

Комплексирование данных сейсморазведки и магниторазведки при анализе палеоврезов и палеопонижений шельфа Карского моря

■ Казанин А.Г., Жилин Ф.Е., Демонов А.П., Кочетов М.В., АО «МАГЭ», г. Москва.

■ Шепелев А.А., АО «МАГЭ», МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

■ Коснырева М.В., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Аннотация. В статье представлены результаты выполнения морских инженерных изысканий участка исследований, расположенного в юго-западной части шельфа Карского моря. В процессе изучения обнаружено большое количество палеодепрессий различной природы. Данные объекты представляют собой эрозионные врезы, выработанные палеореками во время наиболее крупных регрессий, а также структуры проседания, образовавшиеся при развитии подрусловых таликов, и др. Указанные компоненты геологической и техногенной среды могут быть опасны при бурении поисково-разведочных и эксплуатационных скважин, а также строительстве подводных сооружений нефтегазовой промышленности. По сейсморазведочным данным не всегда возможно достоверно идентифицировать данные образования и определить их генезис. В статье продемонстрированы возможности комплексирования данных сейсморазведки и магнитометрии с целью изучения погребённых палеоврезов и палеодепрессий.

Ключевые слова: гидромагнитная съемка; морская сейсморазведка 2D; Карское море; континентальный шельф; геофизические методы; инженерно-геологические изыскания; палеоврезы; комплексная интерпретация геофизических данных.

Введение

Эффективное освоение нефтегазовых ресурсов континентального шельфа Российской Федерации и особенно его арктической части является актуальной и стратегической задачей, обоснованной наличием уникальных разведанных углеводородных запасов. В этой связи нефтегазодобывающие кампании проявляют большой интерес к освоению ресурсов данного региона и имеют большие планы по строительству эксплуатационных скважин.

Освоение месторождений арктического шельфа характеризуется большой степенью риска в связи с суровыми климатическими условиями и труднодоступностью из-за удаленности от берега. Для обустройства данного вида месторождений необходимы огромные финансовые затраты, и поэтому получение полного объема информации о

строении придонной части геологического разреза для минимизации рисков при строительстве нефтегазовой инфраструктуры является важным этапом разработки шельфовых месторождений [8].

В данной работе представлены результаты анализа геофизических данных, полученных в рамках выполнения инженерно-геологических изысканий на шельфе Карского моря, акватория которого представляет собой один из самых перспективных нефтегазоносных регионов на арктическом шельфе [1, 3, 4].

На сегодняшний день планирование строительства эксплуатационных скважин на континентальном шельфе в пределах лицензионных участков сопровождается этапом выполнения комплексных морских инженерно-геологических изысканий, предназначенных для получения полного объема исходных данных для разработки проектной документа-

ции на подготовительном этапе строительства. Традиционно инженерно-геологические изыскания включают в себя геофизические исследования, а также гидрографические и геотехнические работы [2].

Основными задачами морских инженерно-геологических изысканий на шельфе являются:

1. комплексное изучение инженерных условий площади поисково-оценочной скважины, включая рельеф, геологическое строение, инженерно-геологические, геоморфологические, гидрометеорологические и экологические условия. Определение состава, состояния и физико-механических свойств грунтов для обоснования возможности использования площадки под размещение полупогружной нефтяной буровой платформы (ППБУ). Оперативное определение возможности размещения ППБУ в проектной точке;

2. получение топографо-геодезических материалов и данных, инженерно-топографических планов. Картографирование морского дна с высокой детальностью для построения цифровой модели рельефа и батиметрических карт, определение особенностей морского дна и выявления локальных объектов. Оперативное определение возможности размещения ППБУ в проектной точке;

3. определение инженерно-геологического разреза, условий и степени изменчивости залегания грунтов на площади изысканий. Выделение сейсмостратиграфических комплексов по данным геофизических исследований, построение глубинных мигрированных сейсмических разрезов, с выделенными на них зонами, представляющими опасность для проводки скважины;

4. оценка возможности развития опасных геологических и инженерно-

геологических процессов, таких как: грунты со скоплением газа и аномально высоким пластовым давлением в верхней части разреза, разжижение поверхностных грунтов, подвижки грунтов в верхней части разреза и др. Идентификация и картирование опасностей, связанных с распространением многолетнемерзлых пород, таликовых зон и деградированной мерзлоты. Предоставление рекомендаций по выбору наиболее безопасной точки постановки ППБУ в случае наличия геологических или техногенных опасностей в проектной точке.

