

Применение электроразведочных методов для оценки строения ВЧР и выявления опасностей при планировании строительства объектов на шельфе

■ Иванов С.А.¹, Владимиров В.В.¹, Горбачев С.В.², Кудрявцева Е.О.¹,
Ситников А.А.¹, Шимянский Д.М.¹

■ ¹ ООО «СГНПК». г. Иркутск.

² ФГБУН ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва.

Аннотация. Наличие мелкозалегающего газа и мерзлоты представляет опасность при строительстве объектов на шельфе из-за экзогенных геологических процессов, которые могут привести к неконтролируемым выбросам газа и деформации грунта, и, как следствие, к деформации и разрушению сооружений. Одним из инструментов предотвращения соответствующих рисков является проведение инженерно-геофизических работ, направленных на выявление приповерхностных газовых скоплений и очагов развития (границ залегания) многолетнемерзлых пород, что позволяет оценить риски и, тем самым, повысить надежность предотвращения опасностей при строительстве объектов уже на этапе разработки проекта. Особое значение в данной связи приобретает выбор комплекса геофизических методов, позволяющих наиболее эффективно решить эту задачу. Одним из таких методов является электроразведка. В работе представлены результаты полевых и модельных электроразведочных исследований посредством комплексирования с результатами сейсмических инженерно-геологических изысканий в целях прогнозирования приповерхностных залежей газа. На примере шельфа Печорского моря доказана эффективность дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ) для выявления особенностей строения верхней части разреза, которые могут представлять существенную угрозу для строительства объектов.

Ключевые слова. Электроразведка, сейсморазведка, комплексирование геологоразведочных методов, удельное электрическое сопротивление, вызванная поляризация, верхняя часть разреза, опасные геологические процессы, приповерхностные залежи газа, инженерно-геологические исследования.

Введение

Одним из факторов риска при строительстве объектов на шельфе является наличие в верхней части разреза (ВЧР) газонасыщенных и мерзлых пород. Их присутствие существенно ограничивает возможности постановки буровых установок, бурения и строительства объектов обустройства. В работе рассматриваются результаты переобработки материалов нефтегазопроисловых электроразведочных работ дифференциально-нормированным методом и проведенного численного моделирования для

определения возможностей ДНМЭ по решению инженерно-геологических задач, направленных на снижение рисков при строительстве сооружений на шельфе. В пределах рассматриваемого региона практически повсеместно в грунтах отмечается присутствие свободного газа. При бурении инженерно-геологических скважин в мелководных районах Печорского и Карского морей наблюдались выбросы газо-водяной смеси, насыщенной взвешенными грунтовыми частицами. Выбросы происходили в диапазоне глубин от 20 до 50 м

ниже поверхности дна, и были связаны с интервалами газонасыщенных осадков, имеющих аномально высокое пластовое давление (АВПД), наличие которого объясняется присутствием в разрезе толщи многолетнемерзлых грунтов, а также процессами её деградации [4].

Скопления газа в мини-ловушках или диспергированный газ создают внутри осадочных толщ избыточное, по отношению к гидростатическому, поровое давление. Это делает газонасыщенные грунты неустойчивыми к внешним динамическим нагрузкам, а также служит одной из причин естественных деформаций четвертичной толщи [3].

В целях изучения геологического строения ВЧР, выявления зон газосодержания и многолетнемерзлых пород (ММП) проводится большой объём различных геофизических исследований. Доминирующее положение при инженерно-геологических изысканиях (ИГИ) занимают сейсмические методы в высокочастотных и низкочастотных модификациях: сейсморазведка ультравысокого, высокого и сверхвысокого разрешения (СУВР, СВР, ССВР) [5]. Вместе с тем, как показали результаты моделирования и переобработки данных, ориентированной на изучение геоэлектрических свойств ВЧР на одном из участков шельфа Печорского моря, комплексное изучение распределения регистрируемых геоэлектрических параметров, а также вычисляемых параметров вызванной поляризации (ВП) и удельного электрического сопротивления (УЭС) уже на этапе выполнения нефтегазопроисловых электроразведочных работ (ЭР) позволяет решать задачу по обнаружению и картированию участков с приповерхностными скоплениями газа, и, как следствие, являться эффективным инструментом для снижения рисков и обеспечения последующего

безаварийного бурения [2]. В [2] было отмечено влияние присутствия диспергированного газа на различные электроразведочные параметры. В настоящей статье полученные результаты рассматриваются более подробно.

Задачи работы

В 2006 году были выполнены нефтегазопроисловые ЭР на одном из месторождений шельфа Печорского моря [7, 8]. Для работ использовались буксируемые в водном слое приёмная и питающая косы. Длина источника тока составила 475 м, общая длина приемно-измерительной установки - около 2 км. Измерения и запись электромагнитных зондирований проводились по прямолинейным профилям в непрерывном режиме. Точки физнаблюдений (пикеты) формировались на профилях с шагом через 1 км, при этом область осреднения данных при формировании пикетов составляла 3 км, которой, в зависимости от скорости судна, соответствовало 150-200 реализаций.

