

УДК 550.8:552.5(574.6); <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-2.02>

<https://orcid.org/0000-0002-1866-7677>

<https://orcid.org/0000-0002-0327-4416>

<https://orcid.org/0009-0000-5376-0706>

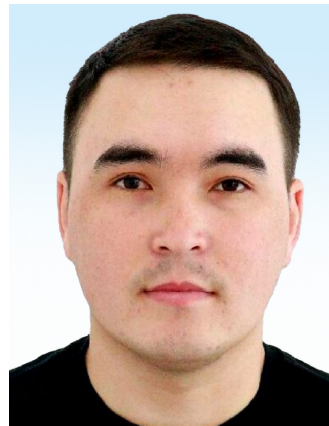
ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА СЫРДАРЬИНСКОГО ОСАДОЧНОГО БАСЕЙНА



А.Е. АБЕТОВ¹,
доктор геолого-
минералогических наук,
профессор, академик НАН РК,
a.abetov@satbayev.university



И.Ю. КУЛАКОВ²,
доктор геолого-
минералогических наук,
профессор, член-корр,
i.kulakov@skoltech.ru



Ә.Ә. ӘУЕСБЕК¹,
докторант 2 курса,
auyesbek99@mail.ru

¹НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ К.И. САТПАЕВА

Республика Казахстан, г. Алматы, 050013, ул. Сатпаева, 22

²СКОЛКОВСКИЙ ИНСТИТУТ НАУКИ И ТЕХНИКИ,

Российская Федерация, 121205, Москва, Большой бульвар д. 30

Статья посвящена комплексному исследованию строения кристаллического фундамента Сырдарьинского осадочного бассейна, расположенного в зоне сочленения платформенных структур и палеозойских складчатых сооружений Южного Тянь-Шаня. Актуальность работы обусловлена высокой степенью неопределённости представлений о морфологии и внутреннем строении фундамента, связанной с отсутствием прямых скважинных данных и неоднозначностью интерпретации региональных потенциальных геофизических полей.

На основе интегрированной интерпретации сейсмических (МОГТ, МОВЗ), гравиметрических, аэромагнитных и магнитотеллурических данных выполнена реконструкция поверхности фундамента, уточнены его блоковое строение, латеральная неоднородность и распределение физических свойств пород. Сейсмические материалы сформировали геометрический каркас модели и обеспечили первичную структурную привязку, тогда как гравиметрические и магнитные данные позволили уточнить плотностные и магнитные контрасты, а магнитотеллурические исследования — особенности глубинной проводимости и флюидонасыщенности отдельных зон.

Установлено, что фундамент залегает на глубинах 9–13 км и характеризуется выраженной блоково-расчленённой морфологией с амплитудами вертикальных смещений до 2–3 км. При этом признаки протяжённых рифтовых грабенов и классических рифтогенных структур не выявлены. Показано, что магнитное поле отражает преимущественно вариации намагниченности пород и не может быть напрямую сопоставлено с поверхностью кристаллического фундамента. Магнитотеллурические данные фиксируют его высокоомный характер и локальные зоны пониженного сопротивления, приуроченные к областям тектонической нарушенности и возможной флюидонасыщенности.

Разработанная модель характеризует фундамент как консолидированный, структурно дифференцированный и латерально неоднородный субстрат, сформированный в условиях внутриплитной активизации и дифференцированных вертикальных тектонических движений. Полученные результаты уточняют геодинамическую модель бассейна и повышают обоснованность прогноза нефтегазоносности палеозойских комплексов региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Сырдарьинский осадочный бассейн; кристаллический фундамент; комплексная геофизическая интерпретация; магнитный фундамент; сейсморазведка; магнитотеллурическое зондирование; гравиметрия; аэромагнитная съёмка; геодинамика, тектоника.

СЫРДАРИЯ ШӨГІНДІ БАССЕЙНІ КРИСТАЛДЫ ҚЫРТЫСЫН ИЕРАРХИАЛЫҚ ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ТАЛДАУ

А.Е. АБЕТОВ¹, геология-минералогия ғылымдарының докторы, ҚР ҰҒА академигі, *abetov.auez@mail.ru*

И.Ю. КУЛАКОВ², геология-минералогия ғылымдарының докторы, профессор, Ресей Ғылым академиясының корреспондент-мүшесі (PFA), *i.kulakov@skoltech.ru*

Ә.Ә. ӘУЕСБЕК¹, 2-курс докторанты, *auyesbek99@mail.ru*

¹Қ.И. СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ,
Қазақстан Республикасы, 050013, Алматы қ., Сәтпаев к. 22

²СКОЛЬКОВО ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТЫ,
Ресей Федерациясы, 121205, Мәскеу, Үлкен бульвар 30

Мақала Оңтүстік Тянь-Шаньдағы платформалық құрылымдар мен палеозойлық қатпарлы белдеулердің түйісу аймағында орналасқан Сырдария шөгінді бассейнінің кристалдық іргетасының құрылысын кешенді зерттеуге арналған. Жұмыстың өзектілігі іргетастың морфологиясы мен ішкі құрылысы туралы түсініктердің жоғары деңгейдегі белгісіздігімен, тікелей бұрғылау деректерінің жоқтығымен және өңірлік потенциалдық геофизикалық өрістерді интерпретациялаудың біртәнді еместігімен анықталады.

Сейсмикалық (МОГТ, МОВЗ), гравиметриялық, аэромагниттік және магнитотеллуриялық деректердің интеграцияланған интерпретациясы негізінде іргетас бетінің реконструкциясы орындалды, оның блоктық құрылымы, латералды біртектілігі және жыныстардың физикалық қасиеттерінің таралуы нақтыланды. Сейсмикалық материалдар модельдің геометриялық қаңқасын қалыптастырып, бастапқы құрылымдық тіркеуді қамтамасыз етті, ал гравиметриялық және магниттік деректер тығыздық және магниттік контрасттарды нақтылауға мүмкіндік берді, магнитотеллуриялық зерттеулер терең өткізгіштік ерекшеліктері мен жекелеген аймақтардың флюидқанығу ықтималдығын анықтады.

Іргетастың 9–13 км тереңдікте жататыны және вертикаль ығысулары 2–3 км-ге дейін жететін айқын блоктық-тілімді морфологиямен сипатталатыны анықталды. Ұзақ созылған рифттік грабендер мен классикалық рифтогендік құрылымдардың белгілері анықталған жоқ. Магнит өрісі жыныстардың магниттелу вариацияларын көрсететіні және кристалдық іргетас бетімен тікелей сәйкестендірілмейтіні дәлелденді. Магнитотеллуриялық деректер оның жоғары кедергілі сипатын және тектоникалық бұзылу аймақтарына және ықтимал флюидқанығуға байланысты жергілікті төмен кедергілі зоналарды көрсетеді.

