picking) выполнены процедуры ввода исходных данных в программно-обрабатывающий комплекс, произведено суммирование по пунктам возбуждения (ПВ) на основе двух накоплений, а также осуществлена подготовка подборок по общим пунктам возбуждения (ОПВ) для последующего присвоения геометрии. На данной стадии была сформирована

база данных проекта и реализовано присвоение геометрии с обязательным контролем качества её присвоения.

После завершения геометризации, на этапе First Break Picking была получена первичная сумма и сформирован предварительный временной разрез, сопровождаемый расчетом начального скоростного закона (рис. 13 - 15).

На последующих этапах — Migration Velocity Picking и Final Kirchhoff Pre-Stack Time Migration (PSTM) — осуществлялось уточнение миграционных скоростей и построение предварительного временного образа геологической среды, что способствовало повышению точности интерпретации волнового поля.

Далее была проведена расчетная коррекция статических поправок методом преломленной томографии (Refraction Tomostatics), направленная на учет скоростной неоднородности ЗМС (рис.17).

Затем последовала серия процедур подавления волновых помех: устранение низкочастотных среднескоростных возмущений с использованием F-K фильтрации, подавление поверхностных волн (Ground-Roll Attenuation), линейных помех (Linear Noise Attenuation) и случайных шумов (Random Noise Attenuation), а также подавление аномальных амплитуд на сейсмических трассах.

В результате был получен временной разрез после подавления шумов (этап Post-migration denoise), демонстрируемый на рис. 18.

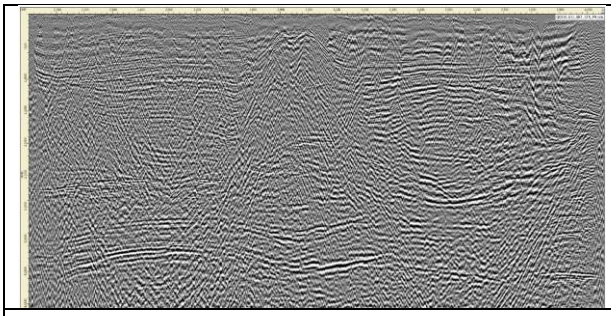


Рисунок 13 - **Предварительный временной разрез с априорным скоростным законом.**

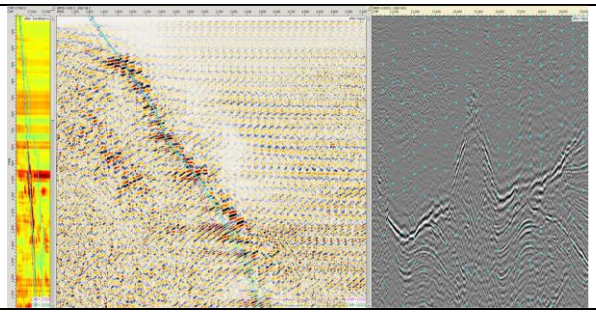


Рисунок 14 - **Анализ скоростей суммирования.**

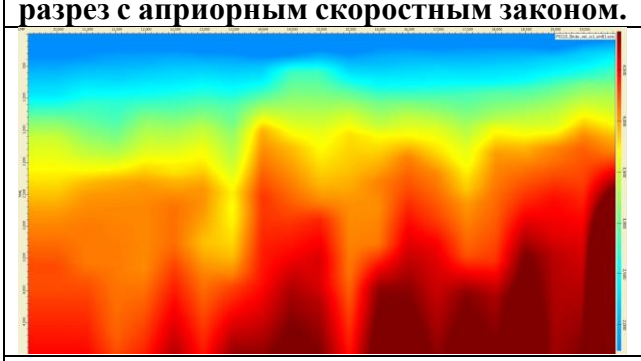


Рисунок 15 - **Тренд скоростных законов**

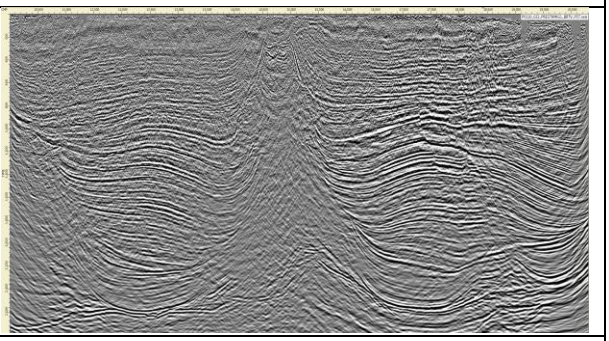
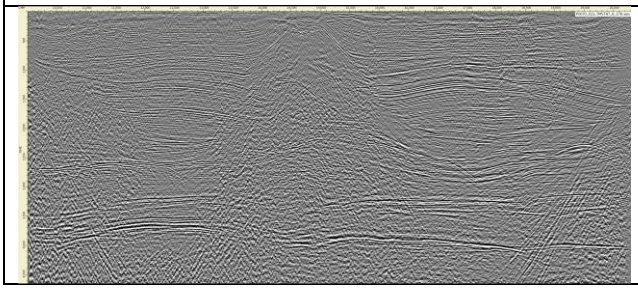