В данной работе будут рассмотрены результаты камеральной обработки и интерпретации геофизических данных исследуемого участка.

Методика морских геофизических исследований

Геофизические исследования, представленные в данной работе, выполнялись на шельфе Карского моря в пределах территориальных вод Российской Федерации

Комплекс инженерно-геологических изысканий на шельфе направлен на выявление особенностей геологического строения приповерхностной части осадочного чехла, а также на выявление и локализацию геологических и техногенных опасностей.

В рамках инженерно-геологических изысканий на участке в юго-западной части Карского моря в пределах арктического шельфа, выполненных специалистами АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (АО «МАГЭ») на собственном научно-исследовательском судне «Геолог Дмитрий Наливкин», были проведены комплексные геофизические исследования границ залегания погребенных палеорезов (рис. 1).



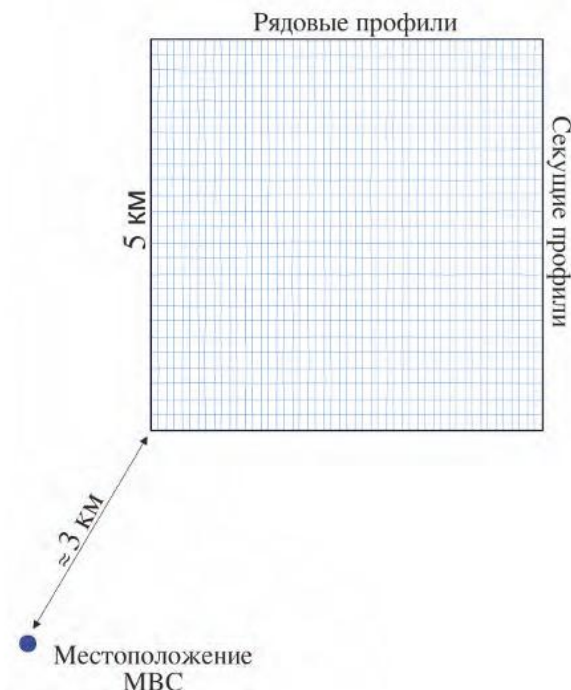
▲ Рис. 1. Научно-исследовательское судно «Геолог Дмитрий Наливкин».

В данной работе представлены обобщённые результаты геофизических исследований, общий объем выполненных работ составил 385 п. км на изучаемом участке площадью 25 км² (рис. 2).

В исследуемом районе работ применялся традиционный комплекс геофизических исследований в составе инженерно-геологических изысканий: сейсморазведка высокого разрешения (СВР), высокочастотное (ВЧ) и низкочастотное (НЧ) непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), электроразведочные работы методом ЗСБ, гидролокация бокового обзора (ГЛБО) и гидромагнитная съёмка. Широкий спектр геофизических методов, входящих в состав инженерных изысканий, позволяет осуществлять комплексный анализ всех имеющихся данных, что повышает достоверность итогового результата.

Для изучения палеоврезов и палеопонижений в данной работе использовались результаты СВР и НЧ НСАП, а также данные гидромагнитной съёмки.

Сейсморазведочные работы проводились методом отраженных волн в модификации общей средней точки (МОВ-ОСТ). Для выполнения полевых работ методом сейсморазведки высокого разрешения на борту судна НИС «Геолог Дмитрий Наливкин» было установлено



▲ Рис. 2. Схема расположения профилей съемки.

следующее оборудование: система регистрации, пневмоисточники, компрессоры, контроллер пневмоисточников и станция контроля качества и обработки данных.

Сейсморазведка высокого разрешения выполнялась по сети профилей с фланговой расстановкой с расстоянием между рядовыми профилями равным 100 м, между секущими 500 м. Регистрация сейсмических данных осуществлялась сейсмостанцией SEAL 408 производства Sercel. Работы производились с использованием сейсмической косы фирмы Sercel с пьезоэлектрическими гидрофонами, состоящей из 192 каналов (расстояние между центрами групп гидрофонов – 6,25 м). Общая длина приёмной линии – 1200 м. Глубина буксировки косы составила 4 м.