В 2020 году материал подвергся переобработке, при этом существенное внимание было уделено определению возможностей электроразведки для оценки строения верхней части разреза и выявления инженерно-геологических опасностей. В качестве полигона для проведения исследований была выбрана площадка постановки на точку буровой установки размером 3 x 3 км. На территории площадки уже были выполнены работы по обработке данных инженерного бурения, а также сейсмических работ сверхвысокого и высокого разрешения. На электроразведочных профилях, пересекающих площадку (их оказалось два), в целях повышения детальности исследований были сформированы новые точки физнаблюдений

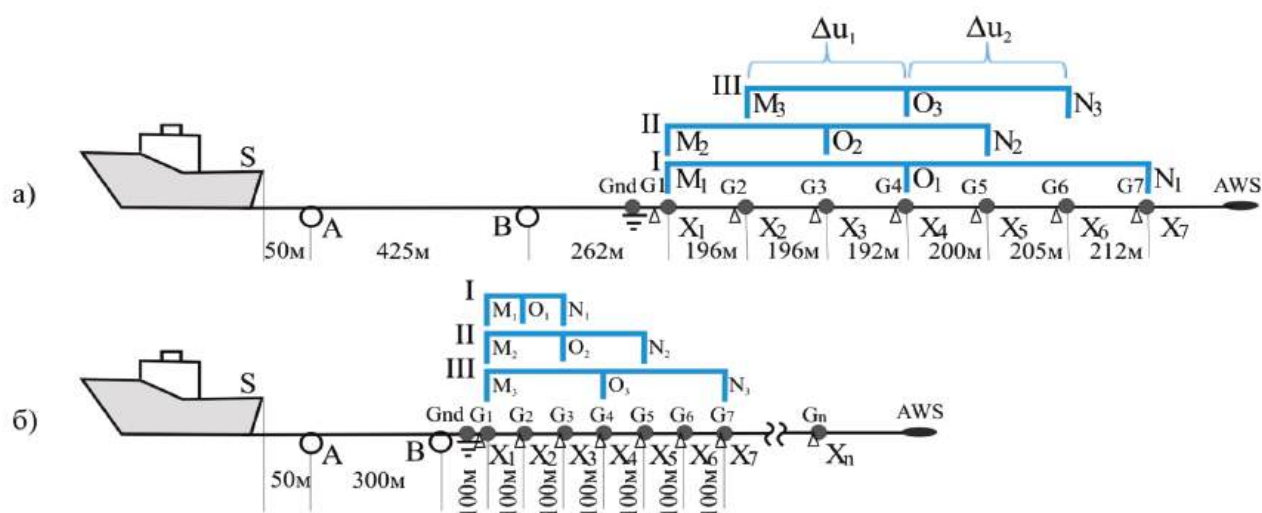
с шагом через 100 м и областью осреднения 300 м (18-30 реализаций).

Объектом исследования являлись песчано-глинистые образования плиоцена, плейстоцена и современные алеврито-песчаные осадки: пески, глины, суглинки и супеси ВЧР, расположенные в интервале от поверхности до глубины 100 м. По данным инженерно-геологического бурения наличие мерзлых льдистых грунтов в пределах площадки не установлено. Исходя из общей картины обнаружения мерзлых пород в районе исследования предполагается, что ММП полностью протаяли. Свободный газ, наблюдаемый на временных сейсмоакустических разрезах, содержится в основном в виде скопления отдельных «пузырьков» (в диспергированной форме) и не создаёт значимых величин пластового давления. Поскольку для проведения электроразведочных нефтегазопроисловых и инженерно-геологических работ требуются установки с различающейся конфигурацией - назовём их, соответственно, большая и малая установка (рис. 1) - в целях объективной

оценки результатов обработки полевых измерений с большой установкой дополнительно были исследованы результаты обработки синтетических данных, полученных с малой установкой, все они сопоставлялись с данными, полученными по результатам сейсмических исследований.

Результаты исследования

На первом этапе для изучения возможности обнаружения приповерхностного газа малой установкой (рис. 1-б) были проведены экспериментальные расчёты по синтетическим моделям с помощью разработанной в ООО «СГНПК» программы ESDesiner. Программа ESDesiner предназначена для проведения численных экспериментов по расчёту электромагнитного (ЭМ) отклика при возбуждении геоэлектрического разреза произвольно погруженной в первый слой слоистой среды электрической линией. Линия задает положение источника и приёмников, количество секций приёмной линии и коммутацию электродов, между которыми рассчитывается разность потенциалов



Обозначения: S - корма; A, B - питающие электроды; Gnd - электрод “земля”; G1-Gn - заглубители; X1-Xn - измерительные электроды; AWS - надводный стабилизатор I, II, III - номера разносов

▲ Рис. 1. Морская электроразведочная многоразносная установка AB-MON: а) для проведения нефтегазопроисловых работ; б) для проведения инженерно-геологических исследований.