Рисунок 16 - **Предварительный временной разрез с предварительным скоростным законом. (PSTM)**



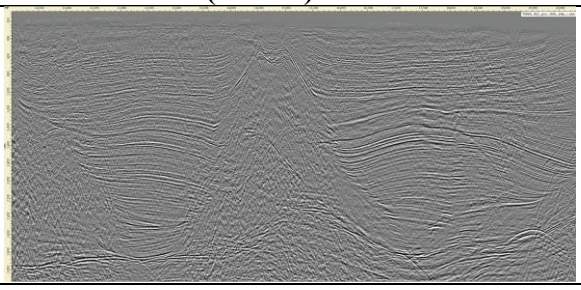


Рисунок 17 - **Суммирование с использованием статических поправок рассчитанным методом томографии.**	*Рисунок 18* - **Временной разрез после подавления шумов.**

После корректировки скоростного законы была получена сумма с применением процедуры миграции и построен временной разрез после корректировки скоростного закона (этапы: Initial velocity picking; Surface consistent residual statics) (рис.19).

По полученным данным была проведена дополнительная обработка по суммарным данным, которая включила в себя такие процедуры как деконволюция по временному разрезу, Q-компенсация, FX-деконволюция, фильтрация (этапы Migration velocity picking, Final Kirchhoff Pre-STM).

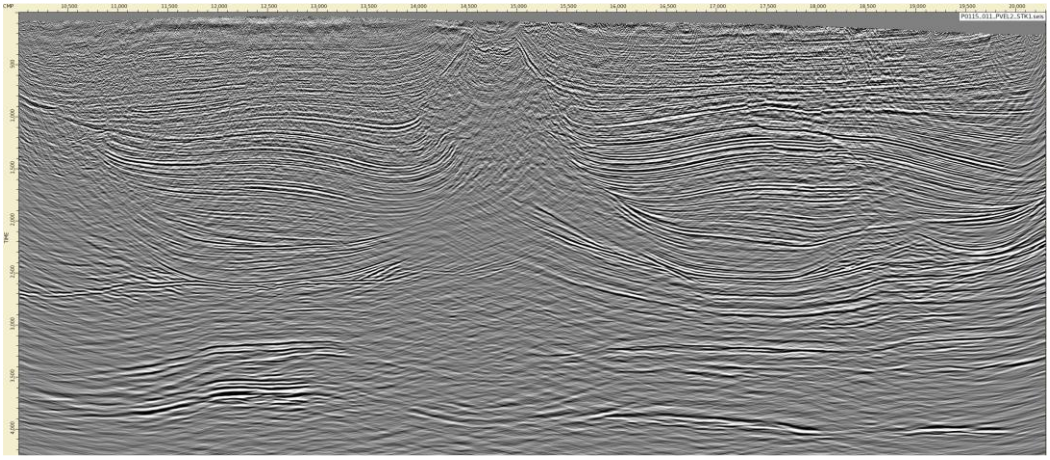


Рисунок 19 - **Результирующий временной разрез по профилю ОМР после внесения поправок в скоростную модель**