Кроме сейсморазведки высокого разрешения были выполнены работы НЧ НСАП по сети профилей с фланговой расстановкой с расстоянием между рядовыми профилями равным 100 м, между секущими 200 м. Данный метод является



▲ Рис. 3. Морской магнитометр SeaSPY2 (a), MBC Sentinel (b).

значительно более высокочастотным по сравнению с вышеизложенным (270–575 Гц по уровню 70 % от максимальной энергии на амплитудных спектрах) и использовался для уточнения строения приповерхностной части разреза.

Для приёма и регистрации отражённых волн по методу НЧ НСАП использовалась 48-канальная пьезокоса Geo-Sense Ultra Hi-Res 48 Channel Streamer. Для отдаления от кильватерной струи судна буксировка акустической косы осуществлялась с выноса левого борта. Система регистрации на базе двух модулей MultiTrace встроена в лебёдку сейсмокося. Управление модулями осуществляется посредством подключения кабеля Ethernet к компьютеру, располагающемуся в помещении вычислительного центра.

С учетом глубины моря на объекте исследований были выбраны следующие параметры регистрации НСАП НЧ:

- длина косы – 150 м;
- частота дискретизации – 8 кГц;
- шаг по профилю – 3.125 м;
- длина записи – 500 мс;
- заглубление источника и приемника – 0.7 м;
- энергия источника – 4.2 кДж.

Гидромагнитная съёмка выполнялась по дифференциальной методике с использованием продольного градиентометра, состоящего из двух буксируемых друг за другом магнитометров SeaSPY2 со встроенными датчиками глубины (рис. 3а). Система SeaSPY2 является полностью цифровой. Измерение сигнала магнитометра производится внутри буксируемой гондолы магнитометра, где сигнал наиболее сильный и в наибольшей степени защищен от внешних помех. Принцип работы магнитометра SeaSPY2 основан на использовании эффекта Оверхаузера (высокочувствительный всенаправленный датчик), который измеряет внешнее магнитное поле при помощи особого алгоритма технологии ядерного магнитного резонанса. Датчики SeaSPY2 обеспечивают точность 0,1 нТ. Для определения высоты (альтитуды) над дном в магнитометр установлен альтиметр – высокоточный эхолот 200 кГц. Также магнитометр снабжен датчиком давления. Магнитометры располагались на фиксированном расстоянии 11,5 м (база градиентометра). Для устранения помехообразующего влияния судна на данные измеряемого магнитного поля магнитометры буксиро-

вались на удалении от кормы, равном тройной длине судна [6, 7]. Во время работ на профилях глубина погружения магнитометров регулировалась длиной выпущенного кабеля для поддержания высоты буксировки магнитометров над дном не более 10–20 метров. Сеть профилей магнитной съемки соответствует профилям НЧ НСАП.

Для учета влияний вариаций магнитного поля использовалась магнитовариационная станция (MBC) Sentinel, расположенная непосредственно в районе работ на удалении 5 км от участка изысканий (рис. 36). MBC Sentinel представляет собой полностью автономную станцию долгосрочного наблюдения магнитного поля, которая содержит батарейный блок и всенаправленный сенсор Оверхаузера с низким энергопотреблением, которые помещены в герметичный корпус [9]. Он поставляется с аксессуарами, которые позволяют использовать его на суше в любой местности, над землей, подвешенным к ветвям деревьев или выступам, и под водой на глубине 1000 м и более [10, 11].

Комплексирование сейсморазведки и магниторазведки

Сейсморазведочные работы выполнялись с целью изучения верхней части осадочного разреза и выявления потенциально опасных геологических процессов и явлений, которые могут привести к возникновению аварийных ситуаций или катастрофам при проведении эксплуатационного бурения.

Палеоврезы и палеодолины относятся к одному из видов геологических опасностей и представляют большую угрозу для нефтегазовой инфраструктуры. Палеоврезы в большинстве случаев заполнены слабоконсолидированными осадками, часто газонасыщенными, с включением крупнообломочного материала.

