УДК 550.3, 550.34.013.2; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2025-2.02
https://orcid.org/0000-0002-1866-7677
https://orcid.org/0000-0003-1659-503X

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ПРИ РЕГИОНАЛЬНОМ ПРОГНОЗЕ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ В ЮЖНО-УСТЮРТСКОМ РЕГИОНЕ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ





А.Е. АБЕТОВ,
доктор геол.-мин. наук
профессор, академик НАН РК,
член-корреспондент АМР РК,
a.abetov@satbayev.university

Ш.Б. ЕСИРКЕПОВА,
докторант «Кафедры
геофизика и сейсмология»,
зам.нач. ОГИСиБД,
sh_yessirkepova@mail.ru

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

Статья рассматривает технологии регионального прогноза нефтегазоносности с применением цифровых технологий, искусственного интеллекта и инновационных методов полевых съемок, обработки, интерпретации и моделирования на примере Южно-Устюртского региона (ЮУР). Использованы данные аэрогамма-спектрометрии (АГСС), грави- и магнитометрии, геотермии, структурные модели по трем горизонтам и методы машинного обучения.

Применение нейронных сетей и машинного обучения, инверсии и пространственного анализа геолого-геофизических данных повысило точность прогноза и выявило перспективные площади для ГРР. Использованы модули IP Seismic (SOM_Classtering Seis plug-in, IP_Prediction 1D/2D), позволившие обнаружить скрытые закономерности аномалий геофизических потенциальных полей. Инверсия гравимагнитных данных обеспечила построение геоплотностных и геомагнитных моделей на глубинах 100–20 000 м.

Прогноз нефтегазоносности выполнен в два этапа. Первый включал самообучение нейронных сетей, позволившее определить центры кластеров. На втором этапе вычис-

лялись атрибуты потенциальных полей и расстояния точек до центров кластеров, что позволило построить карты стандартных отклонений и выделить наиболее перспективные участки.

Комплексная интеграция геологической информации (структурный, литолого-стратиграфический, геохимический, термобарический и др. факторы), статистической классификации и ИИ позволила оценить нефтегазоносность ЮУР. Минимальными перспективами или бесперспективностью выделяется ЦУСД. В Ассакеауданском прогибе наблюдается рост дифференцированности классов, что повышает его потенциал газонефтеносности. На Шахпахтинской ступени результаты модельных рассчетов и классификации указывают на активные процессы миграции и формирования скоплений углеводородов, что делает её наиболее перспективной для проведения дальнейших ГРР с применением сейсморазведки и глубокого бурения.

Исследования позволили сформировать целостную картину структуры перспективных структур ЮУР, выявить закономерности распределения радиоактивных элементов, аномалий гравитационного, геомагнитного и геотермических полей, повысить точность прогноза газонефтеносности и определить наиболее перспективные области для дальнейших разведочных работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *интерпретация, IP seismic, аэрогаммаспектрометрия, геоплотностная, геомагнитная и геотермическая модели, отражающие горизонты, геопространственный анализ, цифровые технологии, искусственный интеллект.*

ОҢТҮСТІК ҮСТІРТ ӨҢІРІНДЕ МҰНАЙ-ГАЗДЫ АЙМАҚТАРДЫ ГЕОЛОГИЯ-ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕР НЕГІЗІНДЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ КЕШЕНІМЕН БОЛЖАУ

А.Е. АБЕТОВ, геология-минералогия ғылымдарының докторы, профессоры,
ҚР ҰҒА академигі, ҚР ХҚА корреспондент-мүшесі, *a.abetov@satbayev.university*

Ш.Б. ЕСИРКЕПОВА, докторант «Геофизика және сейсмология Кафедрасы»,
ГАЖжМБ баст. орынбасары, *sh_yessirkepova@mail.ru*

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

Мақалада цифрлық технологиялар, жасанды интеллект және іздеу зерттеулерінің, деректерді өңдеу, интерпретациялау және модельдеудің инновациялық әдістерін пайдалана отырып, мұнай-газ перспективаларын аймақтық болжау технологиялары қарастырылады. Зерттеу Оңтүстік Үстірт өңірі (ОҮӨ) мысалында жүргізілді. Аэро-гамма-спектрометрия (АГС), гравиметрия және магнитометрия, геотермиялық зерттеулер, үш горизонт бойынша құрылымдық модельдер және машиналық оқыту әдістері пайдаланылды.

Нейрондық желілер мен машиналық оқыту, инверсия және геологиялық-геофизикалық деректердің кеңістіктік талдауын қолдану болжау дәлдігін арттырып, геологиялық барлауға перспективалы алаңдарды анықтауға мүмкіндік берді. IP Seismic модульдері (SOM_Clustering Seis plug-in, IP_Prediction 1D/2D) геофизикалық потенциалдық өрістердің аномалияларындағы жасырын заңдылықтарды анықтауға көмектесті. Гравимагниттік деректерді инверсиялау 100–20 000 м тереңдікте геоплотностық және геомагниттік модельдерді құруға мүмкіндік берді.

Мұнай-газ перспективасын болжау екі кезеңде жүргізілді. Бірінші кезеңде нейрондық желілерді өзіндік оқыту кластер орталықтарын анықтауға мүмкіндік берді. Екінші кезеңде потенциалдық өріс атрибуттары мен кластер орталықтарына дейінгі қашықтық есептеліп, стандартты ауытқулар карталары құрылды және ең перспективалы учаскелер бөлінді.

Геологиялық ақпаратты (құрылымдық, литолого-стратиграфиялық, геохимиялық, термобарикалық және басқа факторлар), статистикалық жіктеуді және жасанды интеллектті кешенді интеграциялау ОҮӨ-нің мұнай-газдылығын бағалауға мүмкіндік берді. Орталық Үстірт шөгінді ойысы (ОҮШО) төмен немесе перспективасыз деп бағаланды. Ассакеаудан ойысында кластар дифференциациясының артуы байқалды, бұл оның мұнай-газ әлеуетін арттырады. Шахпахты сатысында модельдік есептеулер мен жіктеу нәтижелері көші-қон процестерінің белсенділігін және көмірсутек шоғырларының қалыптасуын көрсетеді, бұл оны сейсмикалық барлау мен терең бұрғылауды қолдана отырып, әрі қарай барлау жұмыстары үшін ең перспективалы етеді.

Зерттеулер ОҮӨ перспективалы құрылымдарының тұтас көрінісін қалыптастыруға, радиоактивті элементтердің таралу заңдылықтарын, гравитациялық, геомагниттік және геотермиялық өрістердің аномалияларын анықтауға, мұнай-газдылықты болжау дәлдігін арттыруға және болашақ барлау жұмыстарына арналған ең перспективалы аймақтарды анықтауға мүмкіндік берді.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *интерпретация, IP seismic, аэро-гамма-спектрометрия, геоплотностық, геомагниттік және геотермиялық модельдер, шағылысу горизонттары, геокеңістіктік талдау, цифрлық технологиялар, жасанды интеллект.*

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN REGIONAL FORECASTING OF OIL AND GAS POTENTIAL IN THE SOUTHERN USTYURT REGION BASED ON INTEGRATED GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA

A.E. ABETOV, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Corresponding member of the Academy of Mineral Recourses of the Republic of Kazakhstan, *a.abetov@satbayev.university*
SH.B. YESSIRKEPOVA, Doctoral student «Department of Geophysics and Seismology», Deputy Head of GISDB, *sh_yessirkepova@mail.ru*

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

The article considers the technologies of regional prediction of oil and gas content using digital technologies, artificial intelligence and innovative methods of field exploration, processing, interpretation and modeling based on the example of the South Ustyurt region (SUR). The study utilizes data from airborne gamma-ray spectrometry survey (AGRSS), gravity and magnetometry, geothermal studies, structural models for three horizons, and machine learning methods.