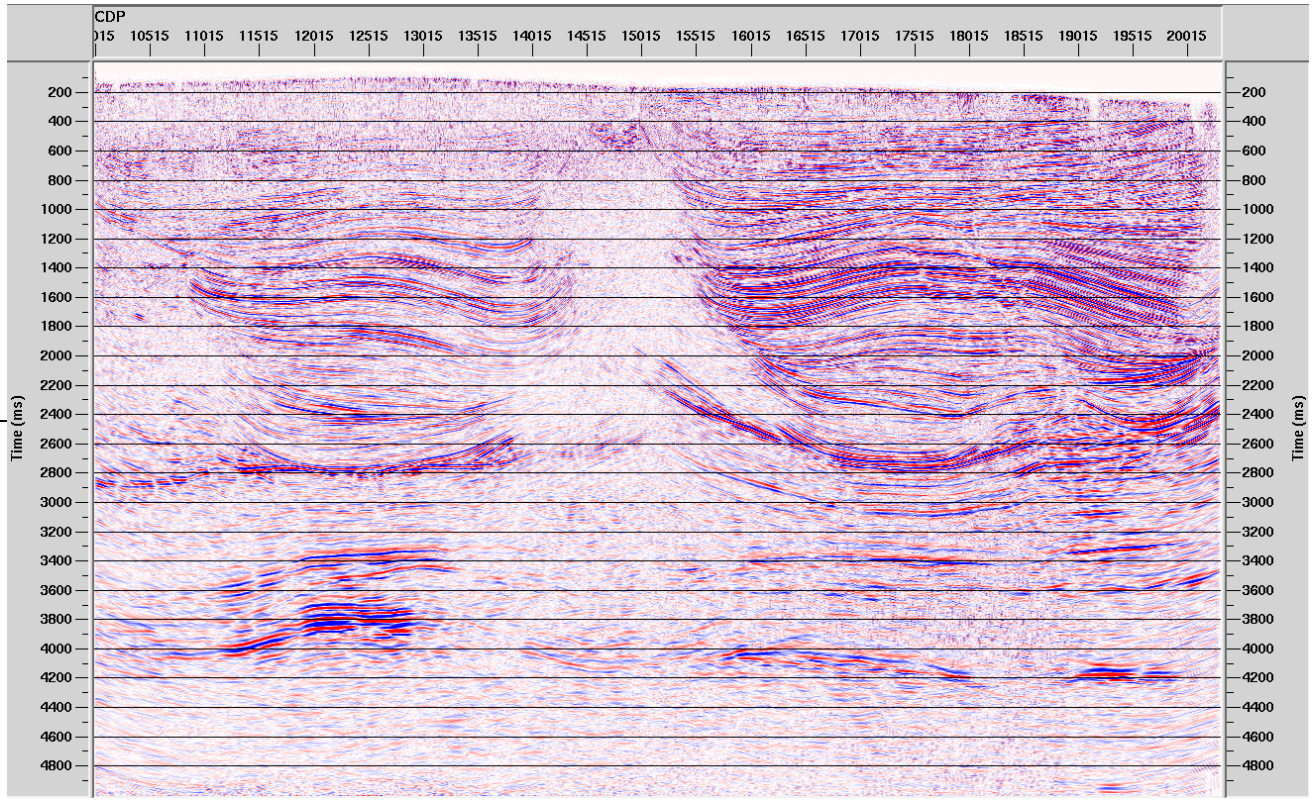


Рисунок 20 - **Окончательный временной разрез (0-5000мс) по профилю ОМР**

применения этих процедур был получен окончательный временной разрез (этап Post-stack processing), представленный на рис. 20. Все этапы обработки были организованы в рамках поэтапного улучшения сигнально-шумового соотношения, уточнение волновых параметров и повышение геологической информативности итогового сейсмического изображения.

Оценка геологической информативности. Финальный временной разрез по профилю ОМР характеризуется высокой геологической информативностью, что свидетельствует о корректности выбранной методике обработки и интерпретации сейсмической информации. Полученные результаты обладают фундаментальной значимостью и вносят весомый вклад в уточнение геологического строения площади ОМР, подчёркивая как научную, так и прикладную ценность полученных данных.

Высокий уровень корреляции сейсмических отражений как в надсолевом, так и в подсолевом интервалах разреза обеспечивает возможность проведения детальной сейсмофациальной интерпретации, тем самым способствуя более глубокому пониманию структуры подсолевых отложений.

Анализ сейсмической волновой картины выявляет наличие ярко выраженных отражающих горизонтов в интервале времён 2600–4800 мс, что ориентировочно соответствует глубинам от 4700 до 8600 м, где располагаются геологические границы. Особую научную и практическую ценность представляет прослеживание пакета регулярных отражений, зарегистрированных в интервале времён 4000–4200 мс, что коррелируется с глубинами от 6800 до 7500 м.

В рамках системного подхода к интерпретации сейсмических данных идентифицированы сейсмофации, интерпретируемых как предрифовая лагунная среда, континентальный склон и, вероятно, абиссальная зона, сформировавшаяся в основании склоновых участков. Такая сейсмостратиграфическая конфигурация отражает характерную внутреннюю архитектонику карбонатных платформ и рифогенных тел. Полученные данные позволяют рассматривать данную модель как важный индикатор формирования геологической обстановки, благоприятной для аккумуляции и последующей консервации углеводородов, особенно в пределах подсолевого стратиграфического комплекса.

Сформированные на основе анализа данных новые сведения обладают как принципиальной научной новизной, так и высокой прикладной значимостью. Установленные особенности глубинного строения средне- и верхнепалеозойских отложений северо-восточного борта Прикаспийской впадины открывают дополнительные перспективы для уточнения региональных геолого-геофизических моделей и прогноза нефтегазоносности. Учитывая значимость полученной информации, она подлежит дальнейшему всестороннему изучению и широкому внедрению в практику геологоразведочных работ на смежных участках и аналогичных структурных зонах.