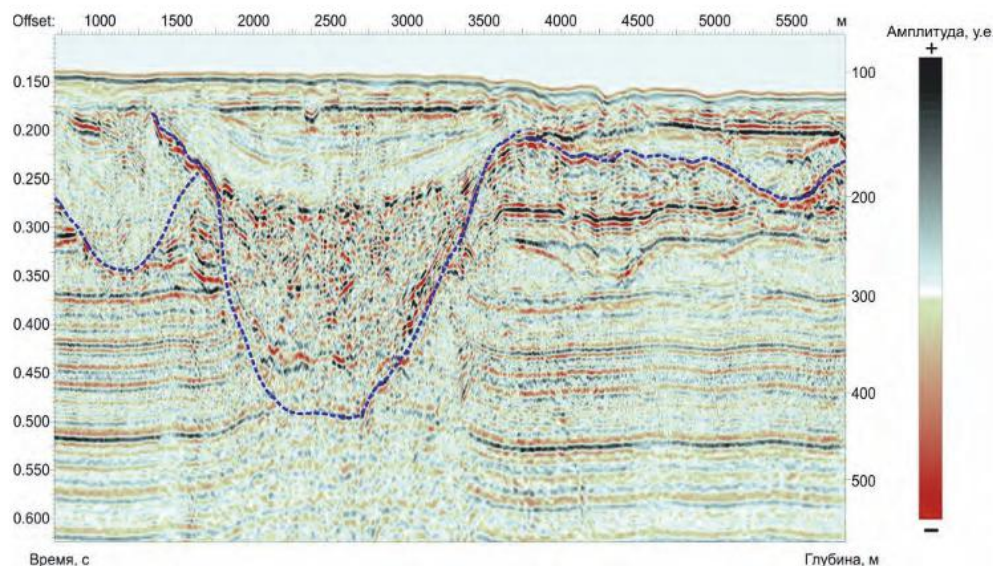
При выполнении буровых работ в таких местах из-за сложных грунтовых условий нередко осложнения (провалы или прихваты инструмента, потеря циркуляции (поглощения), газоводопрооявления и т.д.). В контурах палеоврезов не рекомендуется производить установку платформ на гравитационном основании и строительство поисково-разведочных скважин.

Кроме того, особенность палеоврезов на акваториях арктических морей заключается в их специфическом криогенном режиме, отличном от вмещающих отложений. В общем случае, грунты, заполняющие и подстилающие врезы, относительно быстро протаивали в субэвраль-ных и мелководных (прибрежных) условиях. Впоследствии, когда они оказывались под глубокими водами с установившейся отрицательной температурой, могло происходить их субаквальное промерзание, чему способствуют низкая минерализация порового флюида и глинистый состав заполняющих осадков, препятствующий проникновению морских вод в поровое пространство. В результате к палеоврезам могут быть приурочены линзы мерзлых грунтов.

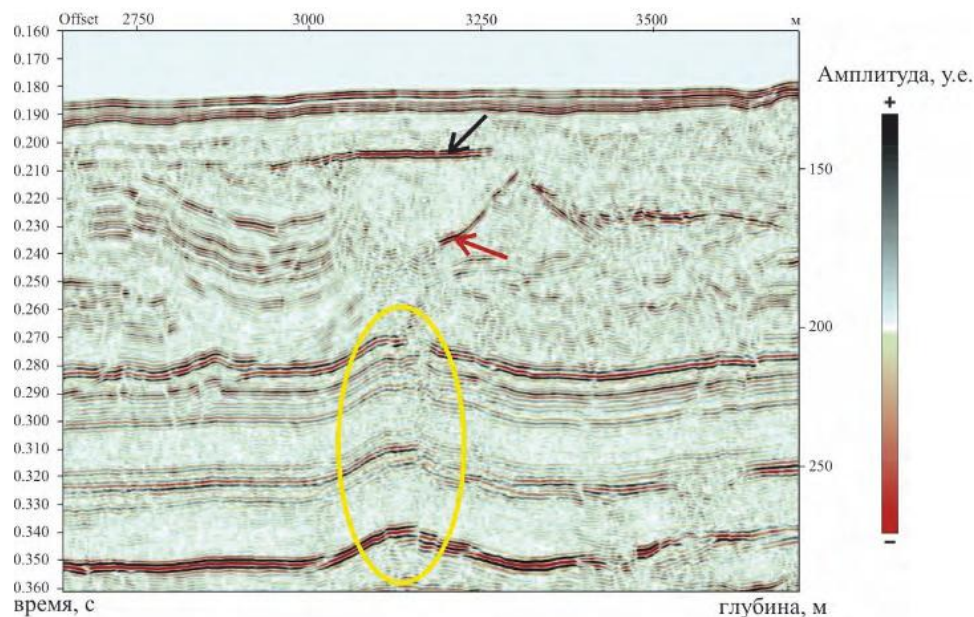
На сейсмических данных (как СБР, так и НЧ НСАП) палеоврезы и палеодепрессии выделяются по следующим характерным признакам (рис. 4):