Әзірленген модель іргетасты консолидтелген, құрылымдық дифференциацияланған және латералды біртекті субстрат ретінде сипаттайды. Ол ішкіплиталық белсенділік пен дифференциалды вертикаль тектоникалық қозғалыстар жағдайында қалыптасқан. Алынған нәтижелер бассейнің геодинамикалық моделін нақтылап, өңірдің палеозойлық кешендерінің мұнай-газдылығын болжаудың негізділігін арттырады.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: Сырдария шөгінді бассейні; кристалдық іргетас; кешенді геофизикалық интерпретация; магниттік іргетас; сейсмикалық барлау; магнитотеллуриялық зондтау; гравиметрия; аэромагниттік түсірілім; геодинамика; тектоника.

HIERARCHICAL INTEGRATED GEOPHYSICAL STUDY OF THE CRYSTALLINE BASEMENT OF THE SYRDARYA SEDIMENTARY BASIN

A.E. ABETOV¹, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, academician NAN RK, abetov.aveez@mail.ru

I.J. KULAKOV², doctor of geological and mineralogical sciences, professor, corresponding member of the russian academy of sciences, i.kulakov@skoltech.ru

A.A. AUYESBEK¹, second-year PhD candidate, ayesbek99@mail.ru

¹K.I. SATBAYEV KAZAKH NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY, Republic of Kazakhstan, Almaty, 050013, Satbayev str., 22

²SKOLKOVO INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, Russian Federation, 121205, Moscow, Bolshoy Boulevard, 30

The article presents an integrated study of the crystalline basement of the Syrdarya sedimentary basin, located at the junction of platform structures and Paleozoic fold belts of the South Tien Shan. The study is motivated by uncertainties in basement morphology and internal architecture due to the absence of direct well data and ambiguous interpretation of regional potential fields.

Using integrated interpretation of seismic (CDP, VSP), gravity, aeromagnetic, and magnetotelluric data, a reconstruction of the basement surface was performed, and its block structure, lateral heterogeneity, and physical property distribution were refined. Seismic data provided the main structural framework, while gravity and magnetic data constrained density and magnetic heterogeneities, and magnetotelluric data delineated deep conductive anomalies and potential zones associated with fluid saturation

It is shown that the basement occurs at depths of 9–13 km and has a blocky, dissected morphology with vertical offsets up to 2–3 km. No evidence of large-scale rift grabens or classical rift systems is identified. The magnetic field reflects variations in rock magnetization and is not directly linked to the crystalline basement surface. Magnetotelluric results indicate a high-resistivity basement with localized conductive zones associated with tectonic disturbance and potential fluid saturation.

The proposed model defines the basement as a consolidated, structurally differentiated, laterally heterogeneous medium formed under intraplate tectonic activation and differential vertical movements.

The results refine the geodynamic framework of the basin and improve the assessment of hydrocarbon prospectivity in the Paleozoic complexes of the region.

KEYWORDS: *Syr Darya sedimentary basin; crystalline basement; integrated geophysical interpretation; magnetic basement; intraplate tectonic activation.*

Введение. Изучение кристаллического фундамента осадочных бассейнов относится к ключевым задачам глубинной геофизики и региональной тектоники, поскольку он формирует структурный каркас бассейна, контролирует мощность и архитектуру осадочного чехла и оказывает определяющее влияние на формирование и эволюцию нефтегазоносных систем [1; 2]. В современных геодинамических концепциях фундамент рассматривается не как пассивное основание, а как активный элемент литосферы, участвующий в перераспределении напряжений, локализации деформаций и формировании путей миграции флюидов. Его морфология, блоковая структура и контраст физических свойств определяют пространственную организацию коллекторов, условия формирования ловушек и эффективность аккумуляции углеводородов.

В платформенных и квазиплатформенных областях решение данной задачи существенно осложняется отсутствием прямого бурового контроля и фрагментарностью геологической информации о составе и строении кристаллического фундамента. В этих условиях определяющее значение приобретает комплексная геофизическая интерпретация, основанная на интеграции сейсмических, гравиметрических, магнитных и магнитотеллурических данных [Punanova, 2019].

Каждый из методов имеет принципиальные ограничения: сейсморазведка обеспечивает высокую геометрическую разрешающую способность, но теряет устойчивость интерпретации в условиях латеральной неоднородности и интенсивных тектонических дислокаций [3]; методы потенциальных полей чувствительны к контрастам плотности и намагниченности, однако характеризуются неоднозначностью обратных задач [5]; магнитотеллурическое зондирование информативно в отношении распределения электропроводности, связанной с трещиноватостью и флюидонасыщенностью, но не обеспечивает однозначного восстановления геометрии границ. Использование отдельных методов без взаимного контроля неизбежно приводит к упрощённым и нередко противоречивым моделям.

В этой связи наиболее эффективен иерархический интегрированный подход: сейсмика задаёт структурный каркас, а гравиметрические и магнитотеллурические данные уточняют распределение физических свойств и выявляют зоны тектонической нарушенности. Это существенно снижает интерпретационную неопределённость и обеспечивает внутреннюю согласованность и физическую обоснованность модели.

Указанные методические проблемы в полной мере проявляются в Сырдарьинском осадочном бассейне, расположенном в зоне сочленения Туранской плиты и палеозойских складчатых сооружений Южного Тянь-Шаня [6]. Его тектоническое положение обусловило полифазную эволюцию, сопровождавшуюся чередованием этапов растяжения и инверсии, что привело к формированию сложной блоково-разломной архитектуры кристаллического фундамента (рисунки 1). В результате в литературе сформировался широкий спектр интерпретаций его строения, включая гипотезы существования глубоких рифтовых грабенов и альтернативные модели внутриплитной активизации [7–9].

ление его блоковой структуры и зон тектонической нарушенности, а также оценка геодинамических условий формирования. Для достижения цели решаются задачи: построение структурной модели по данным МОГТ и МОВЗ; уточнение физических свойств фундамента с использованием гравиметрии, аэромагнитной съёмки и МТЗ; выделение тектонически ослабленных зон; анализ соотношения между магнитным и сейсмическим образами поверхности фундамента.

Реализация комплексного подхода позволяет перейти от разрозненных интерпретаций к согласованной геолого-геофизической модели фундамента, уточнить существующие тектонические представления и повысить достоверность региональных геодинамических реконструкций. Полученные результаты формируют надёжную основу для последующей оценки влияния фундамента на формирование осадочного чехла и нефтегазоносности региона, а также для повышения обоснованности прогнозных решений при планировании поисково-разведочных работ.

Материалы и методы исследования

Основу исследования составили материалы комплексных геолого-геофизических работ 2014–2015 гг. в пределах Сырдарьинского осадочного бассейна. Работы выполнены по системе опорных региональных профилей (геотравверсов): IX–IX северо-западного простирания (≈ 500 км) и X–X субмеридионального направления (≈ 210 км). Полевые исследования включали синхронные наблюдения методами МОГТ-2D, МОВЗ, МТЗ и аэрогравимагнитной съёмки.

Сейсмические исследования МОГТ-2D послужили основой для построения структурного каркаса. Работы выполнялись с использованием невзрывных вибрационных источников по технологии многократных перекрытий (48-кратное суммирование). Глубинность достигала 10–12 км, обеспечивая уверенное прослеживание отражающих горизонтов до фундамента. Обработка включала подавление кратных волн, миграцию до суммирования и построение глубинных разрезов на основе скоростного моделирования.