Установленные признаки обладают значительной научной и практической значимостью для построения литологических, стратиграфических и седиментационных моделей подсолевого структурного этажа, а также для прогноза зон потенциальной аккумуляции углеводородов на основе анализа фациальной дифференциации и тектонического строения среды осадконакопления.

Полученные в результате комплексного анализа новые данные отличаются как высокой степенью научной новизны, так и значительным прикладным потенциалом. Выявленные особенности глубинного строения средне- и верхнепалеозойских отложений северо-восточного борта Прикаспийской впадины существенно расширяют возможности по уточнению региональных геолого-геофизических моделей и повышают достоверность прогноза нефтегазоносности.

Учитывая важность полученной информации, она требует дальнейшего комплексного изучения и целесообразна к широкому практическому внедрению в геологоразведочные работы на смежных территориях, а также в пределах аналогичных структурно-фациальных комплексов.

Полученные результаты формируют основу для более детальной и обоснованной интерпретации глубоко залегающих геологических объектов, а также для надежного выделения перспективных зон потенциального углеводородного накопления в пределах подсолевых литолого-стратиграфических комплексов.

Таким образом, совокупность проведённых исследований и достигнутых результатов свидетельствует об успешной реализации основной цели ОМР - изучении глубоко залегающих подсолевых образований с учётом их структурных, литофациальных и тектонических характеристик.

Анализ данных, полученных по профилю ОМР позволяет утверждать, что в надсолевом интервале временного разреза также достигнут более высокий уровень геологической информативности по сравнению с результатами, традиционной кабельной системой регистрации, применявшимися в бортовых зонах Прикаспийской впадины.

Применение беспроводной технологии сбора сейсмических данных, обеспечившей высокое разрешение и достоверную реконструкцию волнового поля, что позволило:

- надежно дифференцировать ряд структурно-формационных комплексов осадочных пород (sequences), обладающих различной динамикой отраженных волн, что свидетельствует о значительном фациально-литологическом и геофизическом разнообразии;
- отчетливо визуализировать элементы разломной тектоники, которые в предыдущих исследованиях нивелировались вследствие ограничений, связанных с регуляризацией и аппроксимацией сейсмического сигнала при использовании традиционных кабельных систем;
- детально прослеживать морфологические особенности отражающих горизонтов, включая чередование положительных и отрицательных форм амплитудных аномалий в вертикальном сечении межкупольного пространства;
- интерпретировать широкий спектр сейсмических феноменов, таких как следы эрозионных срезов, кровельного и подошвенного прилегания, конформного залегания, зоны развития клиноформ, что существенно расширяет возможности стратиграфического и структурного анализа.

Таким образом, результаты ОМР демонстрируют высокую эффективность применения бескабельных систем регистрации при изученнии надсолевых отложений, подтверждая целесообразность их дальнейшего внедрения в сейсморазведочные проекты в Казахстане.

Обсуждение результатов

Опытно-методические работы, проведённые в зимний период в условиях резко континентального климата Актюбинской области, позволили всесторонне оценить эффективность беспроводной технологии регистрации сейсмических колебаний на базе системы STRYDE. Испытания проходили в сложных природных условиях, включая неровный рельеф и снежный покров. Основное внимание уделялось оценке эффективности оборудования для выполнения высокоплотной бескабельной сейсморазведки МОГТ-2D, направленной на изучение глубоко залегающих подсолевых структур.

Экспериментальные данные подтвердили устойчивость функционирования и адаптивность к экстремальным климатическим условиям технологии STRYDE, а также её практичность при эксплуатации в труднодоступной и слаборазвитой инфраструктуре, что свидетельствует о её применимости в широком диапазоне геологических и климатических условий Казахстана.

Анализ интенсивности полезного сигнала, уровня микросейсмических шумов и их соотношения, а также определение доминантной частоты в заданном временном интервале продемонстрировали высокое отношение сигнал/шум. Это свидетельствует о качестве и хорошей интерпретируемости сейсмических данных, что, в свою очередь, обусловливает достоверность геологических интерпретаций и надёжность геологических выводов.

Результаты ОМР подтвердили высокую геологическую информативность и технологическую эффективность беспроводной системы STRYDE при проведении высокоплотной сейсморазведки МОГТ-2D, особенно в условиях глубоко залегающих и структурно сложных

геологических объектов, что свидетельствует о технологической зрелости и универсальности применённого подхода.