The application of neural networks, machine learning, inversion, and spatial analysis of geological and geophysical data has improved prediction accuracy and identified prospective areas for geological exploration. The use of IP Seismic modules (SOM_Clustering Seis plug-in, IP_Prediction 1D/2D) allowed for the discovery of hidden patterns in geophysical potential field anomalies. The inversion of gravity and magnetic data enabled the construction of geodensity and geomagnetic models at depths ranging from 100 to 20,000 meters.

The hydrocarbon potential forecast was carried out in two stages. The first stage involved self-training of neural networks, which identified cluster centers. In the second stage, potential field attributes and distances from data points to cluster centers were calculated, allowing for the construction of standard deviation maps and the identification of the most promising areas.

Comprehensive integration of geological data (structural, lithostratigraphic, geochemical, thermobaric, and other factors), statistical classification, and AI made it possible to assess the hydrocarbon potential of the SUR. The Central Ustyurt Dislocation System (CUDS) was identified as

having minimal or no prospectivity. In the Assakeaudan Depression, an increase in class differentiation was observed, enhancing its gas and oil potential. On the Shakhpakhty Step, model calculations and classification results indicate active migration processes and hydrocarbon accumulation, making it the most promising area for further exploration using seismic surveys and deep drilling.

The study provided a comprehensive picture of the structure of the promising formations within the SUR, revealed patterns in the distribution of radioactive elements, and anomalies in gravitational, geomagnetic, and geothermal fields. It also improved the accuracy of hydrocarbon prospecting forecasts and identified the most promising areas for further exploration.

KEYWORDS: *interpretation, IP seismic, airborne gamma-ray spectrometry, geodensity, geomagnetic and geothermal models, reflective horizons, geospatial analysis, digital technologies, artificial intelligence.*

Введение. В последнее десятилетия в энергетической отрасли Республики Казахстан обозначился тренд истощения ряда эксплуатируемых месторождений углеводородов (УВ). Поэтому восполнение минерально-сырьевой базы страны является стратегически важной задачей, закреплённой в государственных программных документах, таких как «Программа развития геологоразведочных работ на 2021–2025 гг.» и др.

В этих программных документах восполнение и расширение базы минерально-сырьевых ресурсов планируется реализовать по двум направлениям геологоразведочных работ: 1. Дополнительное изучение уже разведанных месторождений с целью уточнения их геологической структуры и характеристик продуктивных пластов. 2. Поиск и разведка новых месторождений нефти и газа.

Первое направление, несмотря на большое разнообразие информационно-геологических ситуаций, сводится к уточнению структурно-формационных и фильтрационно-емкостных характеристик продуктивных коллекторов на уже разведанных и эксплуатируемых месторождениях УВ. Оценивая это направление как безусловно перспективное, все же следует признать практически исчерпанными возможности восполнения, увеличения либо поддержания конкурентоспособной минерально-сырьевой базы Республики Казахстан.

Хотя этот подход остается перспективным, необходимо признать, что потенциал восполнения, расширения и поддержания конкурентоспособной минерально-сырьевой базы Республики Казахстан практически исчерпан.

Основная роль в стабилизации и последующем наращивание этой базы принадлежит второму направлению геологоразведочных работ – поискам и разведке новых месторождений нефти и газа. Среди первоочередных задач предстоит решить следующие:

– внедрение цифровых технологий, искусственного интеллекта и машинного обучения;

– разработка новых концепций нефтегазообразования и совершенствование научно – методологического и аппаратурно-методического обеспечения геологоразведочных работ;

– использование инновационных методов поисковово-разведочных работ, получение новой информации о недрах, позволяющей решать задачи прогноза скоплений УВ;

– совершенствование проектного управления на основе международных стандартов.

Реализация программных документов по второму направлению ГРР представляется целесообразной и обоснованной, начиная с применения экономически эффективных региональных методов на обширных территориях с выделением перспективных площадей, на которых впоследствии будет целесообразно сосредоточить детальные и затратные геолого-геофизические исследования.

Выбор методов поисков и разведки месторождений УВ определяется спецификой их геологического строения, степенью изученности и поставленными задачами. Особое значение при этом имеет выбор рационального комплекса геологоразведочных работ, который базируется на анализе и опыте ранее проведенных исследований, учитывает современные достижения геологической науки и техники, а также обеспечивает получение достоверной геологической информации при минимизации затрат.

При планировании региональных геологоразведочных работ ключевая роль отводится развитию дистанционных геофизических методов, создающих основу для последующего проведения трудоемких и дорогостоящих сейсморазведочных исследований, и поисково-разведочного бурения с целью локализации скоплений углеводородов.

Дистанционные геофизические методы характеризуются относительно низкой стоимостью и способностью охватывать большие территории. К их числу относятся аэрогамма-спектрометрическая (АГСС) и геотермическая съемки, грави- и магниторазведка. В проведенных исследованиях для Южно-Устюртского Региона (ЮУР) нами была выполнена комплексная интерпретацию и моделирование полученных данных этих методов в единой вычислительной среде с применением инновационного программного обеспечения ПО IP Seismic.

Краткий геологический очерк

ЮУР расположен на юго-востоке Южно-Мангышлакского осадочного бассейна в составе одноименной нефтегазоносной области (НГО) в пределах Туранской эпигерцинской платформы [4].

В тектоническом плане данный бассейн представляет собой крупную мезозойскую внутриплатформенную зону прогибания, известную как **Южно-Мангышлакско-Ассакеауданская система прогибов**.

На севере она ограничена Мангышлак-Центрально-Устюртской системой дислокаций, а на юге — северными склонами Карабогазского свода и Туаркырской зоной поднятий (рис.1). На западе – открывается в сторону Каспийского моря.

Осевая зона Южно-Мангышлакской – Ассакеауданской системы прогибов характеризуется наличием линейно вытянутой цепочки «ваннообразных» впадин и мульд, разделенных структурными седловинами. Эти впадины и мульды имеют различные размеры и чаще всего субизометричную форму [4].

Вдоль оси данной системы, в направлении с запада на восток, выделяются крупные структуры – Жазгурлинский и Ассакеауданский прогибы, а также Учкудукская мульда. В их пределах отмечены подчиненные мульды и локальные поднятия (*рис. 1*).

Характерной особенностью тектоники Южно-Мангышлак-Ассакеауданской системы прогибов, является ступенчатое погружение разновозрастных пород

от бортов зоны к ее осевой части. На северном борту эти ступени расположены параллельно или кулисообразно друг к другу и с подчиненным общему простиранию Мангышлакско-Центрально- Устюртской системы дислокаций (*рис.1*).

К ступеням приурочены цепочки локальных антиклинальных поднятий, служащих ловушками нефти и газа и характеризующихся асимметричным строением, с крутым южным и более пологим северным крыльями и слабой нарушенностью дизъюнктивами [4].

В геологическом разрезе региона исследований можно выделить три главных структурно-формационных этажа:

- платформенный чехол юрско-кайнозойского возраста;

- переходный комплекс (промежуточный структурный этаж), характеризующийся более интенсивной, в основном, блоковой дислоцированностью и включающий два подкомплекса - пермо-триасовый (терригенно-карбонатный) и доверхнепермский с суммарной мощностью 3500-6000 м.

- складчатый фундамент, образованный жёсткими массивами и палеозойскими складчатыми системами.

Наиболее древние отложения, представленные мощными толщами пород верхней перми и триаса, обнажаются в районах Горного Мангышлака. Эти породы сильно дислоцированы и частично метаморфизованы (*рис. 2*).

В центральной, наиболее погруженной части Южно-Мангышлакской—Ассакеауданской системы прогибов данные отложения залегают на глубинах более 4 км, при этом они слабо деформированы и сохраняют субгоризонтальное положение [4].

Выше, с резким угловым несогласием, эти породы перекрываются мощной толщей юрских отложений, представленных всеми тремя отделами. На юрских породах, с размывом и угловым несогласием, залегают отложения меловой системы, размытая поверхность которых перекрыта палеогеновыми осадками (*рис. 2*).

Непосредственно на палеогеновые, а в некоторых случаях и на более древние отложения также с размывом и угловым несогласием ложатся породы неогена, венчающие разрез осадочного чехла.