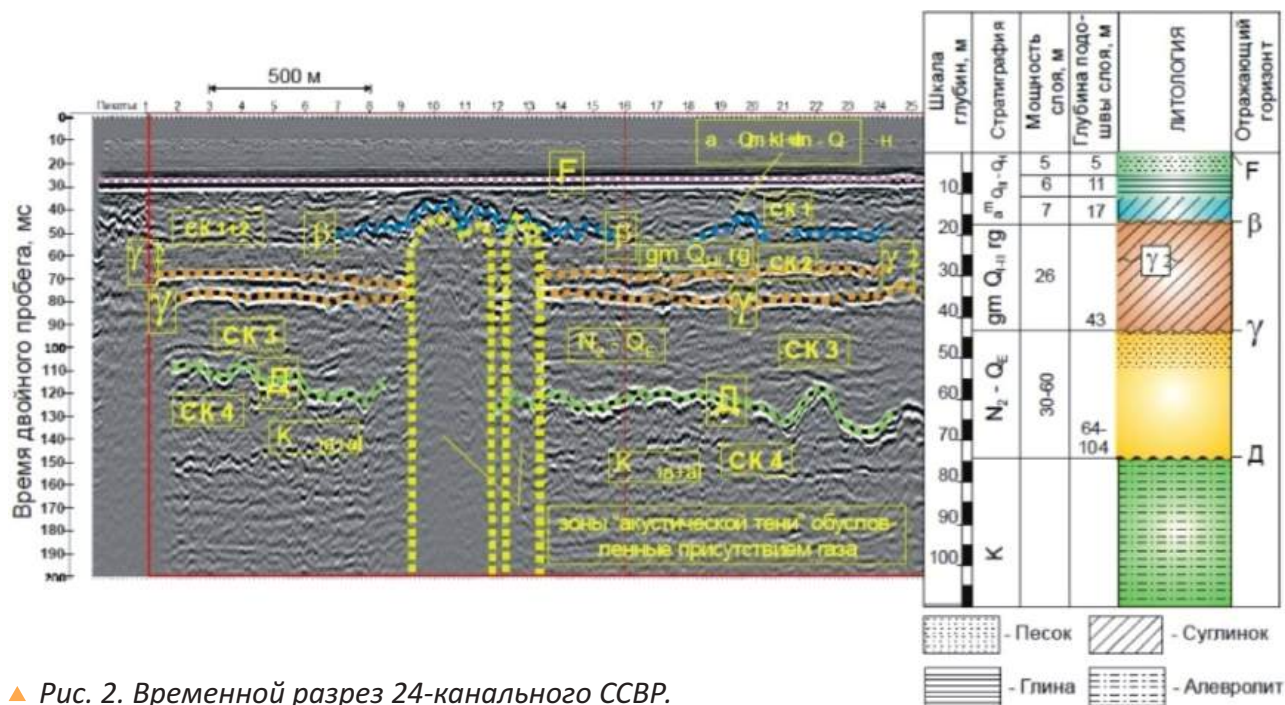
(ΔU_{MN}) и вторая конечная разность ($\Delta 2U_{MON}$), как во время пропускания тока, так и во время переходного процесса. Кроме того, есть возможность проводить моделирование положения секционной косы в среде, и, таким образом, исследовать его влияние на электромагнитные данные.

Для решения задачи поиска приповерхностного газа были созданы 9-слойные синтетические геоэлектрические модели. За основу была принята 7-слойная модель, построенная на основе данных бокового каротажа скважины глубокого бурения, которая затем детализировалась в верхней части разреза (табл. 1). За опорный слой приняты вскрытые на глубине ~ 2.7 км высокоомные доломито-ангидритовые отложения каменноугольного возраста. Время записи сигнала составляло 3.5 с. В эту модель газонасыщенный слой вводился следующим образом: второй геоэлектрический слой разбивался на три слоя, поэтому модель становилась 9-слойной. Кровля геоэлектрического пласта ассоциировалась с сейсмическим отражающим горизонтом « β », выделенным по данным инженерно-геологических изысканий на площадке методом ССВР (рис. 2). В данных условиях горизонт « β » контролирует подошву глинистой пачки, которая, в свою очередь, является своеобразной «покрышкой», препятствующей движению посткриогенного газа в вышележащие слои, вследствие чего горизонт « β » наиболее отчетливо прослеживается в районах, приуроченных к газовым аномалиям. В соответствии с имеющейся априорной информацией с наличием газа ассоциировался 3-й геоэлектрический слой. Поскольку присутствие газа в разрезе повышает сопротивление в ВЧР, УЭС в 3-м слое аномальной модели было задано на уровне 10 Ом·м, а в случае отсутствия газа (в нормальной модели) составляло 3 Ом·м (табл. 1). Участки с

наличием газа задавались в соответствии с результатами ИГИ на площадке, где были выделены зоны газосодержащих грунтов (ГГ). Для экспериментальных расчетов были созданы варианты моделей с разной мощностью 3-го слоя по участкам реальных профилей, расположенных в районе площадки. В табл. 1 показана модель с мощностью ГГ 15 м.

Поиск участков с приповерхностным газом методом ДНМЭ в условиях возбуждения разреза прямоугольными разнополярными импульсами можно одновременно проводить в режиме постоянного тока с расчетом кажущегося сопротивления (ρ_k) и в режиме переходных процессов - изучением отклика среды во время токовой паузы с получением значений ΔU , $\Delta 2U$ на фиксированных временах спада. Геологическая интерпретация проводится с использованием карт и псевдоразрезов распределения ρ_k , глубинная привязка носит ориентировочный характер и зависит от размеров и конфигурации установки, а также карт и временных разрезов распределения параметров ΔU и $\Delta 2U$. Эта информация может быть обработана оперативно.