Для уточнения глубинного строения в зонах относительной «сейсмической прозрачности» применялся метод обменных волн землетрясений (МОВЗ), основанный на регистрации обменных волн от удалённых землетрясений [20; 19]. Выполнено 74 пункта наблюдений, что позволило уточнить положение границ в интервале 10–40 км и подтвердить модель поверхности фундамента.

Кристаллический фундамент отличается выраженной петрографической и структурной неоднородностью, вызывающей рассеяние и искажение отражённых волн. Низкий контраст акустического импеданса, кратные отражения, дифракционные эффекты и сложная скоростная структура снижают точность интерпретации и разрешающую способность. Поэтому при высокой эффективности сейсмики для картирования границ её возможности в изучении внутренней архитектуры фундамента ограничены и требуют комплексирования с другими методами.

Аэрогравимагнитная съёмка выполнена ТОО «Казгеотех» по системе меридиональных профилей с применением высокочувствительных гравиметров и магнитометров (погрешности: $\pm 0,5$ мГал и ± 5 нТл). Обработка включала редукцию к полюсу, аналитические продолжения, разделение региональной и локальной составляющих и построение моделей источников методом векторной инверсии намагничённости [12].

Гравимагнитные методы выявляют глубинные неоднородности плотности и намагниченности, однако без априорных геологических ограничений и сейсмического контроля не обеспечивают однозначного восстановления геометрии источников. Основное ограничение — фундаментальная неоднозначность обратной задачи, а также невысокий контраст плотностей между кристаллическими комплексами.

Магнитные данные отражают вариации намагниченности, связанные с составом пород, термической историей и тектоническими процессами. Результаты инверсии зависят от параметров регуляризации и начальных моделей; интенсивные аномалии могут быть обусловлены как интрузиями, так и метаморфическими зонами и не всегда соответствуют морфологии фундамента.

Магнитотеллурическое зондирование (АО «Казгеология») выполнено по 481 пункту, обеспечив изучение геоэлектрического строения до глубин 30–40 км. Интерпретация основана на анализе кривых кажущегося сопротивления и фаз с последующим 1D и 2D инверсионным моделированием.

Электромагнитные методы, включая МТЗ, информативны для анализа распределения электропроводности, чувствительной к неоднородности, трещиноватости и флюидонасыщенности. Основное внимание уделено зонам пониженного сопротивления, интерпретируемым как области тектонической нарушенности и возможной флюидонасыщенности [21; 22]. При этом повышенная проводимость может быть связана как с глубинными разломами, так и с локальными минерализованными зонами, что требует сопоставления с другими данными. Интегрированная интерпретация сейсмических, гравиметрических, магнитных и МТ-данных позволяет уточнить свойства пород, выделить структурные границы и блоки и существенно снизить интерпретационную неопределённость.

Результаты и обсуждение

Структурный каркас по сейсмическим данным (МОГТ, МОВЗ). Основным источником сведений о глубинном строении Сырдарьинского осадочного бассейна послужили данные МОГТ, обеспечивающие наиболее высокое пространственное разрешение при выделении отражающих горизонтов и тектонических элементов земной коры. Их интерпретация легла в основу построения структурного каркаса и стала базой для комплексирования с гравиметрическими, магнитными и магнитотеллурическими данными.

По результатам анализа временных и глубинных разрезов поверхность кристаллического фундамента выделяется как морфологически неустойчивый отражающий горизонт, тем не менее чётко разграничивающий стратифицированный осадочный чехол и область резкого усложнения структуры волнового поля (рисунки 2). Осадочные толщи характеризуются системой субпараллельных, высококогерентных рефлекторов с устойчивыми амплитудно-частотными параметрами.

Глубже поверхности кристаллического фундамента фиксируется деградация сейсмического сигнала: снижение амплитуд, ухудшение латеральной коррелируемости и деструктуризация отражающих пакетов (рисунки 3).

На сейсмических разрезах наблюдается резкая дезинтеграция отражающих пакетов: отражения становятся короткими, прерывистыми и слабо коррелируемыми. Появление дискретных отражений средней и низкой амплитуды свидетельствует

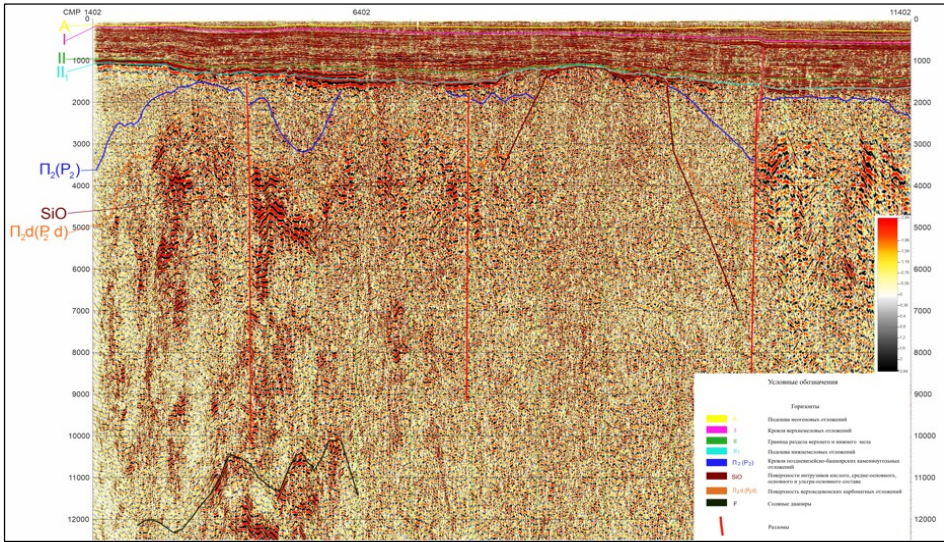


Рисунок 2 - Фрагмент глубинного сейсмического разреза отражающих горизонтов вдоль геотраверса IX (по Гульницкому Л.Н, 2017г)

о резком градиенте акустического импеданса при переходе к метаморфическим и магматическим комплексам фундамента.