В целом, мезозой-кайнозойские отложения преимущественно представлены терригенными породами, за исключением верхнетуронско-датской карбонатной толщи, а также прослоев известняков-ракушечников в песчано-глинистых отложениях неогена (*рис. 2*).

С точки зрения геологического строения, Южно-Мангышлакская – Ассакеауданская система прогибов представляет собой типичный мезозой-кайнозойский бассейн [6, 7]. Его осадочный чехол включает слабодислоцированную юрско-неогеновую часть, характерную для платформенных областей, и более деформированную доюрскую секцию разреза.

Южно-Мангышлакской НГО промышленная нефтегазоносность установлена в отложениях триаса, юры и мела. Основной продуктивной толщей региона являются среднеюрские терригенные породы, содержащие основную часть разведанных запасов нефти и газа.

В этом комплексе выявлены газонефтяные, нефтяные и газовые месторождения. Нефтегазоносные горизонты с небольшими залежами углеводородов также зафиксированы в отложениях нижней и верхней юры. Промышленная нефтегазо-

носность триасовых отложений подтверждена на месторождениях Северо-Ракушечное и Южно-Жетыбайское. В меловых отложениях установлены газовые залежи на Узеньском и Кансуйском месторождениях, а нефтяные – на Дунга, Жозаскан, Спемесай и других месторождениях.

Продуктивные коллектора разведанных месторождений Южно-Мангышлакской нефтегазоносной области преимущественно представлены терригенными породами, такими как песчаники, глинистые песчаники и алевролиты.

Меловые нефтегазоносные горизонты обладают эффективными мощностями в пределах от нескольких метров до 25 м, при этом дебиты скважин невысоки и не превышают 25 тыс. м³/сут. В юрских продуктивных горизонтах эффективные мощности достигают 65 м, а дебиты газовых скважин могут достигать 800 тыс. м³/сут [4].

Южно-Устюртский потенциально газоносный район расположен между Кансуйским газоносным районом на западе и Шахпахтинским на востоке [8, 9]. Комплекс геолого-геофизических факторов, включая структурно-тектонические, литофациальные и геохимические характеристики, а также наличие прямых признаков углеводородного насыщения в соседних газоносных районах, свидетельствует о высокой вероятности открытия в данном регионе залежей газа и газоконденсата.

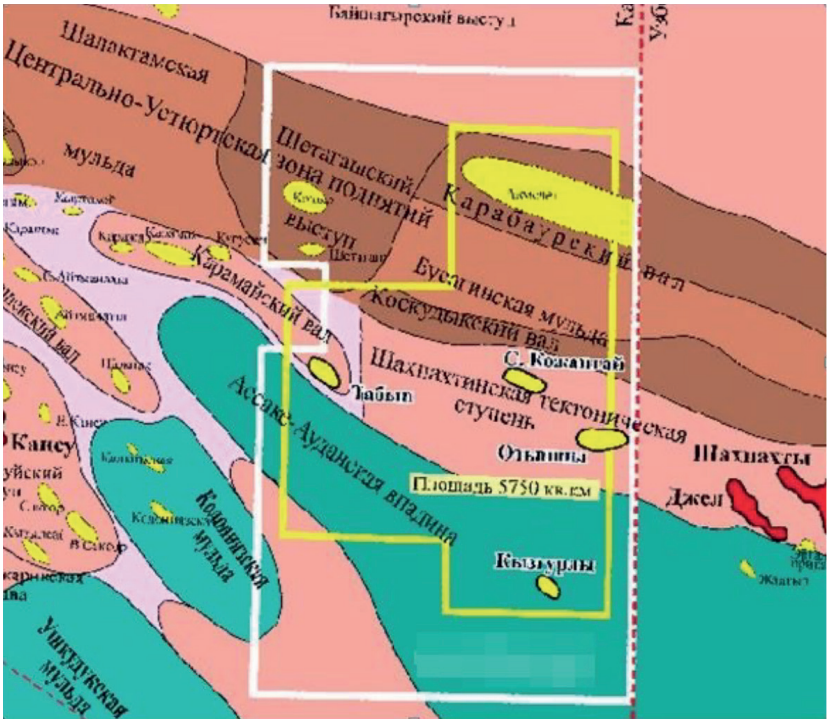


Рисунок 1 – **Схема тектонических элементов региона исследований**

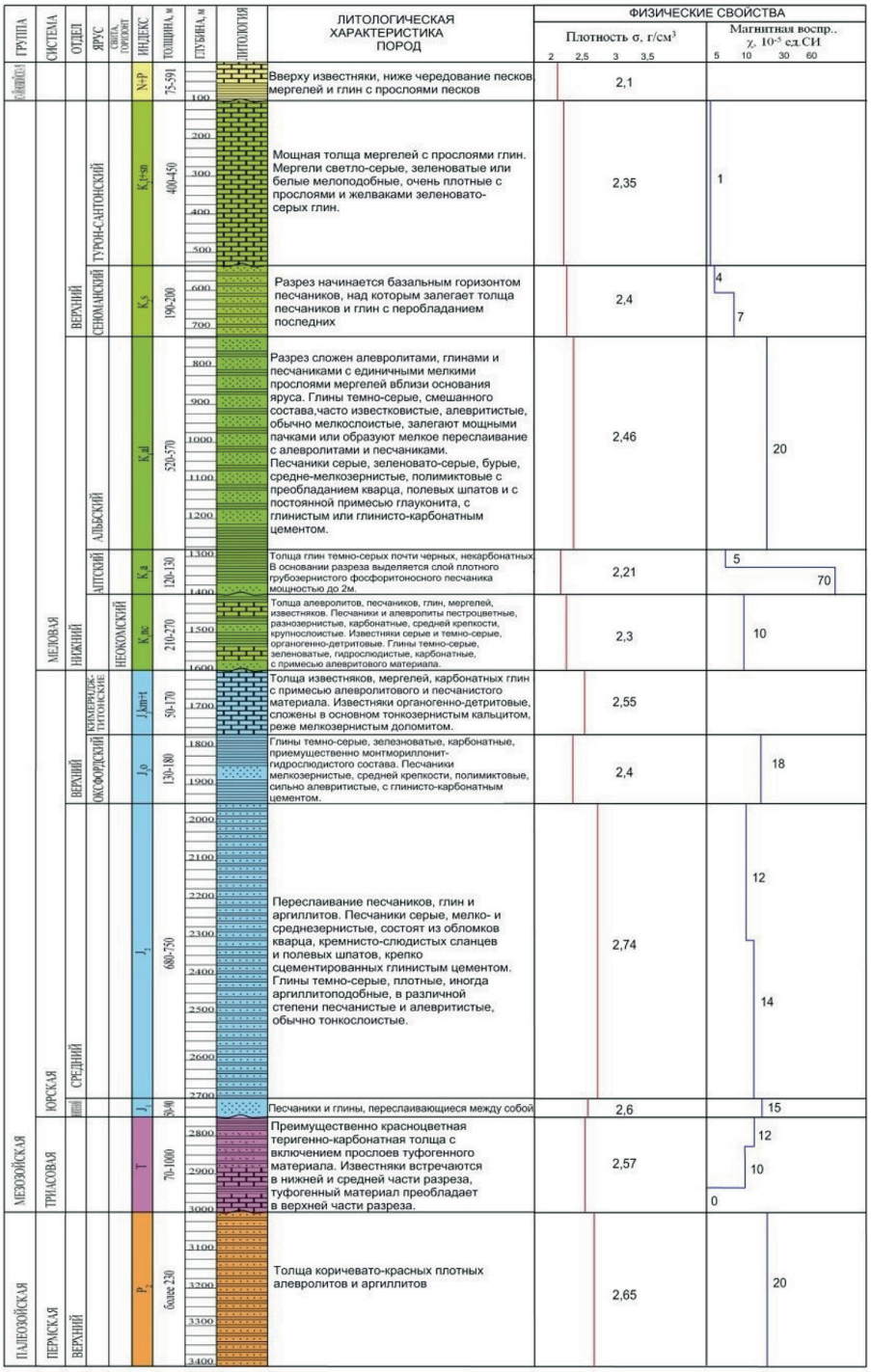


Рисунок 2 – **Сводный литолого-стратиграфический разрез Южного Устюрта**

Геолого-геофизическая изученность

Сейсморазведка и бурение. В 2019 г. ТОО «Тат-Арка» провело сейсморазведку МОГТ-2Д в ЮУР, охватив ЦУСД, Шахпахтинскую ступень и северный борт Ассакеауданского грабена для изучения геологического строения и выделения перспективных нефтегазоносных объектов в юрско-меловых, триасовых и палеозойских отложениях. Обработка данных проводилась в ТОО «PGS Kazakhstan» с использованием ПО «Spark (PGS)», «HoloSeis», «GeoGraphix Discovery», «DUG Insight» и «Petrel». Получены мигрированные разрезы во временном домене (1200 пог.км).