Особую значимость представляет высокая результативность технологии STRYDE при исследовании глубоко залегающих и структурно сложных геологических объектов в надсолевых и подсолевых отложениях. Отражающие горизонты уверенно прослеживаются до глубин порядка свыше 8500 м, где в интервале 6700-7500м выявлены признаки верхнепалеозойских карбонатных рифов. Эти результаты подтверждают успешное выполнение задач опытно-методических работ и демонстрируют высокий потенциал технологии для глубоких геологоразведочных исследований.

Определены ключевые эксплуатационные преимущества системы STRYDE, включая мобильность, простоту установки и демонтажа, а также низкие эксплуатационные издержки — факторы, критически важные в условиях низких температур и удалённости исследуемых участков.

Таким образом, технология STRYDE демонстрирует высокую гибкость, оперативность и экономическую эффективность, особенно в условиях, где применение традиционных кабельных систем сопряжено с техническими трудностями, экологическими требованиями или нецелесообразно с точки зрения затрат. Проведённые ОМР не только подтвердили технологическую зрелость и надёжность беспроводной системы регистрации, но и наглядно выявили её значительный потенциал для модернизации и повышения эффективности современной геологоразведочной практики в Казахстане.

Сравнительный анализ с традиционной сейсморазведкой МОГТ-2D. В рамках ОМР проведена сравнительная оценка эффективности технологии STRYDE по отношению к традиционным кабельным решениям на идентичном сейсмическом профиле и в одно и то же время, что обеспечило корректность и объективность анализа (табл.3).

Анализ полученных данных выявил устойчивое превосходство беспроводной технологии по ряду ключевых параметров, охватывающих как технические, так и организационно-экономические аспекты.

Системный подход к анализу выявленных различий позволил структурировать выявленные преимущества беспроводной системы STRYDE по функциональным уровням её применения:

1. Операционная эффективность. Компактные и лёгкие беспроводные сейсмоприёмники обеспечивают быструю и удобную установку, включая труднодоступные или пересечённые участки. Отказ от телеметрических кабелей упрощает логистику, снижает риск технических сбоев, связанных с повреждениями кабельной инфраструктуры, и повышает общую устойчивость системы к неблагоприятным природно-климатическим факторам.

Таблица 3 - **Статистические характеристики по установке регистрирующего оборудования STRYDE**

SERCEL			
РАЗМОТКА ОБОРУДОВАНИЯ			
Дата	Количество групп	Количество геофонов	Сек. на установку одной группы при 8 часовой рабочей смене
09.02.2024	395	4740	73
10.02.2024	316	3792	91
12.02.2024	80	960	360
14.02.2024	240	2880	120
ПОДМОТКА ОБОРУДОВАНИЯ			
Сбор групп сейсмоприёмников не проводился			

STRYDE		
РАЗМОТКА ОБОРУДОВАНИЯ		
Дата	Количество нодов	Сек. на установку одного нода при 8 часовой рабочей смене
06.02.2024	474	61
07.02.2024	1411	20
08.02.2024	1891	15
09.02.2024	1343	21
ПОДМОТКА ОБОРУДОВАНИЯ		
18.02.2024	1873	15
19.02.2024	2220	13
20.02.2024	997	29

2. Экономическая целесообразность. По сравнению с классическими кабельными системами, стоимость одного регистрационного пункта в беспроводной конфигурации значительно ниже за счёт исключения дорогостоящих аналогово-цифровых преобразователей и

многокомпонентных групп сейсмоприемников. Сокращение объёмов монтажно-демонтажных работ существенно уменьшает продолжительность полевого этапа, снижая общую стоимость сейсморазведки (табл.3). Компактность оборудования оптимизирует логистику и сокращает расходы на транспорт, хранение и обслуживание, а также позволяет сократить численность полевого персонала и связанные с этим издержки.

3. Организационная гибкость. Результаты полевых испытаний убедительно продемонстрировали, что внедрение беспроводной технологии STRYDE позволяет существенно сократить трудозатраты при проведении сейсмических работ. Обслуживание 25-километрового профиля требует бригады численностью до 20 человек, тогда как для кабельных систем необходимо свыше 100 специалистов.

Такое сокращение штатных ресурсов снижает издержки, упрощает организацию работ в труднодоступных районах с ограниченной инфраструктурой и устраняет сложности, связанные с мобилизацией крупномасштабных рабочих сил. Кроме того, беспроводные системы обеспечивают высокую гибкость в проектировании геометрии наблюдений и позволяют оперативно реагировать на изменения в полевых условиях, минимизируя простои и непроизводственные затраты.

4. *Пространственная универсальность и адаптивность.* Пространственная адаптивность беспроводной технологии обусловлена отсутствием необходимости в прокладке кабелей, что позволяет размещать сейсмоприёмники в труднодоступных зонах — на пересечённом рельефе, через водные и инфраструктурные преграды, в переходных зонах и других ограниченных участках. Это обеспечивает более равномерное покрытие территории и способствует увеличению плотности наблюдений, что особенно важно для высокоразрешающей сейсмической съёмки.