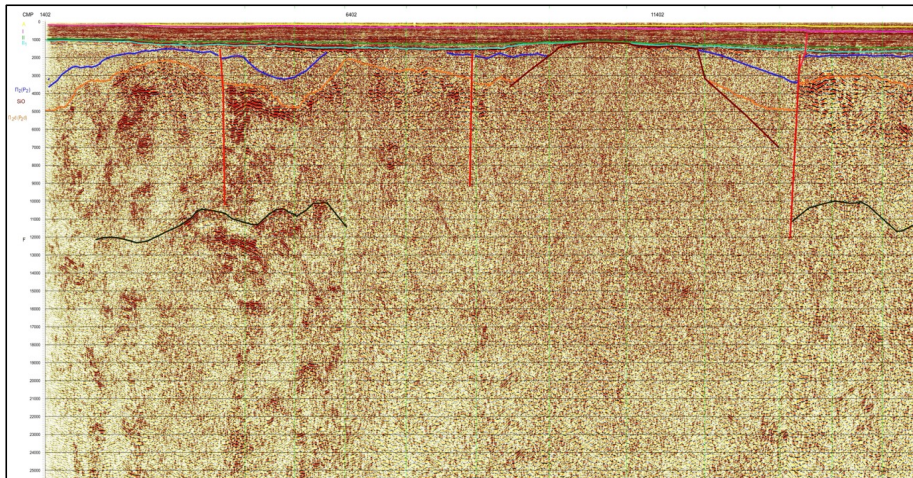


Рисунок 3 - Глубинный сейсмический разрез вдоль геотраверса IX глубиной до 25000м (по Гульницкому Л.Н, 2017г). Условные обозначения смотреть в рисунке 2

Подобная структура записи отражает сложное внутреннее строение кристаллического основания и высокую неоднородность его физических свойств, обусловленную интенсивной тектонической переработкой, развитием зон дробления и трещиноватости, а также значительной вариабельностью упругих и плотностных характеристик пород.

Глубина залегания фундамента варьирует в пределах 9–13 км и характеризуется выраженной тектонической расчленённостью. Сейсмические разрезы уверенно фиксируют блоковую сегментацию с вертикальными смещениями до 2–3 км, от-

ражающую унаследованность древних структур и их последующую реактивацию. Положительные формы рельефа фундамента коррелируют с зонами редуцированной мощности осадочного чехла, тогда как депрессии соответствуют областям его максимального накопления, что свидетельствует о контролирующей роли фундамента в осадконакоплении (рисунок 3).

При этом сейсмические данные не выявляют признаков крупных листрических разломов, ступенчатых дислокаций и грабенообразных структур, характерных для рифтовых систем. Отсутствие протяжённых зон интенсивной тектонической деструкции и значительных амплитуд смещений не подтверждает ранее предложенные по магнитным данным модели глубоких рифтовых депрессий.

Для уточнения глубинного строения применен метод обменных волн землетрясений (МОВЗ), обладающий высокой чувствительностью к контрастам упругих свойств на значительных глубинах (рисунок 4).

Границы обмена строились путем осреднения точек обмена в предположении слоисто-горизонтального строения изучаемой среды. На разрезе границ обмена выделено 3 границы в осадочном чехле, надежно выделяется граница поверхности палеозойского фундамента и с меньшей степенью надежности семь границ в консолидированной коре, поверхность Мохоровичича и граница в мантии, индексация которых также условна (рисунок 4).

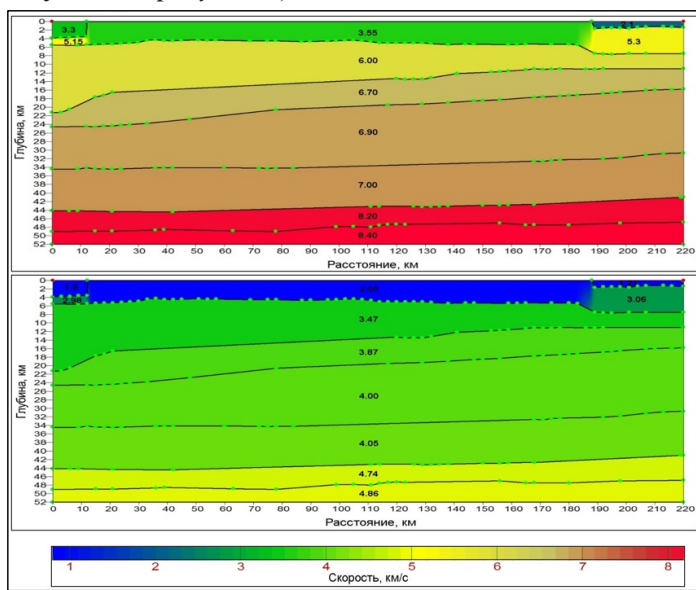


Рисунок 4 - Структурно-скоростная модель МОВЗ (вдоль геотраверса IX) по продольным (а) и поперечным (б) волнам, параметризованная в программе SeisWide. Зеленые узлы – аппроксимирующие точки обмена, определяющие положение сейсмических границ (черные линии). На модель вынесены скорости сейсмических волн в км/с (по А.В. Беляшову, 2017 г)

Сопоставление результатов МОГТ и МОВЗ показало высокую согласованность при определении глубины поверхности фундамента и локализации крупных структурных элементов. В зонах слабых или прерывистых отражений МОГТ данные МОВЗ позволили уточнить положение глубинных границ за счёт регистрации

обменных волн на контрастных упругих границах, обеспечивая дополнительный контроль интерпретации.

Магнитное поле и проблема «магнитного фундамента». Аномальное магнитное поле Сырдарьинского осадочного бассейна характеризуется выраженной латеральной неоднородностью и сложной пространственной конфигурацией, отражающей сегментированное строение кристаллического фундамента.

Карта магнитного поля, редуцированного к полюсу, демонстрирует чередование зон повышенных и пониженных значений, формирующих мозаичную систему линейных и изометричных аномалий различной интенсивности. Среди них выделяются локальные аномалии, вероятно связанные с интрузивными магматическими телами, зонами повышенной намагниченности и тектоническими нарушениями (рисунк 5).

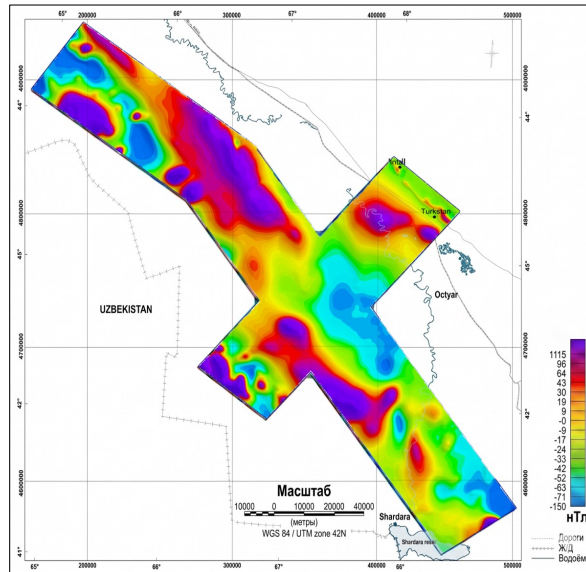


Рисунок 5 - Карта магнитного поля, редуцированного к полюсу (по Матусевичу А.В., 2017 г)

Обработка и интерпретация аэромагнитных данных выполнялась с применением методов фильтрации, аналитических продолжений и векторной инверсии намагниченности, что позволило построить серию альтернативных моделей магнитного фундамента. Полученные решения характеризуются значительной вариативностью, обусловленной выбором параметров обработки, априорных ограничений и используемых алгоритмов инверсии. В ряде моделей выделяются узкие линейные зоны пониженной глубины магнитного фундамента, преимущественно субширотного и северо-восточного простирания, которые могут интерпретироваться как возможные грабенообразные структуры с амплитудами до 6–10 км (рисунк 6).