При работах в режиме переходных процессов реализуется возможность для изучения площадного послойного и вертикального (в виде глубинного геоэлектрического разреза) распределения параметров УЭС и ВП. Аномалии УЭС в сочетании с фоновыми значениями ВП могут ассоциироваться с мерзлотой, а в сочетании с аномалиями ВП – с присутствием в разрезе УВ. Вместе с тем, при больших объемах работ увеличивается длительность интерпретационного этапа за счет проведения инверсии данных. Понятно, что при поисках объектов с небольшой глубиной залегания эффективность работ возрастает при использовании установки с небольшими размерами приёмной и генераторной линий.



▲ Рис. 2. Временной разрез 24-канального ССВР.

Стратигр. привязка	Исходная нормальная модель			Детализированная нормальная модель			Аномальная модель		
	Слой	H*, м	ρ, Ом·м	Слой	H, м	ρ, Ом·м	Слой	H, м	ρ, Ом·м
Вода	1	23	0.25	1	23	0.25	1	23	0.25
KZ	2	100	3	2	11	3	2	11	3
				3	15	3	3	15	10
				4	74	3	4	74	3
K ₁	3	174	4	5	174	4	5	174	4
J ₂ -J ₃	4	227	4	6	227	4	6	227	4
P ₂ -T ₃	5	1862	7	7	1862	7	7	1862	7
P ₁ -P ₂	6	377	10	8	377	10	8	377	10
Опорный	7	∞	1000	9	∞	1000	9	∞	1000

*- мощность

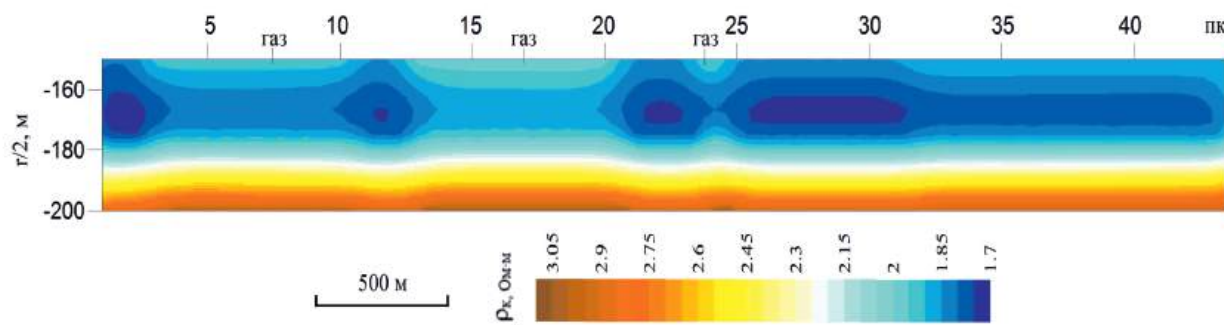
▲ Табл. 1. Параметры модели, адаптированной для поисков приповерхностного газа.

Представленную на рис. 1-б установку для инженерных изысканий нетрудно реализовать на практике, а набор электродов X1-Xn позволяет использовать любые комбинации разносов MN, в зависимости от поставленной геологической задачи. Глубинность (z) проведения исследований такой установкой на постоянном токе определяется по формуле:

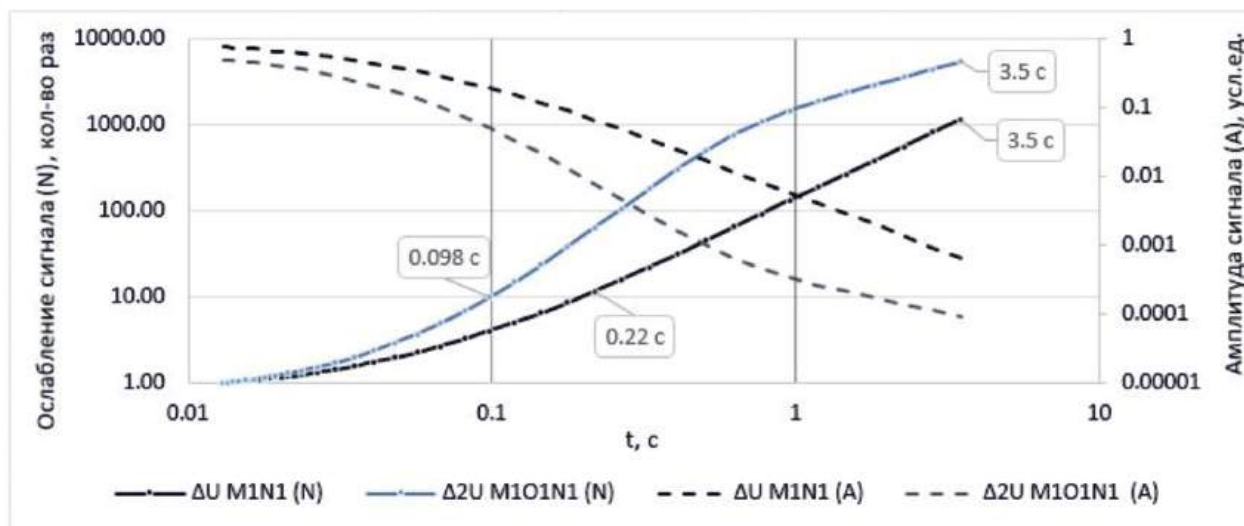
$$z = \frac{r}{2} = \frac{\frac{AB}{2} + BM + \frac{MN}{2}}{2}, \quad (1)$$

где AB – длина питающей линии, MN – длина приёмной линии, BM – расстояние между приёмной и питающей линиями, r – расстояние между центрами диполей AB и MN. Согласно [5] величина z может составлять от r/2 до r/4. Это значит, что для данной установки глубинность исследований при приёмной линии на 1-м разносе M1N1 может составлять 87.5 - 175 м (рис. 1-б).