- рефлекторы вогнутой формы в подошве;
- акустически прозрачная либо хаотическая внутренняя волновая картина;
- наличие несогласий.

Мощность осадков, заполняющих палеодепрессии, варьирует в основном в пределах 40–85 м, однако может достигать порядка 315 м. Отложения палеоврезов и палеопонижений могут располагаться как в приповерхностной части разреза (на глубине около 10–15 метров



▲ Рис. 4. Пример выделения палеоврезов и палеопонижений на разрезах СВР (обозначены синим пунктиром).



▲ Рис. 5. Пример выделения предположительно мёрзлых грунтов на разрезах НЧ НСАП. Жёлтым овалом обозначен ложный изгиб вверх осей синфазности под скоплением предположительно мёрзлых грунтов, чёрной стрелкой показано отражение от кровли мёрзлых грунтов, красной – от их подошвы.

от поверхности дна), так и затрагивать более глубокие слои (до 450 м ниже дна).

Особенность палеоврезов на акваториях Арктических морей заключается в их специфическом криогенном режиме, отличном от вмещающих отложений [5]. В связи с этим к палеоврезам и палеодепрессиям могут быть приурочены линзы мёрзлых грунтов. В изучаемом районе основным признаком выделения мёр-

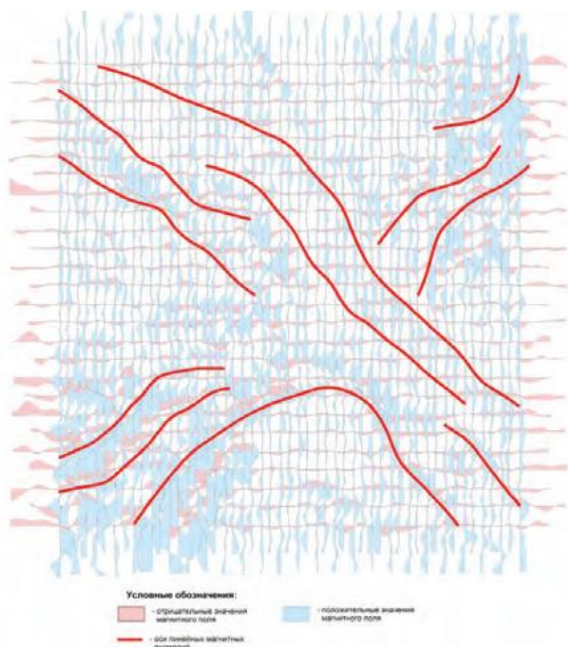
злых грунтов на сейсмических разрезах является ложный изгиб вверх нижележащих осей синфазности, в основном, проявляющийся на разрезах СВР. Но в приповерхностной части разреза (до 25 метров ниже уровня дна) данные признаки хорошо видны и на разрезах НЧ НСАП (рис. 5). Дополнительным признаком наличия мёрзлых грунтов могут служить яркие отражения прямой поляри-

ности относительно донного отражения в кровле и обратной полярности в подошве мёрзлого слоя.

Комплекс геофизических методов исследуемого района работ включал гидромагнитную съёмку, целью которой являлось обнаружение и картирование железосодержащих объектов на морском дне и в придонной части грунтового массива. Аномальное магнитное поле, полученное в результате обработки массива полевых магнитометрических данных, состоит из региональной (низкочастотной) составляющей и локальной (высокочастотной) составляющей. Объектом анализа инженерной гидромагнитной съёмки исследуемого региона стала локальная составляющая аномального магнитного поля, которая рассчитывалась методом пересчёта исходного поля в верхнее полупространство и дальнейшего вычитания результатов пересчёта из исходных данных.