Сопоставление результатов магнитного моделирования с данными сейсморазведки выявляет систематические расхождения. Площади пониженной глубины магнитного фундамента зачастую не совпадают с положением поверхности кристаллического фундамента, установленного по данным МОГТ, а интенсивные магнитные аномалии не всегда коррелируют с аномалиями гравитационного поля.

Подобные несоответствия обусловлены петрографической неоднородностью кристаллического фундамента, включающего метаморфические и магматические комплексы с контрастными магнитными свойствами, а также влиянием локальных интрузий, тектонических нарушений и зон метаморфической переработки.

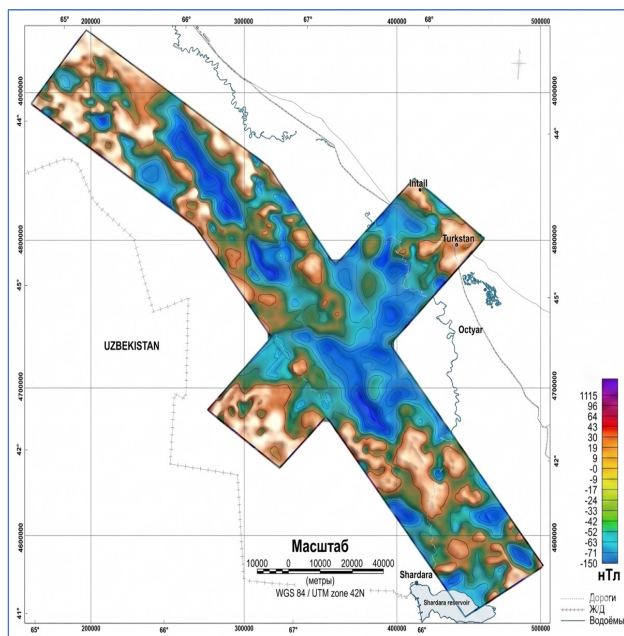


Рисунок 6 - Карта глубин магнитного фундамента по результатам Векторной Инверсии Намагниченности (по Матусевичу А.В., 2017 г)

Следует учитывать, что «магнитный фундамент» является условной границей, отражающей распределение магнитных минералов, а не реальной литологической границей кристаллического основания. В осадочном чехле могут присутствовать горизонты с повышенной намагниченностью, тогда как отдельные участки фундамента характеризуются пониженной магнитной восприимчивостью. Поэтому глубина магнитного фундамента может как превышать, так и быть меньше глубины кристаллического основания, определённой по сейсмическим данным. Игнорирование этих особенностей приводит к систематическим ошибкам и искажению представлений о глубинной геологической структуре бассейна.

В связи с этим результаты магнитной инверсии следует рассматривать как вероятностное отображение распределения магнитных свойств, а их геологическая интерпретация требует обязательного сопоставления с сейсмическими и гравиметрическими данными.

Дополнительную неопределённость вносят методические ограничения магнитной инверсии, включая принципиальную неоднозначность обратной задачи и высокую чувствительность решений к априорным параметрам моделирования. В этой связи результаты магнитной инверсии следует рассматривать как вероятностное представление распределения магнитных свойств, требующее обязательной верификации и согласования с сейсмическими и гравиметрическими данными.

Гравитационное поле и плотностная модель. Гравитационное поле Сырдарьинского осадочного бассейна характеризуется сглаженным региональным фоном с наложенными локальными аномалиями умеренной интенсивности. Пространственное распределение аномалий силы тяжести демонстрирует плавные, низкоамплитудные градиенты без выраженных скачков, типичных для крупных разломных зон, что указывает на квазигомогенное распределение плотности в пределах литосферы этого бассейна.

В отличие от магнитного поля, чувствительного к вещественному составу и концентрациям ферромагнитных минералов, гравиметрические данные напрямую отражают плотностные контрасты и существенно менее подвержены влиянию локальных литологических вариаций. Это определяет их приоритетное значение для верификации и физического обоснования геологических моделей (рисунки 7).

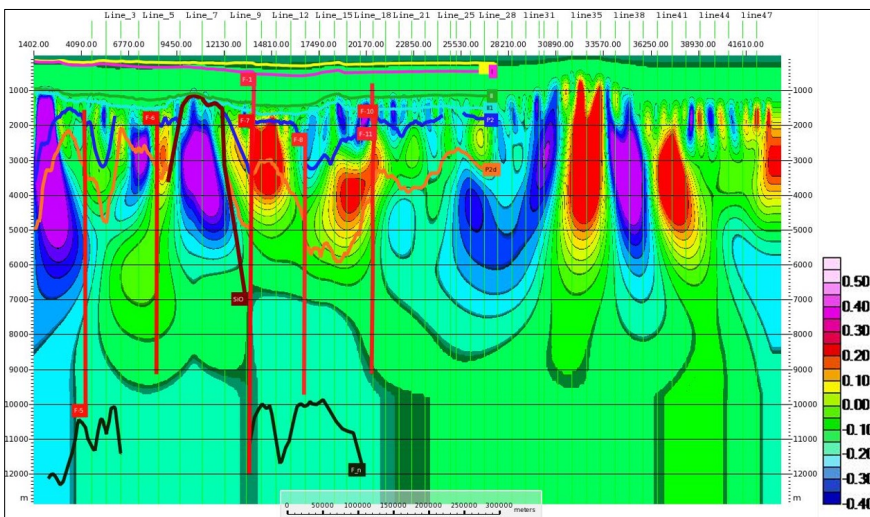


Рисунок 7 - Разрез объёмной модели гравитационного поля вдоль геотраверса IX (по данным ТОО «Данк», 2017 г)

Плотностная модель разреза построена в рамках интегрированной интерпретации гравиметрических и сейсмических данных, при этом её жёстким структурным каркасом служит сейсмическая поверхность кристаллического фундамента. Распределение плотности соответствует диапазону значений, характерному для консолидированных магматических и метаморфических комплексов, а геометрия фундамента демонстрирует высокую степень согласованности с сейсмическими построениями, что подтверждает достоверность модели.

Принципиально важно, что в гравитационном поле отсутствуют признаки резких плотностных контрастов, ожидаемых для глубоких грабенообразных структур с амплитудами в несколько километров. Напротив, модель фиксирует плавные латеральные и вертикальные вариации плотности и сглаженную морфологию фундамента, что свидетельствует об отсутствии значительных разрывных нарушений и глубинной тектонической деструкции коры.

Интеграция гравиметрических и сейсмических данных формирует геологически согласованную и физически верифицированную модель строения бассейна.

на, в которой доминируют непрерывные, эволюционно обусловленные изменения свойств пород. Такой подход существенно повышает надёжность реконструкции глубинной структуры и служит основой для обоснованного анализа геодинамической эволюции региона.

Геoeлектрическая структура по данным МТЗ. По данным магнитотеллурических исследований Сырдарьинского осадочного бассейна кривые кажущегося сопротивления и фазовые характеристики отличаются высокой стабильностью и воспроизводимостью, что обеспечило построение детализированных геoeлектрических разрезов до глубин 30–40 км с высоким пространственным разрешением для анализа распределения электрических свойств в толще земной коры, и надёжным выделением как глубинных границ, так и локальных аномалий.