Интерпретация профилей совместно с архивными данными МОГТ (1984-1991 гг., 2000 пог.км) и ГИС 12 скважин позволила составить изохронные и структурные карты по 10 отражающим горизонтам (I, II, III, IV, IVbt, V, TV1, TV2, TV3, “b”), выявить 7 перспективных структур (Кызгурлы, Самтыр Южная, Самтыр Западная, Табын Южная, Кожантай Западная, Отынши, Кызгурлы Южная) и AVO-аномалии на трех площадях (Кызгурлы, Кожантай Западный, Кызгурлы Южная), вероятно, связанные с наличием газа.

Поисковое бурение охватило 7 структур (Биринжик, Биринжик Южный, Кожантай, Утежан, Самтыр, Мухтар, Коскудык), вскрыв юрские, меловые и доюрские отложения 15 скважинами. Проведен стандартный комплекс каротажа, включая нейтронный гамма-каротаж, но аномалий, свидетельствующих о газонасыщенности, не зафиксировано. Возможные причины: кальматирование пластов тяжелым буровым раствором (проникновение 2-16 диаметров ствола), неоптимальные условия заложения скважин, недостаточный учет строения нефтегазоносной системы, что ставит под сомнение бесперспективность структур.

Гравиразведка. С 1954 г. в ЮУР проводятся гравиметрические съемки (1:200 000 – 1:50 000). Исследования позволили уточнить строение доюрского комплекса, составить карты кровли пермо-триасового и доверхнепермского комплексов. Последний многими исследователями отождествлялся с кровлей фундамента (Лапшов В.А., 1963). Гравиразведка выявила локальные аномалии, связанные с нефтегазоперспективными структурами в пермо-триасовых и более древних отложениях.

Магниторазведка. Магниторазведка проводится с конца 50-х гг. для изучения регионального строения фундамента. В 1954 г. аэромагнитная съемка масштаба 1:200 000 позволила картировать поверхность кристаллического фундамента и провести структурно-тектоническое районирование. В 1974-76 гг. КазАГГЭ выполнила аэромагнитную съемку (1:50 000), результаты которой использовались для прогноза перспективных участков. Однако связь магнитного поля с осадочным чехлом не установлена из-за слабой магнитной восприимчивости пород. Наземные магниторазведочные съемки подтвердили отсутствие четкой связи магнитного поля со структурами осадочного чехла. Данные использовались при районировании региона по поверхности фундамента.

Инфракрасная съемка. В 2009 г. в ЮУР выполнена ИК-съемка для прогноза нефтегазоперспективных площадей. Съемка проводилась в предутренние часы летом в безоблачное время, исключая влияние солнечного нагрева и влажности почвы. Метод позволил выявить тепловые аномалии, связанные с разгрузкой внутреннего тепла через трещиноватые зоны. Выбрано 7 спектральных каналов (9.58 – 14.385

мкм), обеспечивающих точную регистрацию теплового излучения геологических объектов.

Аэрогаммаспектрометрия. АГСС в ЮУР проведена впервые. Ранее аналогичные исследования выполнялись на Северо-Бозашинском поднятии (1981-1983 гг.) организацией НПО «Нефтегеофизика» (Гауэр З.Е., Цытович Б.Л.). По итогам районирования регионального гамма-поля выделены зоны для детализационных работ. В 1982-1984 гг. на западе Южно-Мангышлакского прогиба проведена АГСС (1:25 000, 4000 кв.км), но положительных результатов по поиску УВ не получено.

Материалы и методы исследования. Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных и региональный прогноз нефтегазоносности ЮУР выполнен в инверсионно-прогнозном пакете программ IP Seismic (ООО «Лаборатория Приезжева», https://ivanplab.ru/).

При этом для глубокой качественной и количественной интерпретации разномасштабных данных авторами статьи были использованы данные бурения, сейсморазведки, грави- и магниторазведки, АГСС и геотермии с применением инновационных алгоритмов машинного обучения.

Для классификации карт геофизических потенциальных полей в скользящем окне был использован **модуль SOM_Classtering Seis plug-in, разработанный** на основе алгоритма Kohonen.

Самоорганизующаяся карта Кохонена (Self-Organizing Map, SOM) 1D, 2D или 3D, представляет собой метод компьютерного моделирования, предназначенный прежде всего для кластеризации, визуализации и анализа данных, полученных из многомерных данных.

Основная цель применения SOM заключается в выявлении скрытых закономерностей в данных путем снижения размерности исходного пространства. На практике часто используется двумерное пространство из-за его удобства для визуализации, при этом топология исходного пространства сохраняется.

В результате машинного обучения модели формируется сетка, состоящая из обученных нейронов, которая называется "картой" исходного пространства.

Модуль IP_Prediction 2D версии 2019.1.0.1, применяется для профильного моделирования распределения параметров геофизических потенциальных полей на базе структурных карт по поверхностям основных границ раздела осадочного чехла и точек пластопересечения скважин с этими поверхностями и с использованием различных алгоритмов машинного обучения [13, 14].

Для улучшения корреляции комплексных данных использована инверсионная технология расчета объема контраста геофизических параметров в окрестностях целевого слоя.

В ПО IP Seismic процедура прогноза выполнена в два этапа:

Тренинг – этап самообучения нейронных сетей для определения центров кластеров (скопление точек – объектов классификации в многомерном пространстве признаков) с использованием парных входных данных: атрибут типа потенциальных геофизических полей и набор значений карт в скользящих окнах, используемых для прогноза. В течении этой стадии вычисляются оптимальные коэффициенты нейронных сетей с минимизацией объектной функции.

Вычисление – этап вычислений атрибута потенциальных геофизических полей по набору заданных карт, при котором определяется расстояние текущих точек (объектов) до центров ближайших кластеров с присвоением им номера этих кластеров.

На выходе получают величины стандартного отклонения карт P10, P50, P90 (пессимистичный, вероятный и оптимистичный прогнозы).

Основные преимущества использования нелинейного оператора, основанного на нейронной сети включают: 1. Моделирование сложных нелинейных взаимосвязей между различными типами данных, что способствует более точному анализу и предсказанию. 2. Автоматическую адаптацию модели к разнообразным типам входных данных и условиям, что повышает ее эффективность. 3. Автоматическую настройку параметров модели, которая помогает достигать оптимальных результатов в задачах инверсии и прогнозирования.

Таким образом, комбинация нелинейного оператора на основе нейронной сети и эволюционного алгоритма обеспечила эффективный инструмент для анализа одновременно несколько переменных, интерпретации сложных геологических систем и оптимизации прогнозирования.

При вычислениях были использованы атрибуты Surface и Optional points. Атрибут Surface выбирает поверхность с атрибутами для классификации, размер скользящего окна и количество классов. Атрибут Optional points определяет точки, которые будут использоваться для нахождения схожих мест по используемым признакам на карте.

Кроме того, изучение гравитационных и магнитных полей выполнено в модуле **GraviMag Modeling Inversion** интегрированного в ПО IP Seismic и предназначенного для решения задач инверсии данных грави-и магниторазведки исследований, совмещая их с данными сейсморазведки. Были построены геоплотностные и геомагнитные модели в интервале глубин от 100 до 20 000 метров. Исходными данными для моделирования стали цифровая модель аномалий поля силы тяжести в редукции Буге, а также цифровая модель аномалий магнитного поля.