По моделям с помощью программы ESDesigner были получены параметры ΔU и Δ2U, и рассчитано кажущееся сопротив-



▲ Рис. 3. Псевдоразрез распределения кажущегося сопротивления (ρ_k) по профилю EM0606.



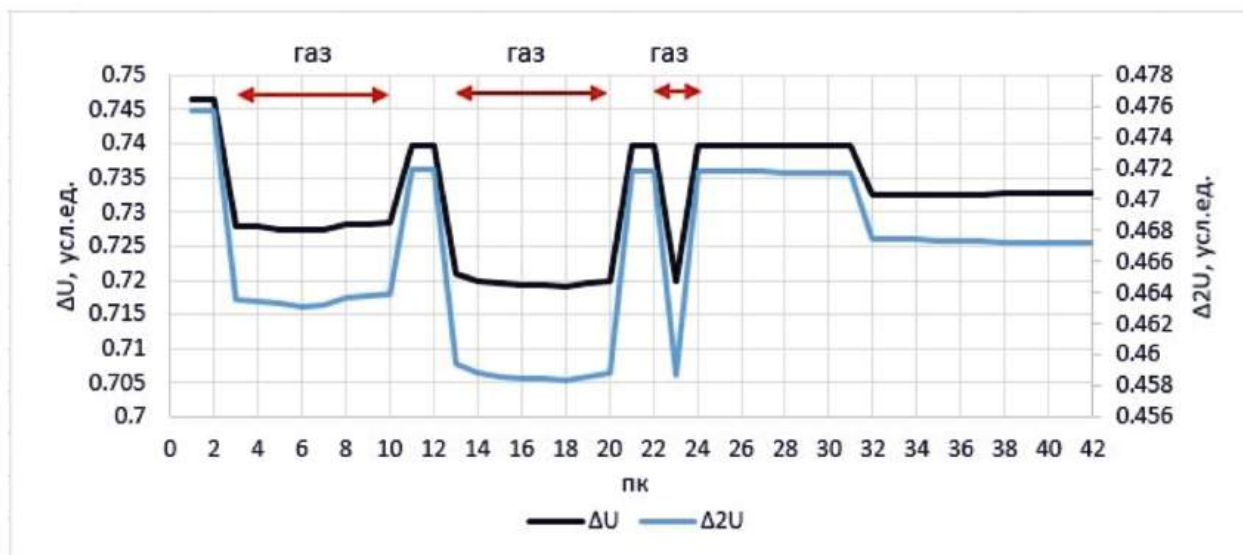
▲ Рис. 4. Графики изменения интенсивности сигналов ΔU и $\Delta 2U$ с течением времени спада.

ление. На рис. 3 показан псевдоразрез по детализированному профилю EM0606, построенный для разности толщин ГГ 15 м и обозначены участки с наличием приповерхностного газа, которые уверенно фиксируются повышением сопротивления в самой верхней части разреза. На графиках, представленных на рис. 4 и построенных для пикета, расположенного в районе ГГ, сплошными линиями показана величина ослабления сигнала по отношению к его амплитуде в начале записи (начало записи - время спада 0.0128 – 0.0132 с), а пунктирными – сам сигнал в условных единицах. Показательно, что уже на временах 0.098 с (для $\Delta 2U$).

Амплитуда сигналов для установки А 300 В 100 М1 100 О1 100 N1 (разнос I) снижается в 10 раз. Становится очевидным, что доступная для уверенной регистрации в геоэлектрических параметрах

ΔU и $\Delta 2U$ информация о распределении в ВЧР приповерхностных залежей газа содержится на ранних временах спада. Для картопостроения был выбран диапазон времён 0.015 – 0.016 с, в пределах которого снижение амплитуды сигнала для ΔU и $\Delta 2U$, соответственно, составляет 5% и 7%.

На рис. 5 представлены графики распределения параметров ΔU и $\Delta 2U$. Пикеты с заданным сопротивлением 10 Ом·м в 3-м слое, которое имитирует присутствие приповерхностного газа, четко выделяются пониженными значениями ΔU и $\Delta 2U$. Графики практически идентичны, отличаются только абсолютными значениями сигнала, такая же закономерность наблюдается и на картах распределения параметров ΔU и $\Delta 2U$, что позволяет при рассмотрении результатов выборочно использовать любой из них.



▲ Рис. 5. Графики распределения значений разности потенциалов ΔU и конечной разности потенциалов $\Delta 2U$ на времени спада 0.0155 с при мощности газонасыщенных грунтов 15 м.

На втором этапе была осуществлена переобработка данных ДНМЭ за 2006 г. и проведено сопоставление площадного распределения параметров ΔU , $\Delta 2U$, $рк$ с имеющимися контурами газосодержащих грунтов и газовых аномалий, выделенных методами ССВР и СВР, а также со структурной картой по ОГ «β», контролирующему поверхность газонасыщенных грунтов (рис. 6).