Кристаллический фундамент уверенно выделяется как высокоомная толща с удельным сопротивлением, характерным для консолидированных магматических и метаморфических комплексов, что свидетельствует о его структурной устойчивости на значительных глубинах (до 40–50 км). Осадочный чехол, напротив, характеризуется пониженными значениями сопротивления и выраженной субгоризонтальной слоистостью, отражающей вариации вещественного состава, пористости и водонасыщенности.

На фоне высокоомного фундамента фиксируются локальные линейные и протяжённые зоны пониженного сопротивления (рисунок 8), пространственно согласующиеся с областями дезинтеграции волнового поля по данным сейсморазведки. Эти аномалии интерпретируются как зоны повышенной трещиноватости, тектонической нарушенности, метасоматической переработки и вероятной флюидонасыщенности, а также могут быть связаны с локальными магматическими проявлениями.

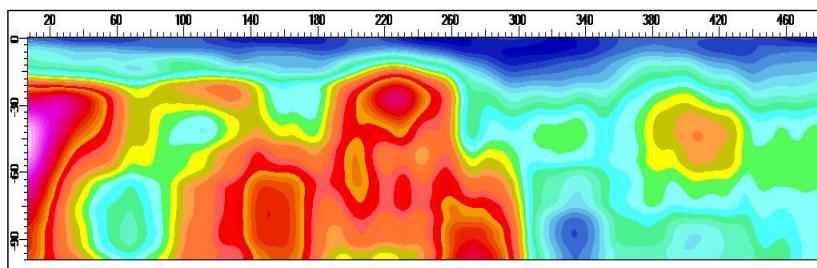


Рисунок 8 - Сглаженный геoeлектрический разрез по геотраверсу IX (по Ингеру О, 2017 г)

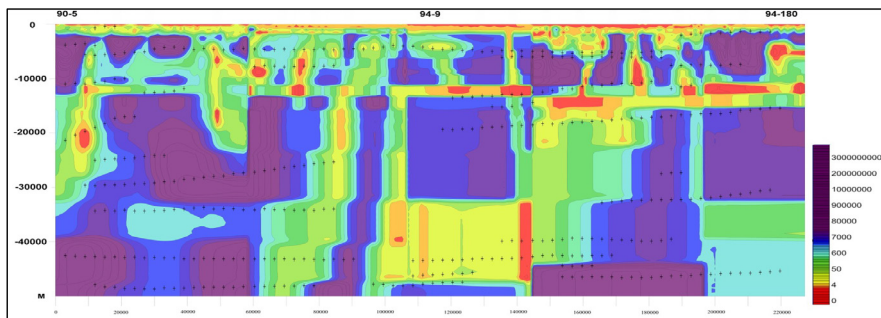


Рисунок 9 – Фрагмент геoeлектрического разреза с границами определенными по МОВЗ до глубины 50 км вдоль геотраверса IX (по Ингеру О., и Беяшову Н.Н., 2017 г)

Принципиально важно, что при их наличии глубина залегания поверхности фундамента остаётся практически неизменной, что указывает на их вторичный характер относительно его геометрии.

Сопоставление геоэлектрических разрезов с результатами МОВЗ до глубин ~50 км выявляет устойчивую корреляцию основных глубинных границ (рисунок 9). Зоны пониженного сопротивления, как правило, совпадают с интервалами изменения параметров волнового поля, что подтверждает достоверность интерпретации и высокую чувствительность МТЗ к глубинным неоднородностям.

Таким образом, выявленные проводящие зоны не связаны с крупноамплитудными тектоническими смещениями и не отражают морфологию фундамента. Они обусловлены внутренними физическими свойствами пород — трещиноватостью, метасоматическими преобразованиями и флюидонасыщенностью — и характеризуют зоны глубинной тектонической переработки кристаллического основания.

Интеграция данных и геофизическая модель. Комплексная интерпретация геолого-геофизических материалов, полученных по системе региональных геотраверсов, обеспечила согласование разнородных данных и формирование единой, внутренне непротиворечивой модели глубинного строения Сырдарьинского осадочного бассейна. Ключевым методологическим принципом явилась иерархическая интеграция, при которой сейсмические данные использовались как геометрическая основа, а результаты потенциальных и электромагнитных методов — для уточнения распределения физических свойств.

Сейсмические исследования (МОГТ и МОВЗ) формируют опорный структурный каркас. Кристаллический фундамент характеризуется блоковым строением с амплитудами вертикальных смещений до 2–3 км, отражающим унаследованную тектоническую сегментацию. Ниже его поверхности наблюдается резкое снижение когерентности отражённого волнового поля, что указывает на высокую степень тектонической переработки и петрографической неоднородности.

Потенциальные поля вносят принципиально различный вклад в интерпретацию. Магнитное поле демонстрирует высокую латеральную изменчивость и мозаичный характер, отражая неоднородное распределение намагниченности, связанное с составом пород и их геологической историей. В отличие от него, гравитационное поле характеризуется сглаженным фоном и отсутствием резких градиентов, что указывает на квазинепрерывное распределение плотности. Высокая согласованность гравиметрических и сейсмических данных при реконструкции морфологии фундамента подтверждает устойчивость структурной модели.

Магнитотеллурические данные существенно уточняют внутреннюю структуру фундамента. На фоне высокоомного кристаллического основания выделяются локальные проводящие зоны, пространственно коррелирующие с областями дезинтеграции сейсмического волнового поля. Их интерпретация связана с развитием трещиноватости, тектонической нарушенности и флюидонасыщенности, при отсутствии связи с геометрией поверхности фундамента.

В результате интеграции методов сформирована согласованная модель кристаллического фундамента, характеризующегося блоково-сегментированным строением и латеральной изменчивостью физических свойств. Морфология фундамента

определяется преимущественно сейсмическими и гравиметрическими данными, тогда как магнитные и магнитотеллурические поля отражают его вещественную и структурно-физическую неоднородность. Выделенные проводящие зоны рассматриваются как потенциально проницаемые структуры, контролирующие миграцию флюидов и перераспределение напряжений в земной коре.

Обсуждение

1. Методологические основы комплексной интерпретации геофизических данных.

Проведённое исследование подтверждает, что надёжная реконструкция кристаллического фундамента осадочных бассейнов, недоступного для прямого бурения, не может быть достигнута в рамках отдельного геофизического метода. Это связано с принципиальной физической разнородностью измеряемых параметров: сейсмические методы регистрируют контрасты упругих свойств, гравиметрия — плотностные неоднородности, магниторазведка — вариации намагниченности, а магнитотеллурические методы — распределение электропроводности. Каждая из этих групп методов формирует собственное представление о геологической среде, обладающее ограниченной областью применимости и специфическими эффектами эквивалентности [10; 12].

В условиях значительной гетерогенности кристаллического фундамента это приводит к множественности допустимых решений обратных задач и, как следствие, к формированию неоднозначных или геологически несогласованных моделей при раздельной интерпретации данных. Особенно это характерно для потенциальных полей, где различные комбинации глубины, формы и физических свойств источников могут формировать эквивалентные аномальные эффекты [12]. Аналогичные ограничения характерны и для магнитотеллурических данных, где чувствительность к электропроводности не позволяет однозначно восстановить геометрию структур без внешних ограничений.