5. *Технологическая надёжность.* Технология STRYDE продемонстрировала высокую надёжность при эксплуатации в условиях резких температурных колебаний, сильных осадков и обледенения, характерных для зимнего сезона в Актюбинской области. При температуре до –30 °C и резком изменении погодных условий оборудование обеспечивало стабильную регистрацию сейсмосигналов. Устойчивость к воздействию снега, влаги и обледенения выгодно отличает STRYDE от кабельных систем, подверженных обмерзанию и снижению функциональности, что подчёркивает её технологическую надёжность и перспективность для применения в северных регионах Казахстана.

6. *Снижение экологических и административных издержек.* Отказ от кабельной инфраструктуры при использовании технологии STRYDE минимизирует антропогенное воздействие на окружающую среду, снижая нарушение почвенно-растительного покрова. Это особенно важно при работах в природоохранных зонах, прибрежных экосистемах и на сельскохозяйственных угодьях. Экологическая нейтральность технологии способствует сохранению биоразнообразия, упрощает согласование с контролирующими органами и ускоряет запуск проектов за счёт снижения административных барьеров.

Заключение по сравнительной оценке эффективности технологии STRYDE и традиционных кабельных систем. Сравнительный анализ подтверждает преимущества беспроводной сейсмической технологии STRYDE по сравнению с традиционными кабельными системами. Её отличают высокая технологическая надёжность, экономическая эффективность, организационная гибкость и экологическая безопасность, что делает её оптимальным инструментом для высокоплотных МОГТ-2D исследований в районах со сложной геологией и ограниченной доступностью.

Результаты ОМР показали, что беспроводная система STRYDE является современным, технологически зрелым и экономически эффективным решением для сейсмической разведки, особенно в условиях сурового климата и ограниченной доступности. Проведённые испытания подтвердили высокую чувствительность и надёжность её компонентов, устойчивость к внешним воздействиям и способность обеспечивать стабильное качество регистрации в среде, где применение традиционных кабельных систем затруднено.

Таким образом, технология STRYDE представляет собой эффективную и перспективную альтернативу традиционным кабельным системам, обеспечивая повышение технологической эффективности и расширение географического охвата сейсмических исследований. Полученные результаты подтверждают целесообразность её широкого внедрения в национальную геофизическую практику, особенно при изучении труднодоступных и слаборазведанных территорий, и подчёркивают её стратегическую значимость для развития отрасли.

Заключение

Системные аспекты внедрения технологии STRYDE, изученные в ходе ОМР в зимний период на площади ОМР позволили всесторонне оценить её технологические, эксплуатационные и геолого-информационные характеристики. Проведённый анализ подтвердил высокую эффективность беспроводных систем наблюдений, продемонстрировав их конкурентные преимущества перед традиционными кабельными системами и обоснованность применения как инновационной платформы сейсморазведки нового поколения.

Комплексная оценка технологии STRYDE охватила широкий спектр факторов, включая природно-климатические условия, геолого-геофизическую специфику (изученность) подсолевых отложений среднего и верхнего палеозоя, а также организационно-производственные аспекты (ограниченность инфраструктуры, сезонная доступность территорий). Такой междисциплинарный подход позволил всесторонне анализировать применимость технологии и выявлять её ключевые эксплуатационные, технические и экономические преимущества.

Геолого-геофизическая эффективность технологии STRYDE проявляется в получении сейсмических изображений с высокой степенью детальности. Отказ от традиционной кабельной инфраструктуры обеспечил стабильную работу системы в условиях пересечённого рельефа и экстремального климата, что было подтверждено результатами ОМР.

Впервые в районе ОМР реализована методика высокоплотного профилирования с шагом 5 м, позволившая значительно повысить разрешающую способность временного разреза, особенно в зонах сложного строения, ассоциированных с подсолевыми структурами среднего и верхнего палеозоя. Полученные данные демонстрируют высокий научный и прикладной потенциал беспроводной системы STRYDE для решения задач МОГТ-2D и подтверждают её значимость в контексте развития сейсморазведки нового поколения.

Преимущества в экстремальных природно-климатических условиях. Технология STRYDE продемонстрировала высокую адаптивность и устойчивость к внешним температурным воздействиям, устойчивость к микросейсмическим шумам и внешним помехам, а также минимальные требования к логистике и обслуживанию. Предполевые тесты позволили оптимизировать параметры установки нодов на заснеженной поверхности, что обеспечило высокое качество регистрации сейсмических сигналов.