Локальное магнитное поле исследуемого района преимущественно низкоградиентное (0,05 нТл/м) и в целом харак-

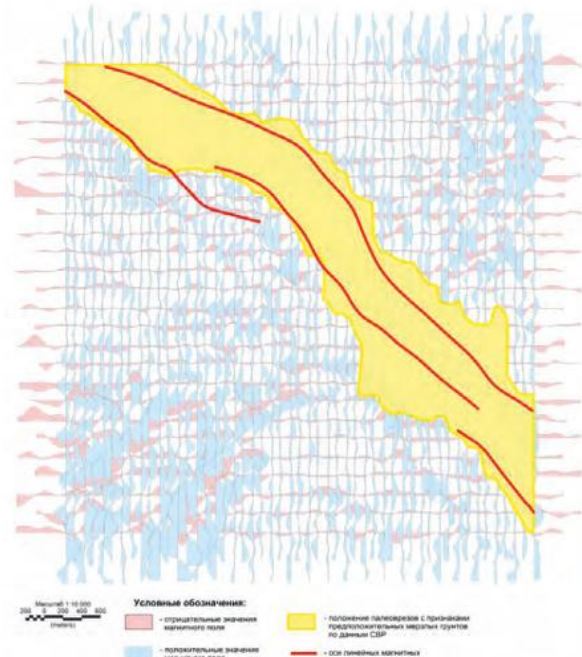
▼ Рис. 6. Интерпретационная схема локального аномального магнитного поля.



теризуется невысокой интенсивностью (0,40 нТл). На его фоне наблюдаются выраженные протяжённые линейные аномалии с амплитудами магнитного поля заметно выше погрешности наблюдений. Они прослеживаются в виде узких линейных зон западного – северо-западного направления. На графиках локального аномального магнитного поля наблюдаются повышенные значения градиента магнитного поля до 0,96 нТл/м. Выделенные линейные аномалии характеризуются юго-восточным и северо-восточным простиранием. Локальные аномалии на участке съёмки в среднем имеют небольшую амплитуду до 5–6 нТл (рис. 6).

Протяжённость аномалий (видимая длина около 3 км), их относительно низкие амплитуды (до 15–18 нТл), а также то, что в исследуемом районе отсутствуют какие-либо объекты инфраструктуры, свидетельствуют о геологичес-

▼ Рис. 7. Сопоставление карты графиков локальных аномалий магнитного поля с областью распространения палеоврезов с признаками предположительно мерзлых грунтов.



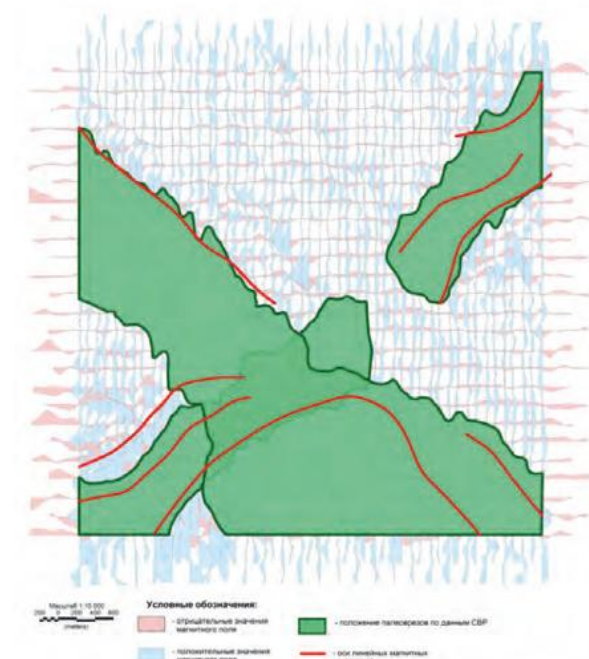
кой природе описываемых аномалий. Следует отметить, что линейные аномалии коррелируют с отложениями палеоврезов и палеодепрессий и приурочены к их краевым частям, где наиболее ярко может проявляться латеральная изменчивость литологического состава грунтов. Примечательно, что максимальные амплитуды (до 15–18 нТл) и градиент (до 0,96 нТл/м) магнитного поля относятся к тем линейным аномалиям, которые приурочены к положениям палеоврезов с признаками предположительно мёрзлых грунтов по данным СВР (рис. 7).