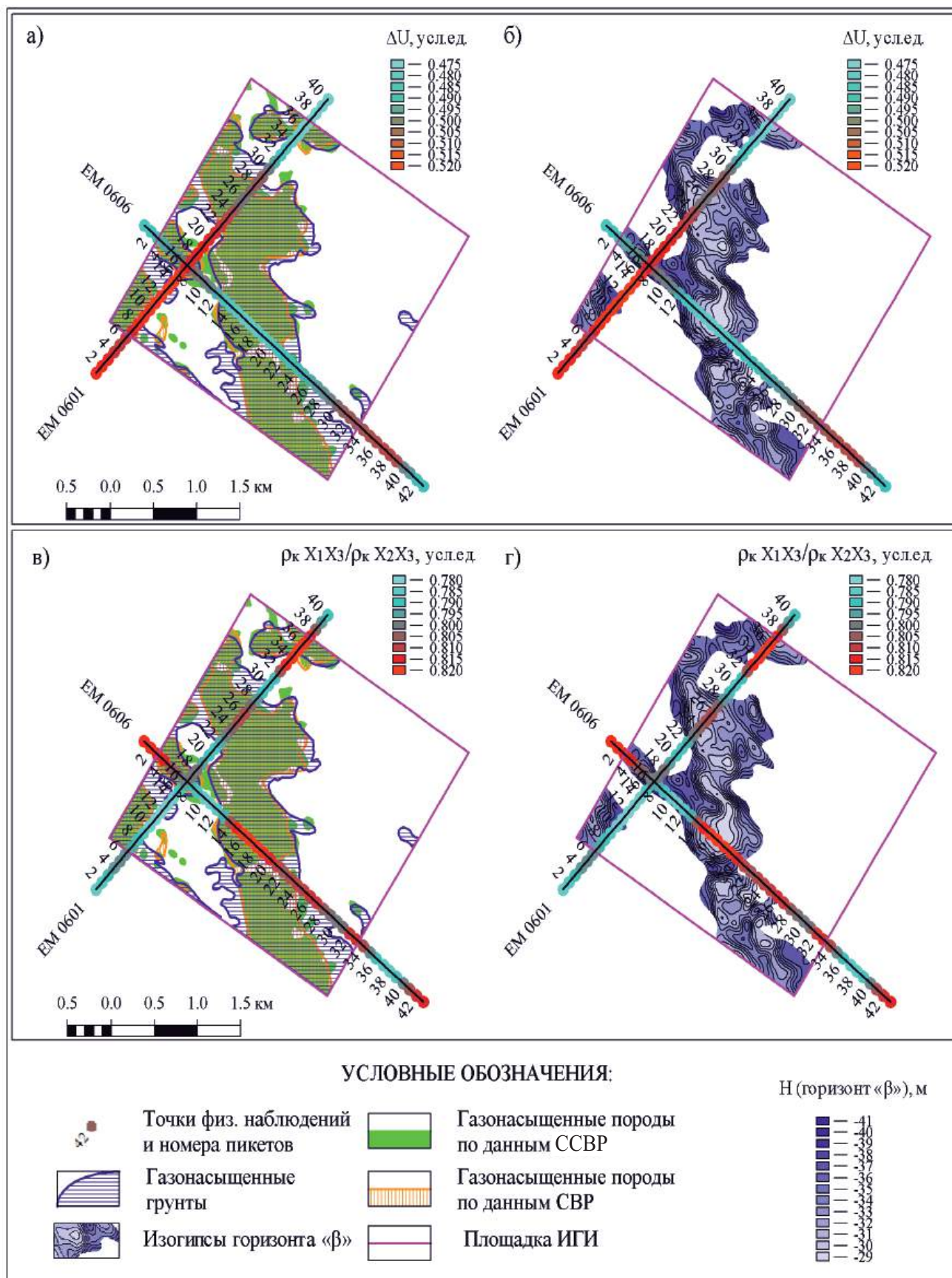
Обращает внимание прослеживаемая на качественном уровне достаточно хорошо выраженная приуроченность участков уменьшения значений ΔU , $\Delta 2U$ к газовым аномалиям и приподнятым участкам структурного плана горизонта «β». Распределение кажущегося сопротивления (использовался параметр отношения $рк$ на разных разносах) также хорошо коррелирует с поверхностью отражающего горизонта, возрастая на его приподнятых участках. Необходимость ввода параметра отношения $рк$ вместо истинных значений связана с ещё нереализованной записью тока в лог-файл на момент проведения работ 2006 года. Процедура деления позволяет устранить ошибки, связанные с неточными величинами тока, заложенными в

программу расчета $рк$.