В этой связи методологически обоснованным является иерархический подход к интеграции данных, при котором сейсмические методы выполняют функцию первичного геометрического каркаса. Данные МОГТ и МОВЗ обладают наибольшей пространственной разрешающей способностью и позволяют надёжно выделять основные отражающие горизонты, включая поверхность кристаллического фундамента [10].

В рамках данного исследования сейсмическая интерпретация обеспечивает реконструкцию блоково-сегментированной структуры фундамента и задаёт его базовую морфологию. Потенциальные и электромагнитные методы - рассматриваются как средства уточнения физических свойств среды. Их интерпретация осуществляется в ограниченном пространстве допустимых геометрических решений, заданных сейсмическими данными, что существенно снижает степень эквивалентности и повышает устойчивость моделей. Такой подход соответствует современным тенденциям интегрированной геофизики, предполагающим совместное решение обратных задач различной физической природы в рамках единой параметрической модели [12].

2. Геофизическая интерпретация и тектонические следствия. Комплексная интерпретация сейсмических, гравиметрических, магнитных и магнитотеллурических данных позволила сформировать согласованную модель кристаллического фундамента Сырдарьинского осадочного бассейна, характеризующуюся блоково-сегментированным строением и отсутствием заметных признаков регионального рифтогенеза.

Сейсмические данные МОГТ и МОВЗ фиксируют залегание поверхности фундамента на глубинах порядка 9–13 км с выраженной, но не экстремальной расчленённостью. Амплитуды вертикальных смещений блоков достигают 2–3 км, что указывает на унаследованный характер тектонической сегментации. При этом отсутствуют признаки протяжённых грабенообразных структур, листрических разломов и систем литосферного растяжения, что существенно ограничивает интерпретации, основанные на рифтогенной модели формирования бассейна.

Глубже поверхности фундамента фиксируется резкая дезинтеграция сейсмического волнового поля, выражающаяся в снижении когерентности отражений и их фрагментации. Такая картина отражает высокую внутреннюю неоднородность кристаллического основания, обусловленную сочетанием тектонической переработки, метасоматических процессов и развития зон трещиноватости. Однако сейсмические данные сами по себе не позволяют дифференцировать физическую природу этих неоднородностей, что требует привлечения независимых методов.

Гравиметрические данные демонстрируют сглаженный региональный фон без выраженных линейных градиентов, что указывает на отсутствие крупных плотностных контрастов и, соответственно, на отсутствие глубоких рифтовых структур. Совместная интерпретация с сейсмическими данными показывает высокую согласованность в определении морфологии фундамента, подтверждая устойчивость блоково-сегментированной модели. При этом фундаментальная неоднозначность гравитационной обратной задачи ограничивает самостоятельную интерпретацию данных и требует обязательного сейсмического контроля [12].

Магнитное поле характеризуется высокой латеральной неоднородностью и мозаичной структурой аномалий, отражающей вариации намагниченности пород. Однако сопоставление с сейсмическими данными показывает отсутствие прямой связи между магнитными аномалиями и геометрией поверхности фундамента. Это подтверждает, что магнитные эффекты обусловлены преимущественно вещественными факторами — различиями в минералогии, термальной истории и метасоматической переработке пород — а не структурными особенностями. Таким образом, магнитные данные в данном контексте следует интерпретировать как индикатор литологической и термальной неоднородности, а не как прямой маркер тектонической геометрии [23].

Магнитотеллурические исследования выявляют преимущественно высокоомный характер кристаллического фундамента, соответствующий консолидированным магматическим и метаморфическим комплексам. На этом фоне устойчиво фиксируются локальные зоны пониженного удельного сопротивления, пространственно совпадающие с областями дезинтеграции сейсмического волнового поля. Такая согласованность независимых методов указывает на их общую тектоническую природу и позволяет интерпретировать эти зоны как области повышенной трещиноватости, микроблочности и флюидонасыщенности [21; 22].

Принципиально важным является отсутствие значимых изменений глубины залегания фундамента в пределах этих проводящих зон, что исключает их связь с крупными разрывными смещениями. Это позволяет рассматривать их как проявления внутренней перестройки фундамента, включающей метасоматические процессы, развитие вторичных минералов (включая графит и сульфиды) и активную циркуляцию флюидов в зонах тектонической ослабленности [27; 28].

В региональном геодинамическом контексте совокупность полученных данных свидетельствует о внутриплитном характере эволюции Сырдарьинского бассейна. Его формирование обусловлено преимущественно реактивацией унаследованных палеозойских разломных систем и дифференцированными вертикальными движениями блоков фундамента при отсутствии признаков масштабного литосферного растяжения. Это существенно отличает исследуемую структуру от классических рифтогенных бассейнов и указывает на доминирование постколлизионных процессов стабилизации коры.

Интегрированная модель демонстрирует, что ключевым фактором современного состояния фундамента является не только его первичная геологическая структура, но и длительная постформационная эволюция, включающая многократную реактивацию разломных зон, перераспределение напряжений и флюидную активизацию. В результате формируется сложная система взаимодействия структурных и вещественных факторов, определяющая наблюдаемую геофизическую картину.

Таким образом, комплексная интерпретация геофизических данных позволяет устранить противоречия между отдельными методами и сформировать физически непротиворечивую модель кристаллического фундамента. Полученные результаты подчёркивают необходимость строгого приоритета сейсмических данных при реконструкции геометрии и обязательного использования потенциальных и электромагнитных методов для анализа физического состояния среды.

Заключение и выводы

Проведённое исследование представляет собой комплексную интерпретацию геологического строения кристаллического фундамента Сырдарьинского осадочного бассейна, основанную на анализе сейсмических (МОГТ, МОВЗ), гравиметрических, магнитных и магнитотеллурических данных.

Методологической основой работы стал иерархический подход к интеграции разнородной геофизической информации: сейсмические данные, обладающие наибольшей геометрической точностью при картировании структурных границ, использовались для построения базового структурного каркаса, тогда как потенциальные и электромагнитные методы позволяли уточнять распределение физических свойств пород, выявлять латеральную неоднородность фундамента и локализовать зоны повышенной тектонической нарушенности.

На основе комплексного анализа данных сформулированы следующие ключевые выводы:


1. Глубинное строение и морфология фундамента. Поверхность кристаллического фундамента Сырдарьинского бассейна залегает на глубинах 9–13 км и характеризуется блоково-расчленённой морфологией с амплитудами вертикальных смещений отдельных блоков до 2–3 км. Рельеф фундамента не осложнен протяжёнными рифтовыми грабенами и крупных разломными системами. Согласованность сейсмических и гравиметрических данных указывает на преобладание вертикальных блоковых движений и внутриплитной тектонической активизации.