Применение модуля **GraviMag Modeling Inversion** позволило: 1. Провести моделирование и интерпретацию гравимагнитных данных. 2. Построить математические модели для расчета гравитационного и магнитного полей на основе заданных геологических структур. 3. Осуществить инверсию на основе наблюденных данных, что способствует повышению точности при определении глубины залегания, форма и состава грави- и магнитовозмущающих объектов.

Результаты и обсуждение. ***Классификация данных по аэрогаммаспектрометрия.*** При поисках и разведке скоплений нефти и газа высокую вероятность успеха связывают с обнаружением микропросачивания углеводородов, наличие которого, интерпретируется как прямой признак нефтегазоносности объектов работ.

Согласно публикациям [1, 3, 12] ожидается, что над нефтегазосодержащими структурами фоновый и случайный характер гамма-излучения меняется на упорядоченное низкое излучение, оконтуренное ореолом несколько повышенной гамма-активности, создавая прямой признак потенциально продуктивной структуры.

Учитывая данный критерий, в программном обеспечении **Arc GIS (Model Builder)** нами были решены задачи по объединению технологии геоинформационных систем (ГИС) с инструментами статистического и пространственного анализа в

инверсионно-прогнозном пакете программ IP Seismic (**модуль SOM_Classtering Seis plug-in)**, что позволило исследовать корреляционные связи между наборами данных АГСС, выявить скрытые закономерности при кластеризации данных, визуализировать в 1D и 2D полученные результаты, провести их анализ и принять решения.

При этом были использованы космоснимки с шагом 25х25 м, а также топографические карты для учета геоморфологии, ландшафтных и почвенных условий ЮУР, поскольку они играют существенную роль в распределении концентраций радиоэлементов на поверхности земли.

На входе использованы цифровые модели по содержаниям радиоактивного калия, тория и урана, на выходе получена самоорганизующаяся карта (построенная с применением нейронных сетей), отображающая изменение гамма-активности, которая существенно дополнил традиционный комплекс геолого-геофизических данных.

На первом этапе работ данные АГСС были проинтерпретированными по методу нормализации тория в программном обеспечении COSCAD, принцип работы и функционал которого представлен в работе [7,11].

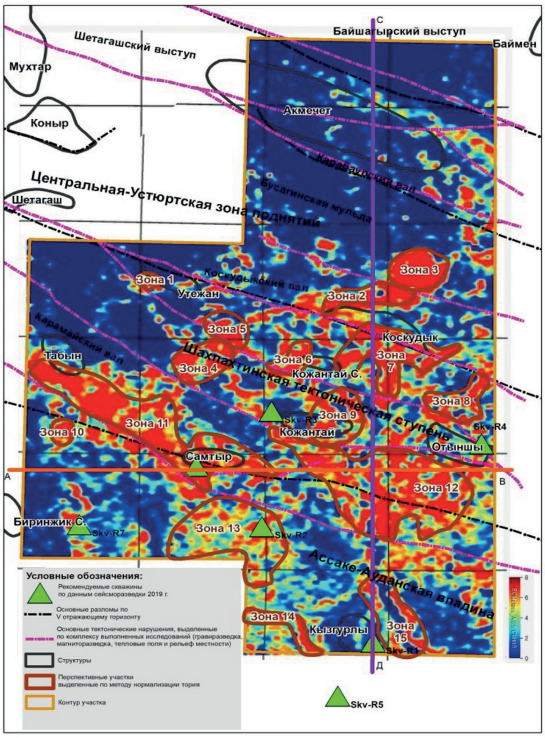


Рисунок 3 – **Распределение классов по содержанию радиоактивных элементов в ЮУР, рассчитанных в модуле SOM_Classtering по данным аэрогаммаспектрометрии**

Далее, в Model Builder были загружены цифровые данные по площадным содержаниям калия, урана и тория. Из цифровых моделей были экспортированы значение каждой ячейки через 500 метров по каждому виду радиоактивных элементов в виде точечных объектов.

Проведенные расчеты позволили провести ранжирование классов с выделением на карте ЮУР 8 районов по концентрации радиоактивных элементов однородных по статистическим параметрам и отличающиеся друг от друга по совокупности исходного поля содержания радиоактивного калия, урана и тория (*рис. 3*).

Таблица 1 – **Ранжирование классов по содержанию калия, урана, тория (с привлечением алгоритма А.В. Петровского (2019 г.)**

класс	цвет	Калий			Уран			Торий		
		среднее	дисперсия	стандарт	среднее	дисперсия	стандарт	среднее	дисперсия	стандарт
1		0.78	0.0527	0.0680	1.84	0.15039	0.0816	2.26	0.152	0.0673
2		0.82	0.0290	0.0354	2.08	0.0711	0.0342	2.35	0.0963	0.0410
3		0.84	0.0299	0.0357	2.30	0.0603	0.0262	2.35	0.0968	0.0411
4		0.88	0.0235	0.0266	2.08	0.0813	0.0391	2.60	0.0732	0.0282
5		0.90	0.0242	0.0267	2.30	0.0634	0.0276	2.61	0.0739	0.0284
6		0.96	0.0493	0.0516	2.61	0.0973	0.0373	2.71	0.1983	0.0733
7		0.96	0.0258	0.0270	2.12	0.0664	0.0313	2.86	0.0830	0.0291
8		1.03	0.0199	0.0193	2.28	0.0552	0.0242	3.09	0.0668	0.0216

Важно отметить, что в геологических структурах ЮУР вдоль крупных разломов наблюдается резкая смена этих классов, что идентифицирует блоковую неоднородность фациального состава пород и разный характер их насыщения радиоактивными элементами по контактам этих разломов.

ЦУСД (в составе Карабаурского вала, Бусагинской мульды, структуры Акмечет и др.) характеризуется преимущественным развитием 1 (57%) и 2 (33%) классов (*табл.1*), что в сумме достигает 90% ее территории и указывает на практически однородный и фоновый характер насыщения этой структуры радиоактивными элементами. Совместно с интенсивной дислоцированностью образований палеозоя и пермо-триаса, результаты классификаций по содержанию радиоактивного калия, урана и тория свидетельствуют о бесперспективности структур ЦУСД в отношении перспектив газонефтеносности.

В Ассакеауданском прогибе согласно проведенным расчетам превалируют 5 (32%) и 6 (44%) классы (*табл.2*), что указывает на рост дифференцированности по классам с минимальной концентрацией радиоактивного калия, урана и тория. В соответствие с данными показателями и с учетом структурного, лито-фациального и геохимического факторов можно прогнозировать увеличение перспектив нефтегазоносности Ассакеауданского прогиба.

На Шахпахтинской ступени зафиксированы экстремально высокие 6-7 классы (35%) и 8 класс (47%), что в сумме составляет 81% площади данной ступени (*табл.2*). Причем максимальный класс выделяется на перспективных локальных структурах Кожантай, Отыншы, Коскудук, Самтыр и др.

Увеличенная дифференцированность Шахпахтинской ступени по классам однозначно свидетельствует о широком развитии площадей от минимальной до максимальной концентраций радиоактивного калия, урана и тория. В целом, ситуация с ранжированием классов по радиоактивным элементам с учетом развития глубинных разломов и структурно-формационного состава отложений осадочного чехла и промежуточного структурного этажа указывает на присутствие активных процессов микропросачивания, миграции и насыщение УВ перспективных локальных структур Шахпахтинской ступени.

Таким образом, интеграция данных АГСС с методами пространственного анализа и статистической классификации, позволила выявить закономерности распределения радиоактивных элементов (калия, урана и тория) и их связь с потенциально продуктивными структурами, как результат активных процессов миграции углеводородов.

В большей степени эти процессы указывают на перспективность зон нефтегазонакопления в Шахпахтинской ступени и в меньшей степени – в Ассакеауданском прогибе.