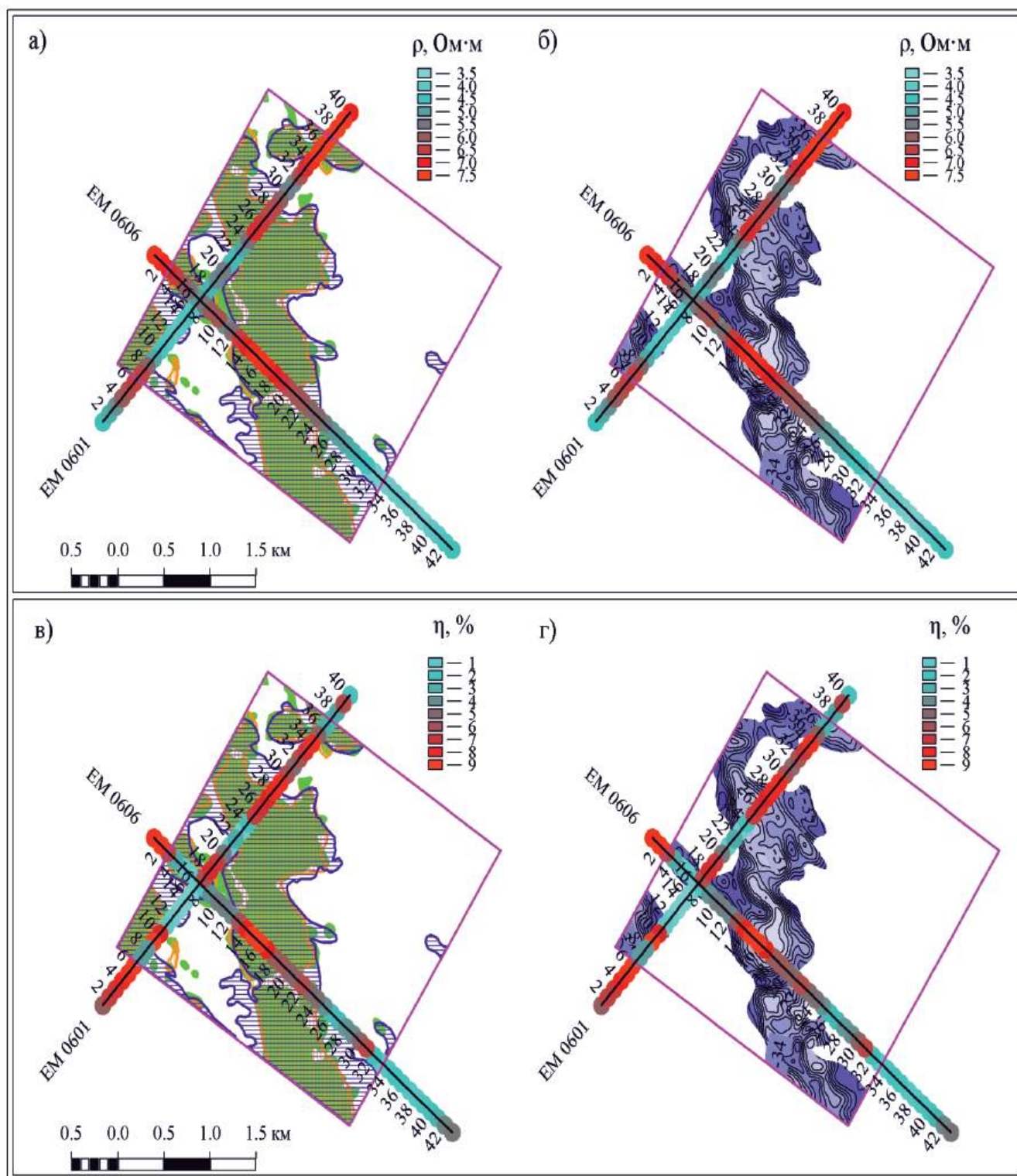
Таким образом, полученные данные хорошо согласуются с данными моделирования по синтетической модели и показывают принципиальную возможность использования непосредственно замеренных в ходе полевых работ (а значит и оперативно получаемых) параметров ΔU , $\Delta 2U$ и $рк$ для картирования приповерхностных скоплений свободного газа.

На третьем этапе проводилась инверсия на основе вышеописанной модели. Поскольку многократным решением обратной задачи было установлено наличие эквивалентных связей между геоэлектрическими параметрами тонкослоистой среды в ВЧР, в дальнейшем анализе рассматривались интегральные величины УЭС и ВП.

Для сопоставления данных инверсии с контурами газосодержащих грунтов и газовых аномалий, и со структурной картой по поверхности газонасыщенных грунтов было рассчитано среднее значение УЭС в интервале со 2-го по 4-й геоэлектрические слои (рис. 7-а, б). При сопоставлении местоположения газовых аномалий с участками повышенных



▲ Рис 6. Сопоставление распределения ΔU (а, б) и ρ_k (в, г) с газовыми аномалиями, выделенными методами ССВР и СВР (а, в), и со структурной картой отражающего горизонта «в», контролирующего поверхность газонасыщенных грунтов (б, г).



▲ Рис. 7. Сопоставление распределения УЭС (а, б) и ВП (в, г) с газовыми аномалиями, выделенными методами ССВР и СВР (а, в), и со структурной картой отражающего горизонта «в», контролирующего поверхность газонасыщенных грунтов (б, г).

значений УЭС, как и в случае сопоставления с ΔU , $\Delta 2U$ и ρ_k , прослеживается достаточно устойчивая взаимосвязь. Над скоплениями газа, картируемыми сейсмическими методами, наблюдается

возрастание сопротивления в ВЧР. Менее четкая картина наблюдается при сопоставлении газовых скоплений со схемой распределения коэффициента поляризуемости (рис. 7-в, г).