2. Различие между магнитным и кристаллическим фундаментом. Сравнительный анализ сейсмических и магнитных данных показал, что магнитное поле отражает преимущественно вариации намагничённости пород, связанные с их литологическим составом, магматической активностью и метаморфическими преобразованиями, и не является прямым индикатором рельефа поверхности фундамента. Интерпрета-

ция магнитных аномалий без сейсмического структурного контроля может формировать псевдоструктуры и вводить в заблуждение относительно наличия глубоких депрессий, что подчёркивает необходимость обязательной интеграции магнитных и сейсмических данных при реконструкции глубинного строения.

3. Выявление зон тектонической ослабленности. Магнитотеллурические исследования выявили высокоомный характер кристаллического фундамента, типичный для консолидированных магматических и метаморфических комплексов. На фоне высокоомного разреза фиксируются локальные линейные зоны пониженного сопротивления, пространственно совпадающие с областями дезинтеграции сейсмического волнового поля. Эти зоны интерпретируются как области повышенной трещиноватости, тектонической нарушенности и вероятной флюидонасыщенности. Выявленные аномалии предоставляют уникальную информацию о внутреннем физическом состоянии литосферы, которая практически не проявляется в морфологии поверхности фундамента.

4. Геодинамический контекст формирования бассейна. Кристаллический фундамент Сырдарьинского бассейна представляет собой сложный коллаж террейнов, сформировавшийся в ходе аккреционно-коллизийной эволюции Центрально-Азиатского складчатого пояса, связанной с закрытием Палеоазиатского океана. Современная морфология поверхности фундамента обусловлена дифференцированными вертикальными движениями блоков в мезозойско-кайнозойскую эпоху и реактивацией древних разломов под влиянием коллизии Индостанской и Евразийской плит.

5. Методологическое значение комплексной интерпретации. Работа продемонстрировала, что только последовательная иерархическая интеграция сейсмических, гравиметрических, магнитных и магнитотеллурических данных позволяет существенно снизить интерпретационную неоднозначность, сформировать геологически согласованную модель и повысить надёжность выводов о строении осадочного бассейна. Предложенный подход может служить методологическим стандартом для изучения кристаллического фундамента в регионах с дефицитом буровой информации. 

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Allen P.A., Allen J.R. Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment. – 3rd ed. – Oxford: Wiley-Blackwell, 2013.
- 2 Plotnikova I.N. Nonconventional hydrocarbon targets in the crystalline basement, and the problem of the recent replenishment of hydrocarbon reserves // Journal of Geochemical Exploration. – 2006. – Vol. 89, No. 1–3. – P. 335–338.
- 3 Oliver J. Probing the structure of the deep continental crust // Science. – 1982. – Vol. 216, No. 4547. – P. 689–695.
- 4 Artemiev M.E., Belov I.V. Density heterogeneities of the Earth's crust and upper mantle // Tectonophysics. – 1983. – Vol. 100. – P. 1–20.
- 5 Blakely R.J. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. – Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- 6 Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D. Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plumes // International Geology Review. – 1996. – Vol. 38, No. 5. – P. 430–466.
- 7 Парагульгов Т.Х., Парагульгов Х.Х., Фазылов Е.М., Шабалина Л.В. Торгайско-Сырдарьинский регион: эволюция глубинного строения и проблемы минерагении // Известия НАН РК. Серия геологическая и технических наук. - 2013. – № 2. – С. 8–19. [Paragul'gov T.Kh., Paragul'gov Kh.Kh., Fazylov E.M., Shabalina L.V. Torgaisko-

- Syrdar'inskii region: evolyutsiya glubinnogo stroeniya i problemy mineragenii // *Izvestiya NAN RK. Seriya geologicheskaya i tekhnicheskikh nauk.* – 2013. – No. 2. – S. 8–19.]
- 8 Chang C., Wang H., Gao R., Guo H., Han S., Wu Y. Deep crustal structure of the Eastern Central Asian Orogenic Belt revealed by integrated magnetic-gravity imaging // *Frontiers in Earth Science.* – 2022. – Vol. 10. – Article 843499.
 - 9 Abetov A.E., Mukanov D.B. Structure of the gravitational field and gravity-disturbing objects of the South Torgay sedimentary basin // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* – 2025. – No. 2. – P. 13–25.
 - 10 Brown L.D. Seismic reflection profiling of the continental crust // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.* – 2011. – Vol. 39. – P. 27–60.
 - 11 Sheriff R.E., Geldart L.P. *Exploration Seismology.* – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1995. – 592 p.
 - 12 Blakely R.J. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications.* – Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
 - 13 Kayumov A., et al. Deep structure of the southern Tien Shan from integrated geophysical data // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2012. – Vol. 45. – P. 1–15.
 - 14 Khain V.E. *Regional Geotectonics.* – Berlin: Gebrüder Borntraeger, 2001.
 - 15 Li Y., Oldenburg D.W. 3-D inversion of magnetic data // *Geophysics.* – 1996. – Vol. 61, No. 2. – P. 394–408.
 - 16 Jones A.G., Ferguson I.J. The magnetotelluric method // *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics / Ed. H. Gupta.* – Dordrecht: Springer, 2011. – P. 665–676.
 - 17 Zhdanov M.S. *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods.* – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 848 p.
 - 18 Zorin Y.A. Geodynamics of the western part of the Central Asian fold belt // *Tectonophysics.* – 1999. – Vol. 306. – P. 33–56.
 - 19 Злобин Т.К., Гуреев Р.Г., Злобина Л.М. Глубинное строение на Юго-Западной Камчатке по данным метода объемных волн землетрясений // *Тихоокеанская геология.* – 2005. – Т. 24, № 1. – С. 14–24. [Zlobin T.K., Gureev R.G., Zlobina L.M. Glubinnoe stroenie na Yugo-Zapadnoi Kamchatke po dannym metoda ob"emnykh voln zemletryaseniï // *Tikhookeanskaya geologiya.* – 2005. – Т. 24, No. 1. – S. 14–24.]
 - 20 Ammon C.J. Isolation of receiver effects from teleseismic P-waveforms // *Geophysical Journal International.* – 1991. – Vol. 104. – P. 231–246.
 - 21 Vozoff K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // *Geophysics.* – 1991.
 - 22 Simpson F., Bahr K. *Practical Magnetotellurics.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
 - 23 Dobrin M.B., Savit C.H. *Introduction to Geophysical Prospecting.* – 4th ed. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 867 p.
 - 24 Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. *Applied Geophysics.* – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1990. – 770 p.
 - 25 Hinze W.J., von Frese R.R.B., Saad A.H. *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 512 p.
 - 26 Allen M.B., Alsop G.I., Zhemchuzhnikov V.G. Dome and basin refolding and transpressive inversion along the Karatau Fault System, southern Kazakhstan // *Journal of the Geological Society.* – 2001. – Vol. 158. – P. 83–95.
 - 27 Jones A.G., et al. Water in cratonic lithosphere: calibrating laboratory-determined models of electrical conductivity of mantle minerals using geophysical and petrological observations // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* – 2012. – Vol. 13, No. 6.
 - 28 Yang X. Origin of high electrical conductivity in the lower continental crust: a review // *Surveys in Geophysics.* – 2011. – Vol. 32, No. 6. – P. 875–903.