Ранжирование данных по грави- и магнитометрии. Интеграция программного обеспечении Arc GIS (Model Builder) [11] и инверсионно-прогнозного пакета программ IP Seismic (модуль SOM_Classtering Seis plug-in) позволило исследовать корреляционные связи между наборами данных грави- и магнитомерии, их ранжировать, а полученные результаты визуализировать в 1D и 2D, провести их анализ и наметить связи с региональной насыщенностью УВ осадочного чехла и промежуточного структурного этажа.

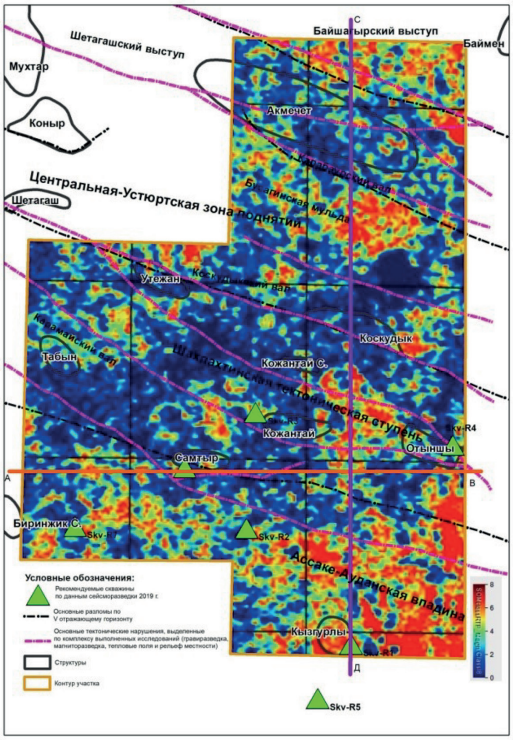


Рисунок 4 – **Распределение классов по магнитной восприимчивости в ЮУР, рассчитанных в модуле SOM_Classtering**

По вертикальному градиенту аномального гравитационного поля ЦУСД отличается высоким уровнем неоднородности (7-8 классы). Суммарно эти классы распространяются на 69% территорий этой системы дислокаций (*рис. 4*).

Распределение вертикального градиента магнитного поля здесь также показывает высокие значения классов (6-7 классы), которые фиксируются на 67 % территории ЦУСД (*таблица 2*).

Таблица 2 – **Расчетные значения классов в IP_Prediction 2D по видам геофизических съемок (в скобках занимаемая площадь в %)**

Виды геофизических исследовний	Аэрогамма спектрометрия	Гравиметрия	Магнитометрия	Геотермия	Структурные модели
Ассакеауданский прогиб	5 класс (32%) 6 класс (44%)	1-2 классы (75%)	2 класс (34%)	5 класс (32%)	4-5 классы (25%)
Шахпахтинская ступень	6-7 классы (35%) 8 класс (47%)	2 -3 классы (82%)	3-4 классы (47%)	6-7 классы (52%)	5-6 классы – (34%)
Центрально-Устрютская система дислокаций	1 класс (57%) 2 класс (33%)	7 класс (44%) 8 класс (25%)	6-7 классы (67%)	7 класс (25%)	7-8 классы 7-8 классы – (62%)

Совместно эти критерии характеризуют увеличенную анизотропию разреза по плотностным и геомагнитным неоднородностям и указывают на повышенную насыщенность разреза грави-и магнитовозмущающими объектами.

Таким образом, можно говорить, что результаты кластерного анализа и ранжирования аномалий гравитационного и магнитного полей, а также высокая дислоцированность и деформация горных пород свидетельствуют о низкой- или бесперспективности ЦУСД в отношении нефтегазоносности. Данный вывод дополнительно подтверждается особенностями пространственного распределения концентраций радиоактивного калия, урана и тория, т.е. минимумом площадей с низкими значениями содержании радиоактивного калия, урана и тория.

На локальных структурах Шахпатинской ступени установлены по вертикальному градиенту гравитационного поля 2 и 3 классы (82%), а по вертикальному градиенту магнитного поля 3 и 4 классы (47%) (*таблица 2*). С учетом ранжирования классов по распределению радиоактивных элементов, данный индикативный показатель свидетельствует о увеличенных перспективах насыщения УВ осадочного чехла и ПСЭ

И, наконец, в Ассакеауданском прогибе выявлены минимальные значения вертикального градиента гравитационного поля (1 и 2 классы на 75% территории), а по вертикальному градиенту магнитного поля 2 класс (34%), что, по-видимому, можно объяснить ортоплатформенным обликом осадочного чехла увеличенной мощности. В дополнение к этому, невысокие показания классов по распределению радиоактивных элементов могут свидетельствовать о хороших изолирующих свойствах резервуаров УВ и отсутствии эффектов микропросачивания.

Таким образом, величина классов по вертикальным градиентам гравитационных и магнитных полей, равно как и значения этих градиентов, а, следовательно, и дифференцированность по плотностным и магнитным характеристикам разрезов ЮУР последовательно снижаются с юга на север, от ЦУСД к Ассакеауданскому прогибу.

Подобная картина свидетельствует, что магнито- и гравивозмущающие объекты хорошо дифференцированы в ЦУСД и не так контрастно проявляют себя по осадочному чехлу в Шахпахтинской ступени и относительно слабо отображаются в Ассакеауданском прогибе [2,3].

В свою очередь выявленный геологический феномен иллюстрирует последовательный переход от горно-складчатой области к типично осадочному чехлу с

уменьшением степени дислоцированности пород и структурных контрастов, что указывает на прямую корреляционную связь с тектоникой ЮУР.

Вместе с тем, между результатами классификации данных АГСС, грави-и магнитометрии выявлена обратная корреляционная связь – высоким классам по распределению вертикальных градиентов гравитационного и магнитного полей соответствуют минимальные классы по распределению радиоактивных элементов, и наоборот, что можно воспринимать как индикативный критерий или фактор прогноза углеводородонасыщения отложений осадочного чехла и ПСЭ.

Ранжирование данных по инфракрасной съемке. Применение нейронных сетей с последующей кластеризацией данных по инфракрасной съемке позволило получить набор данных, используемых для прогноза газонефтеносности объектов ЮУР. В модуле SOM_Classtering были произведены расчеты 1D и 2D классификаций по локальной составляющей теплового поля, которые существенно дополнили традиционный информационный комплекс геолого-геофизических данных.

При выполнении ранжирования по классам были учтены результаты работ Петровского А.В. COSCAD (2019 г.).

По ЦУСД были получены вариабельные результаты. Удалось ранжировать только 25% ее территорий с 7 классом (*рис. 5*), что подтверждает активный эндогенный режим, флуктуации жестких термо-барических условий и интенсивные тектонические подвижки.

Наблюдаемые здесь увеличенные плотность и намагниченность горных пород часто связаны с кристаллическими и метаморфическими породами, неблагоприятными для генерации и накопления углеводородов.

В Ассакеауданском прогибе удалось идентифицировать 32% территорий с 5 классом, тогда как на Шахпахтинской ступени – 52% территорий с 6 и 7 классами (*таблица 2*).

Наблюдаются прямые корреляционные связи между результатами кластеризации геотермических и радиоактивных аномалий для Шахпахтинской ступени и Ассакеауданского прогиба и обратные корреляционные связи для Центрально-Устюртской системы дислокаций.

Соответственно для Шахпахтинской ступени и Ассакеауданского прогиба между геотермическими аномалиями с одной стороны и гравитационными и магнитными аномалиями с другой стороны выявлены обратные корреляционные связи, тогда как для ЦУСД эти связи приобретают характер прямой зависимости.

К этому следует добавить, что на Шахпахтинской ступени зафиксированы повышенные геотермические аномалии на отдельных локальных структурах, которые далее транслируются на узбекскую часть этой ступени, где в юрских отложениях разведаны газовые месторождения Шахпахты и Джел.

Ранжирование данных по структурным моделям. На основе искусственного интеллекта в ЮУР проведено ранжирование структурных моделей по классам, выявлены корреляционные связи с наборами данных грави- и магнитометрии, геотермии, распределением радиоактивных элементов на дневной поверхности, а полученные результаты визуализировать в 1D и 2D, провести их анализ и наметить связи с нефтегазоперспективными площадями и структурами.