Ситуацию можно описать следующим образом: реакция параметра η на присутствие газа в ВЧР присутствует, но для определения точного местоположения источников ВП, по всей видимости, данная установка оказалась не приспособлена. Последнее может быть объяснено двумя причинами: во-первых, на более ранних окнах, на которые поступает информация от поляризующихся объектов в ВЧР, соотношение полей индукции и ВП ещё велико, и для повышения точности инверсии данных необходимы полное понимание конфигурации установки (обеспечивается датчиками GPS на судне и в хвостовой части косы) и контролируемое заглубление ниже линии волнения моря, что по технологии 2006 года ещё не могло быть обеспечено. И, во-вторых, параметры установки были адаптированы на повышение глубинности исследований, что не в полной мере подходит для изучения ВП в ВЧР.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что:

1) Повышение сопротивления в приповерхностной части разреза, связанное с присутствием газосодержащих грунтов, оказывает влияние на параметры ΔU и $\Delta_2 U$. Участки с наличием газа выделяются понижением значений этих параметров, имеют амплитуду и контрастность, достаточные для уверенной регистрации на ранних временах спада.

2) Повышение кажущегося сопротивления ρ_k на небольших глубинах в ВЧР может быть связано с присутствием газосодержащих грунтов.

3) Для оперативной оценки площадей, расположенных в аналогичных геолого-геофизических условиях, на наличие приповерхностного газа можно использовать параметры ΔU и/или $\Delta_2 U$

(регистрируются в режиме переходных процессов) и ρ_k (рассчитывается в режиме работы на постоянном токе).

Максимальный эффект при проведении инженерных работ, выявления и ранжирования опасностей может быть достигнут:

1) Применением комплекса сейсмических и электроразведочных методов;

2) При проведении электроразведочных работ с использованием режимов на постоянном токе и переходных процессов, позволяющих провести оперативный прогноз на основе параметров ρ_k , ΔU и $\Delta_2 U$ (запись ведется одновременно);

3) Соблюдением этапности проведения работ:

- Этап оперативной оценки. Сначала исследуется вся площадь и проводится анализ данных, не требующих проведения длительной обработки: строятся карты и разрезы ρ_k , карты ΔU и/или $\Delta_2 U$, позволяющие выявить и оконтурить «аномальные» участки площади, на которых возможно наличие ММП и/или УВ. Полученные полевые данные подготавливаются для загрузки в программу инверсии;

- Этап детальной интерпретации. На этом этапе в аномальных областях (с выходом профилей в нормальное поле) с привлечением материалов сейсморазведки строится геоэлектрическая модель и проводится инверсия данных становления поля, в результате которой изучается распределение параметров УЭС и ВП с целью разбраковки выявленных аномалий на связанные с ММП и УВ;

4) Использованием многоэлектродной установки с возможностью изменения коммутации между электродами в приемной линии и размерами питающей линии 300–500 м;

5) Проведением численного моделирования с использованием синтетических моделей, построенных на основе всей имеющейся априорной информации с целью оценки возможностей по выявлению искоемых объектов в геоэлектрических условиях, близких к условиям предполагаемого района работ. Моделирование целесообразно проводить как до начала полевых работ (для предварительного выбора параметров электроразведочной установки и аппаратуры), так и на последующих этапах по мере необходимости для уточнения полученных результатов.

Учитывая особую важность опережающего изучения строения ВЧР на шельфе до начала инженерно-геологических изысканий [1], авторами рекомендуется уже на этапе планирования поисковых электроразведочных работ на углеводороды предусматривать возможность оценки верхней части разреза с целью выявления опасных геологических процессов и явлений для бурения.

Литература

1. Горбачев С.В., Терёхина Я.Е., Токарев М.Ю., Соловьева М.А., Буланова И.А. О необходимости изучения верхней части разреза на начальных этапах геологоразведочных работ на шельфе Печорского моря с применением методики специальной обработки и интерпретации // Геофизика. 2025. №3. С. 11-19.
2. Марков С.Ю., Горбачев С.В., Иванов С.А., Мятчин О.М., Нурмухамедов Т.В., Смилевцев Н.П., Ситников А.А. Повышение надежности прогноза углеводородов на шельфе Печорского моря по результатам переинтерпретации электроразведочных работ в комплексе с сейсморазведочными данными // Геофизика. 2021. №3. С. 25-33.
3. Рокос С.И. Газонасыщенные отложе-

ния верхней части разреза Баренцева-Карского шельфа: Дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.28 / Рокос Сергей Игоревич; Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН. – Мурманск, 2009. – 35 с.

4. Рокос С.И. Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и южной части Карского морей // Инженерная геология. 2008. №4. С. 22-28.

5. СП 504.1325800.2021. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. – М., 2021. – 168 с.

6. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Т. II. Малоглубинная электроразведка / Под ред. проф. В.А. Шевнина, доц. А.А. Бобачева. – М.: МГУ, 2013. – 123 с.

7. Legeydo P.Y. Report on the results of MATEM technology testing at the Barents Sea shelf, 2006.

8. Veeken P.C.H. et al. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration / Veeken P.C.H., Legeydo P.J., Davidenko Y.A., Kudryavceva E.O., Ivanov S.A., Chuvaev A. Geophysics, vol.74, No.2 (march-april.2009).