Данные аномалии, преимущественно положительные, превышают фоновую интенсивность магнитного поля в 3 раза и приурочены к зонам максимальных значений градиента магнитного поля. Остальные линейные аномалии также обладают повышенными значениями параметров магнитного поля относительно фоновых значений, но не достигают максимальных амплитуд (рис. 8).

Выводы

В ходе анализа палеоврезов и палеопонижений было выполнено комплексирование данных сейсморазведки и магнитометрии. Было установлено, что большинство линейных аномалий, выделенных на графиках локальных аномалий магнитного поля, коррелируют с осями палеоврезов и палеопонижений, выделенных на сейсмических разрезах.

Также установлено, что наибольшими амплитудами и градиентами магнитного поля обладают линейные аномалии, совпадающие с бортами палеоврезов и палеопонижений (выделенных по сейсмическим данным), к которым приурочены линзы предположительно мёрзлых грунтов. Для установления причины такой корреляции требуется провести



▲ Рис. 8. Сопоставление карты графиков локальных аномалий магнитного поля с областью распространения палеоврезов и палеодепрессий по данным сейсморазведки. Красными линиями выделены линейные аномалии магнитного поля.

дальнейшие исследования, в том числе с непосредственным измерением магнитной восприимчивости на образцах. Необходимо заметить, что идентификация мёрзлых грунтов на исследуемом участке не является однозначной без проведения опытно-методических работ по сопоставлению результатов сейсмических исследований с данными бурения, в ходе которых должны быть проведены специализированные геокриологические исследования по установлению условий залегания и состояния мёрзлых пород.

Литература

1. Бурлин Ю. К., Ступакова А. В., 2008. Геологические предпосылки перспектив нефтегазоносности шельфа российского сектора Северного Ледовитого океана. Геология нефти и газа, № 4, с. 13–23.

2. Владов М.Л., Старовойтов А.В., 1998. Геофизические методы инженерно-геологических задач. ГСД Продакшен, Москва. 67 с
3. Грамберг И.С. и др., 2000. Нефтегазоносность Арктического супербассейна. Разведка и охрана недр, № 12, с. 24-30.
4. Дмитриевский А.Н., Максимов, В.М., Кульпин Л.Г., 2008. Риски и безопасность природно-техногенных объектов морской добычи на шельфе Арктики. Нефтяное хозяйство, № 6, с. 62-67.
5. Колубакин А.А., Миронюк С.Г., Росляков А.Г., Рыбалко А.Е., Терехина Я.Е., Токарев, М.Ю., 2016. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых. Инженерные изыскания, № 10-11, с. 38-51.
6. Логачев А.А., Захаров В.П., 1979. Магниторазведка. Недра, Санкт-Петербург, 351 с.
7. Смелянова З.С., Селиванов В.С., 1981. Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка). Недра, Санкт-Петербург, 263 с.
8. Тасмуханова А.Е., Шигапова Р.Р., 2018. Особенности разработки шельфовых месторождений нефти. Вестник евразийской науки, т. 10, № 2, с 76.
9. Шепелев А.А., Коснырева М.В., 2023. Измерения вариаций магнитного поля Земли в акватории Карского моря с помощью мобильной магнитовариационной станции. Гелиогеофизические исследования, № 38, с. 54-60.
10. Шепелев А.А., Жилин Ф.Е., Демонов А.П., 2021. Эффективность выполнения гидромагнитных градиентометрических исследований с использованием магнитовариационной станции при инженерно-геологических изысканиях на континентальном арктическом шельфе. Инженерные изыскания, № 3-4, с. 32-41.
11. Shepelev A.A., Zhilin F.E., 2021. Comparison of processing results of magnetometric data using magnetic base station and gradiometer in offshore engineering survey. Engineering and mining geophysics 2021, European Association of Geoscientists and Engineers, Issue 1, pp. 1-7, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152018>.