В процессе расчетов и моделировании базовым каналом информации стали оцифрованные нами в программном обеспечении (ПО) Surfer и ArcGIS [5] структур-

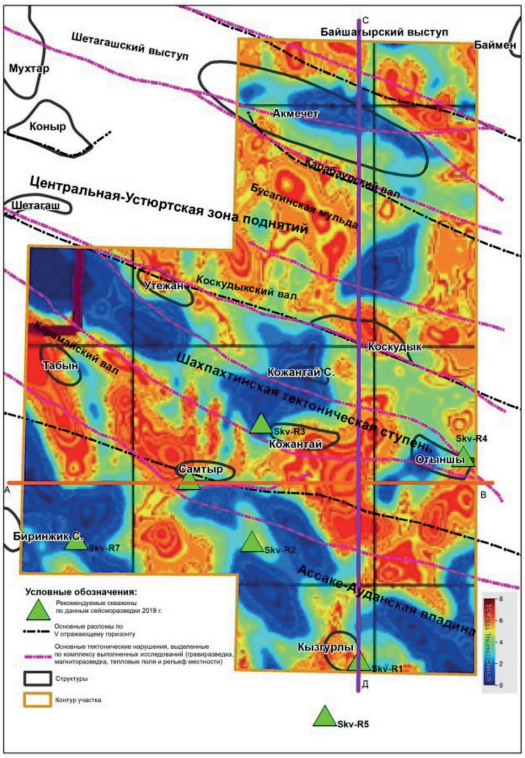


Рисунок 5 – **Распределение классов по тепловому потоку в ЮУР, рассчитанных в модуле SOM_Classtering**

ные карты по отражающим горизонтам III (граница нижнего мела и кровля верхней юры), V (подошва юры – кровля перми или триаса) и «б» (подошва верхней перми и кровля верхнепалеозойских карбонатно-терригенных отложений).

Исходными данными послужили структурные построения Ибрагимова А.А. и др. 2019, а также Акчулакова А. и др. (2011) [10], Ю.Н.Година, Б.Б.Таль-Вирского (1969 г.) [15].

В модуль SOM_Classtering 2D были загружены структурные карты по отражающим горизонтам III, V и горизонту «б» (*рис. 6*).

На выходе в результате анализа ранжирования элементов структурного плана по отражающим горизонтам с применением искусственного интеллекта можно отметить, что ЦУСД обособляется максимальными классами (7 и 8), которые охватывают 62% ее территории и свидетельствует о высокой степени структурной дифференциации этого тектонического элемента (*таблица 2*). Полученные данные подтверждают концепт о дислоцированности горных пород ЦУСД с высокой степенью метаморфизма, насыщенностью их интрузивными и эффузивными образованиями, не способствующих формированию.

Совместно с характером распределения радиоактивных элементов на дневной поверхности в ЦУСД эти критерии не допускают присутствие здесь сколь-нибудь существенных скоплений УВ.

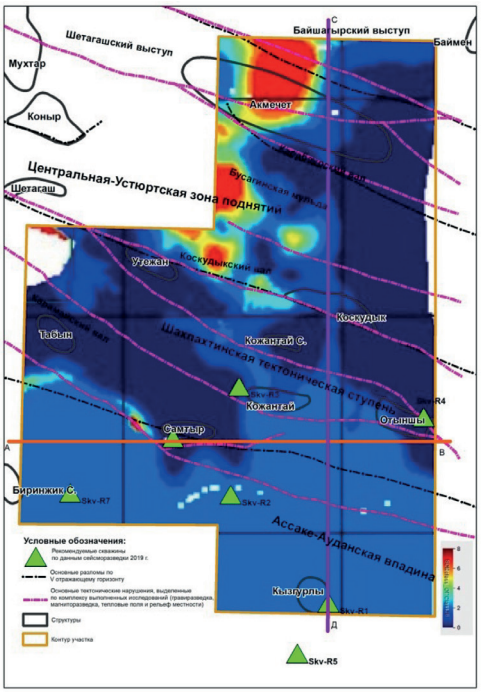


Рисунок 6 – **Распределение классов по отражающим горизонтам (III, V и «б»), рассчитанных в модуле SOM_Classtering**

На Шахпахтинской ступени по сейсмическим данным выявлено снижение классов (до 5-6), занимающие до 34% площади этой ступени (*таблица 2*), что указывает на уменьшения степени дислоцированности горных пород с одной стороны и контрастную выразительность структурного плана отражающих горизонтов- с другой.

Привлекая сведения по литолого-формационному, геохимическому, фациально-палеогеографическому, термо-баро́ическому и иным факторам можно прогнозировать благоприятные условия для формирования скоплений УВ в осадочном чехле и промежуточном структурном этаже.

Ассакеауданский прогиб демонстрирует наименьшее значение классов (4-5), которые идентифицируются на 25% его территории, что указывает на минимальное количество структур по шкале ранжирования классов. Преимущественно они выделяются в его бортовой зоне, где весьма в осторожной форме можно прогнозировать присутствие скоплений УВ в отложениях осадочного чехла.

Структурные модели по результатам ранжирования классов (*таблица 2*) демонстрируют прямые корреляционные связи с результатами классификаций по геотермии и распределению радиоактивных элементов и обратные корреляционные связи с результатами классификаций гравитационного и магнитного полей Ассакеауданского прогиба и Шахпахтинской ступени.

По ЦУСД наблюдается соответствие классов с грави- и магнитовозмущающими и гетермическими моделями и обратные соотношения с концентрациями радиоактивных элементов.

Таким образом, выявлена закономерность, согласно которой Ассакеауданский прогиб имеет наименее выраженные структурные элементы, тогда как Центрально-Устюртская система дислокаций отличается наибольшей тектонической выраженностью. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего анализа геологического строения и оценки перспективности нефтегазоносности региона.

Заключение и выводы. В ходе интерпретации геолого-геофизических данных по Юго-Устюртскому региону (ЮУР) с использованием ПО IP Seismic выполнен анализ и прогноз нефтегазоносности территории. В исследовании использованы данные бурения, сейсморазведки, грави- и магниторазведки, аэрогаммаспектрометрии (АГСС) и геотермии с применением машинного обучения, что позволило детализировать перспективные зоны.

Для классификации геофизических полей применялся модуль SOM_Classtering Seis plug-in на основе алгоритма Кохонена.

Данный метод выявил скрытые закономерности и сформировал обученную нейронную карту, что способствовало точной визуализации результатов по построенным профилям. В свою очередь, модуль IP_Prediction 1D и 2D применялся для моделирования параметров геофизических полей на основе структурных карт и данных скважин. Важным этапом обработки данных стало использование инверсионной технологии расчета объема контраста геофизических параметров, что позволило повысить корреляцию данных.

Прогноз нефтегазоносности был выполнен в два этапа. Первый этап включал самообучение нейронных сетей, что позволило определить центры кластеров на основе парных входных данных и вычислить оптимальные коэффициенты нейронных сетей. На втором этапе осуществлялось вычисление атрибута потенциальных полей и определение расстояний точек до центров кластеров. В результате удалось построить карты стандартных отклонений и выделить наиболее перспективные участки. Применение нейросетевого нелинейного оператора позволило эффективно моделировать сложные нелинейные взаимосвязи, адаптироваться к различным данным и автоматически настраивать параметры модели.

Гравитационные и магнитные поля были изучены с использованием модуля GraviMag Modeling Inversion, интегрированного в IP Seismic. Данный инструмент обеспечил построение геоплотностных и геомагнитных моделей на глубинах от 100 до 20 000 м, Благодаря этому удалось выполнить моделирование и интерпретацию гравимагнитных данных, построить математические модели и провести инверсию для более точного определения глубины, формы и состава аномальных объектов.