Организация и управление полевым циклом. Ключевым элементом управления полевым циклом стал комплекс NIMBLE SYSTEM, интегрированный с навигационной системой Trimble R7. Это сочетание обеспечило высокоточную привязку, контроль качества данных и эффективное управление всеми этапами сейсморазведки — от установки датчиков до первичной обработки.

Качество обработки и интерпретации. Обработка сейсмических данных на специализированном мобильном комплексе STRYDE включала геометрическую привязку, подавление шумов, расчёт статических поправок, временную миграцию и постобработку в соответствии с современными стандартами. В результате получен высокоразрешающий временной разрез с чётким отображением отражающих границ, тектонических нарушений, эрозионных срезов и клиноформ, что создало надёжную основу для геологической (сейсмостратиграфической) интерпретации волнового поля и уточнения модели строения площади ОМР.

Сравнительный анализ беспроводных и кабельных систем. Технология STRYDE демонстрирует ряд преимуществ по сравнению с традиционными кабельными системами. Среди них — высокая плотность и равномерность наблюдательной сети, улучшенное качество сейсмических изображений и надёжная работа в удалённых и слабоосвоенных районах. Компактные автономные приёмники устойчивы к отказам и внешним помехам, что, в

сочетании с минимальными логистическими требованиями, снижает затраты на проведение полевых работ.

Результаты ОМР по опытному профилю подтвердили увеличение разрешающей способности временных разрезов, выражающееся в чёткой дифференциации сейсмофаций, выявлении тектонических нарушений, эрозионных срезов и клиноформ. Повышенное отношение сигнал/шум и высокая плотность приёмников обеспечили значительный прирост геологической информативности.

Применение STRYDE способствует построению более точных концептуальных моделей, критически важных для прогноза нефтегазоносности. Технология одновременно повышает геоинформационную ценность данных и снижает операционные расходы, что делает её научно и экономически целесообразным выбором для сейсморазведки в условиях сложного геологического строения.

Научная значимость и потенциал масштабирования. Результаты ОМР имеют высокую научную и прикладную значимость, позволяя уточнить строение средне- и верхнепалеозойских комплексов северо-восточного борта Прикаспийской впадины и выявить нефтегазоперспективные объекты. Апробация беспроводных систем наблюдений показывают повышение качество сейсмических данных, создавая высокоразрешимое волновое поле, которое способствуют обнаружению новых перспектив и разработке более эффективных подходов к проектированию, интерпретации и моделированию геологоразведочных работ.

На глубинах до 8600 м (2600–4800 мс) выявлены отражающие горизонты, интерпретируемые как карбонатные рифовые структуры и предрифовые лагунные фации — перспективные ловушки углеводородов. Эти данные подтверждают перспективы нефтегазоносности подсолевых комплексов и вносят вклад в уточнение стратиграфии палеозойского чехла.

Полученные результаты открывают возможности для дальнейших фундаментальных и прикладных исследований и могут стать основой для расширенного применения технологии STRYDE в рамках сейсморазведки МОГТ-2D и МОГТ-3D на территории Казахстана, что повысит точность и эффективность геологоразведочных работ.

Таким образом, технология STRYDE зарекомендовала себя как эффективное и инновационное решение сейсморазведки нового поколения, нацеленное на расшифровку площадей и районов со сложным геологическим строением. Технология продемонстрировала высокую надёжность, адаптивность и информативность, обеспечив значительное улучшение качества сейсмических данных при одновременной оптимизации технических и экономических параметров. Её применение целесообразно в типовых геолого-технических заданиях для МОГТ-2D и МОГТ-3D, с перспективой масштабирования на другие регионы Казахстана. Зрелость и масштабируемость технологии позволяют ускорить и удешевить полевые работы, повышая их эффективность и геологическую результативность.

Благодарности:

Авторы статьи считают своим приятным долгом выразить глубокую благодарность коллегам из компаний АО НК КазМунайГаз, ТОО PGS Kazakhstan, ТОО КМГ Барлау, STRYDE и ТОО BGP Казахстан за ценные рекомендации и обсуждения в процессе выполнения ОМР и написания статьи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Абилхасимов Х.Б. Моделирование миграций углеводородов в природных резервуарах северного борта Прикаспийской впадины. «Нефть и газ» 2016, № 2 (92). с. 83-96.
2. Абилхасимов Х.Б. Типизация разрезов палеозойского комплекса восточного борта Прикаспийской впадины. «Нефть и газ» 2021, №1 (121). с. 6 – 24.
3. Абилхасимов Х.Б. Новые перспективы нефтегазоносности южного борта Предуральского прогиба. «Геология нефти и газа» 2021, №1 с. 31- 40.

4. Абилхасимов Х.Б. Тектоническое строение фундамента Прикаспийской впадины. «Геология и охрана недр». Казахстанское геологическое общество «КазГЕО» № 4 2012, с.30-39.