Исследование данных АГСС позволило выявить корреляции между микропросачиваниями углеводородов и аномалиями гамма-излучения. В программном обеспечении Arc GIS (Model Builder) проведена интеграция технологий геоинформационных систем с инструментами статистического и пространственного анализа. Это дало возможность проанализировать корреляционные связи между наборами данных АГСС и выявить скрытые закономерности при кластеризации. На основе цифровых моделей по содержаниям радиоактивного калия, тория и урана была построена самоорганизующаяся карта изменения гамма-активности, что позволило более детально изучить особенности распределения радиоактивных элементов.

На этой карте ЦУСД характеризуется низкой перспективностью в отношении перспектив газонефтеносности из-за однородного и фонового характера насыщения радиоактивными элементами. В Ассакеауданском прогибе выявлен рост дифференцированности классов с минимальной концентрацией радиоактивного калия, урана и тория, что повышает его перспективность. На Шахпахтинской ступени зафиксированы классы с активными процессами микропросачивания и миграции углеводородов, что делает её наиболее перспективной структурой.

Дополнительно проведён анализ гравитационного и магнитного полей, что подтвердило низкую перспективность нефтегазоносности ЦУСД, в то время как Шахпахтинская ступень и Ассакеауданский прогиб продемонстрировали более благоприятные условия для накопления углеводородов.

Исследование тепловых полей с применением нейронных сетей выявило повышенные геотермические аномалии на отдельных локальных структурах Шахпахтинской ступени, что также свидетельствует о возможном наличии активных процессов миграции углеводородов.

Ранжирование структурных моделей с использованием методов искусственного интеллекта позволила выявить корреляционные связи между данными грави- и магнитометрии, геотермии и распределением радиоактивных элементов. Интеграция методов геоинформационного анализа, статистической классификации и искусственного интеллекта обеспечила комплексную оценку перспектив нефтегазоносности ЮУР и выделение наиболее благоприятных зон для разведки углеводородов. Наиболее перспективными районами являются Шахпахтинская ступень и Ассакеауданский прогиб, в то время как Центрально-Устюртская система дислокаций демонстрирует низкую вероятность скопления углеводородов.

Таким образом, выполненные исследования позволили сформировать целостную картину геолого-геофизической структуры ЮУР, выявить закономерности распределения радиоактивных элементов, геотермических аномалий, а также оценить перспективность нефтегазоносности различных зон. Комплексное применение машинного обучения, методов инверсии и пространственного анализа позволило значительно повысить точность прогноза и определить наиболее перспективные области для дальнейших разведочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1 Abetov A.Ye., Essirkepova Sh.B., Kozhamsugirov D. Effectiveness of aerogamma-spectrometric research in solving applied problems of oil and gas geology // Геология и охрана недр. 2021. Т. 78. № 1. С. 55–62.

2 Abetov A.E., Yessirkepova Sh.B., Curto Ma J. Gravity field transforms at the exploration for hydrocarbon field in the southern part of the Ustyurt region // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 3(453), 2022, 17-31, Almaty, NAS RK, ISSN 2518-170X (Online), ISSN 2224-5278 (Print), https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.177

3 Abetov A.E., Yessirkepova Sh.B., Curto Ma J. The Geomagnetic Field Transformants and Their Complexing with Data of Gravitational, Thermal and Radioactive Fields: During the

Exploration of Hydrocarbon Fields at the Southern Part of the Ustyurt Region. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.111560

4. Н. В. Безносов, В. И. Корчагин, А. И. Николаев и др. Справочник по стратиграфии нефтегазоносных провинций СССР. Москва, Недра, 1987, 335с. [N. V. Beznosov, V. I. Korchagin, A. I. Nikolaev i dr. Spravochnik po stratigrafii neftegazonosnyh provinciĭ SSSR. Moskva, Nedra, 1987, 335s.]

5 Грекусис Д. Методы и практика пространственного анализа: с примерами решения в ArcGIS, GeoDa и GeoDa Space, 2021 [Grekusis D. Metody i praktika prostranstvennogo analiza: s primerami resheniya v ArcGIS, GeoDa i GeoDa Space, 2021]

6 Бекжанов Г.Р., Кошкин В.Я., Никитченко И.И и др. Геологическое строение Казахстана. Алматы: Академия минеральных ресурсов Республики Казахстан, 2000 г.- 396 с. [Bekzhanov G.R., Koshkin V.YA., Nikitchenko I.I i dr. Geologicheskoe stroenie Kazahstana. Almaty: Akademiya mineral'nyh resursov Respubliki Kazahstan, 2000 g.- 396 s.]

7 С.Ж. Даукеев, Б.С Ужкенов, А.А. Абдулин, Х.А. и др. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. Том 3. НЕФТЬ И ГАЗ, Алматы, 2002 г., 248с. [S.ZH. Daukeev, B.S Uzhkenov, A.A. Abdulin, H.A. i dr. Glubinnoe stroenie i mineral'nye resursy Kazahstana. Tom 3. NEFT' I GAZ, Almaty, 2002 g., 248s.]

8 Абилхасимов Х.Б. Перспективы нефтегазоносности Устюрт-Бозашинского осадочного бассейна // Геология и охрана недр. – Алматы, 2018. - № 4 (69). – С. 30-39. [Abilhasimov H.B. Perspektivy neftegazonosnosti Ustyurt-Bozashinskogo osadochnogo basseĭna // Geologiya i ohrana nedr. – Almaty, 2018. - № 4 (69). – S. 30-39.]

9 Жолтаев Г.Ж., Абилхасимов Х.Б. Седиментационные модели и перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений Прикаспийской синеклизы и Устюрта // Геология регионов Каспийского и Аральского морей. - Алматы: Казахстанское геологическое общество «КазГЕО», 2004. – С. 296-306. [ZHoltaev G.ZH., Abilhasimov H.B. Sedimentacionnye modeli i perspektivy neftegazonosnosti paleozoĭskih otlozheniĭ Prikaspiĭskoĭ sineklizy i Ustyurta // Geologiya regionov Kaspiĭskogo i Aral'skogo moreĭ. - Almaty: Kazahstanskoe geologicheskoe obshchestvo «KazGEO», 2004. – S. 296-306.]

10 Акчулаков У.А. (руководитель группы). Отчет «Комплексное изучение осадочных бассейнов Республики Казахстан за 2009-2011 годы» - Астана, АО «КИНГ», 2012. [Akchulakov U.A. (rukovoditel' gruppy). Otchet «Kompleksnoe izuchenie osadochnyh basseĭnov Respubliki Kazahstan za 2009-2011 gody» - Astana, AO «KING», 2012.]

11 Петров А.В. Учебное пособие по КОСКАД 3D. Российский государственный геологоразведочный университет. Москва 2003. [Petrov A.V. Uchebnoe posobie po KOSKAD 3D. Rossijskij gosudarstvennyj geologorazvedochnyj universitet. Moskva 2003.]

12 Julia B. Curto, Augusto C.B. Pires, Adalene M. Silva/ The role of airborne geophysics for detecting hydrocarbon microseepagesand related structural features: The case of Remanso do Fogo, Brazil // GEOPHYSICS, VOL. 77, NO. 2 (MARCH-APRIL 2012); P. B35–B41, 2012

13 Ivan Priezzhev*, Aaron Scollard, and Zhengang Lu. Regional production prediction technology based on gravity and magnetic data from the Eagle Ford formation, Texas, USA. SEG Technical Program Expanded Abstracts: 1354-1358. https://doi.org/10.1190/segam2014-0289.1

14 Priezzhev II , PCH Veeken, SV Egorov, AN Nikiforov, 2019, Seismic waveform classification based on Kohonen 3D neural networks with RGB visualization, First Break, Volume 37, Issue 2, Feb 2019, p. 37 – 43

15 Годин Ю.Н., Таль-Вирский Б.Б. Карта рельефа поверхности складчатого фундамента Средней Азии, масштаб 1:1 000 000, 1967 г. [Godin YU.N., Tal'-Virskij B.B. Karta rel'efa poverhnosti skladchatogo fundamenta Srednej Azii, masshtab 1:1 000 000, 1967 g.]