5. Ажгалиев Д.К., «Геологическое строение и новые направления нефтегазопоисковых работ в палеозойских отложениях Прикаспийского бассейна и Западной части Туранской плиты», г. Атырау, 2022 г, 260с.

6. Антипов М.П., Парасына В.С., Быкадоров В.А. и др. Прикаспийская впадина: тектонические события и седиментация на рубеже раннего-среднего карбона, формирование нефтегазоносных резервуаров // Геотектоника. 2019. № 3. С. 61–78.

7. Волчегурский Л.Ф., Владимирова Т.В., Капустин И.Н., Натапов Л.М. Эволюция Прикаспийской впадины в среднем–позднем палеозое // Отечественная геология. 1995. № 3. С. 44–49.

8. Жолтаев Г.Ж. Геодинамическая модель Прикаспийской синеклизы в палеозое // Геол. Казахстана. 1996. № 5. С. 41–53.

9. Исказиев К.О., «Стратегия освоения ресурсов нефти и газа в подсолевых отложениях Севера Прикаспийской синеклизы», Москва, 2021 г, С. 1-51

10. Куандыков Б.М., Волож Ю.А., Антипов М.П. и др. Каспийский регион: проблема поисков углеводородов на больших глубинах, возможные пути ее решения / Б.М. Куандыков, О.С. Турков, К.М. Трохименко М.С. (ред.). Алматы: ОНГК, 2014. (Тр. ОНГК. 2014. Вып. 4. С. 20–33).

11. Обрядчиков О.С. Особенности геологического строения, нефтегазоносности и перспективы поиска новых уникальных месторождений УВ в Прикаспийской впадине // Нефтегазоносные бассейны Казахстана и перспективы их освоения / Б.М. Куандыков, О.С. Турков, К.М. Таскинбаев (ред.). Алматы: КОНГ, 2015. С. 292–298.

12. Турков О.С. Атлас нефтяных и газовых месторождений РК. В 2-х томах – Алматы: ОО «Казахстанское Общество Нефтяников-Геологов (КОНГ), 2020.

13. Buriola, F., Mills, K., Cooper, S., Hollingworth, S., Crosby, A. and Our- abah, A. [2021]. Ultra-high-density land nodal seismic – Processing challenges and rewards. 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition, Extended Abstracts, https://doi.org/10.3997/2214-4609.202112916.

14. Cotton, J.C, Beilles, M., Mahrooqi, S., Porter, J., Denis, M., Baris, S., Forgues, E. and Chauris, H. [2016]. Automated and Real-time Field PSTM - How to QC More Efficiently 10 Billion Traces Today and More Tomorrow. 78th EAGE Annual Conference and Exhibition, Extended Abstracts, https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600983.

15. Dieulangard, D., Popham, M., Grant, C., O'Connell, K., Ourabah, A. Einchcomb, C. [2022]. Land Seismic Recording Systems in a Changing World — a 2021 Review. First Break, 40(1), 59-65, https:// doi.org/10.3997/1365-2397.fb2022004.

16. Chevrot, S., Sylvander, M., Saspiturry, N., Ourabah, A., Benahmed, S., Derode, B., … Ammirati, J.-B. (2024, December). Crustal imaging and characterization of active faults with a large-N nodal deployment - Application to the Chaînons Béarnais region (western Pyrenees foothills, France). Tectonophysics. Elsevier BV. http://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230531

17. Crosby D., Naranjo A., Mahgoub J., Al Mesaabi M., Ablyazina D., Manning E., Popham M., Tough K., Vasile C., Quigley J. and O'Connell K. [2019]. Acquisition of an Ultra High Density 3d Seismic Survey Using New Nimble Nodes, Onshore Abu Dhabi. Proceedings of the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference

18. Malinowski, M. and Calvert, A.: A field test of 3D reflection orientation analysis along a 2D crooked line in northern Finland supplemented with additional cross-spreads, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-7991, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-7991, 2025.

19. Muir J., Jeffery S., Collins J., Marks A., Brake N., Nissen-Meyer T. Quantifying spatial peat depth with seismic micronodes and the implications for carbon stock estimates, Science of The Total Environment, Volume 949, 1st Nov 2024, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174769

20. Kiers T., Schmelzbach C., Edme P., Monitoring of an Alpine landslide using dense seismic observations: combining Distributed Acoustic Sensing and 1000 autonomous seismic nodes, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, April 23-28, 202, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8986

21. Ourabah, A. [2025], Processing on the Edge, the Evolution of in-field Processing in Modern Land Seismic Surveys, First Break, Volume 43, Issue 1, Jan 2025, p. 69 – 73, https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2025006.