На правах рукописи

Куликова Наталья Владимировна

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ МАЛОГЛУБИННОЙ ГЕОФИЗИКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург – 2021 год

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук,
Данильев Сергей Михайлович

Официальные оппоненты:

Куликов Виктор Александрович
доктор геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра геофизических методов исследования земной коры, профессор;

Бурлуцкий Станислав Борисович
кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра грунтоведения и инженерной геологии, доцент.

Ведущая организация – Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт "Ленметрогипротранс", г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 28 июня 2021 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета ГУ 2020.10 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на веб-сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 апреля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета — СЕНЧИНА Наталия Петровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Инженерно-геологические изыскания являются основой для проектирования и строительства ответственных промышленных объектов и должны обеспечить детальное изучение инженерно-геологических условий района предполагаемого строительства, включая выявление опасных геологических явлений и процессов. Для Санкт-Петербурга и Ленинградской области одним из опасных факторов в процессе производства инженерных изысканий и эксплуатации зданий и сооружений является биохимическое газообразование в грунтах [Р.Э. Дашко, 2008], которое связано с широким распространением в верхней части разреза (ВЧР) болотных и морских отложений, обогащенных органическими веществами, преобразованных под действием микробиологических процессов в горючие газы.

Инженерно-геологический разрез юго-западного побережья Финского залива очень неоднороден. Приповерхностные горизонты представлены моренной толщей, сложенной песчано-глинистыми породами с прослоями песка и включениями крупнообломочного материала. В связи со значительной изменчивостью разреза его детальное изучение является сложной задачей при выполнении инженерно-геологических изысканий, в том числе и при изучении приповерхностных газопроявлений. Инженерно-геологические работы дают точечную информацию о геологическом строении изучаемой территории. Оконтуривание газонасыщенной зоны на основании одних только данных бурения затруднительно. Проходка дополнительных скважин по сгущенной сети для детального изучения приповерхностного скопления газа не только затратна по времени и стоимости, но и небезопасна.

Применение в составе инженерно-геологических изысканий современных геофизических методик, базирующихся на томографических технологиях, позволяет с высокой детальностью изучить геологический разрез территории строительства, повысить достоверность поиска и локализации газонасыщенных областей и, следовательно, повысить информативность и безопасность выполнения инженерно-геологических работ. Приповерхностные скопления газа исторически вызывали большой интерес отечественных и зарубежных ученых (С.Г. Миронюк, С.И. Рокос,

Arntsen B. Anderson A. L., Hampton L. D, T. L. Armstrong, Zhou J.), в первую очередь как фактор поисков и разведки крупных газовых месторождений (Sheriff 2002). При разработке месторождений своевременное обнаружение скоплений газа имеет существенное значение для предупреждения аварийности вызванной внезапными выбросами газа в процессе бурения. Вопрос изучения приповерхностных газопроявлений в районах развития многолетнемерзлых пород освещен в работах В.С. Якушева и В.И. Богоявленского. Сейсмоакустические исследования газонасыщенных осадков в акваториях изложены в работах А.Е. Рыбалко, М.Ю. Токарева, Д.А. Субетто, М.И. Алешина, П.Ю. Беляева, В.А. Жамойда. Значительный вклад в изучение газонасыщенных грунтов на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области внесли Р.Э. Дашко, И.И. Краснов, Е.С. Руденко. Исследования утечек свалочного газа методами электротомографии проводились за рубежом (Dahlin T., Rosqvist H., Leroux V. Svensson, M. Lindsjö, M. Månsson, C-H. Johansson).

Перечисленные выше исследования рассматривают проблемы скоплений газа, приуроченных к крупным газовым месторождениям, хранилищам газа и оценки путей миграции и условия локализации. Выявление приповерхностных скоплений газа геофизическими методами применительно к задачам инженерной геологии, в литературе описано гораздо меньше, что обуславливает актуальность данной работы.

В настоящее время на Юго-Западе Ленинградской области на побережье Финского залива и прилегающей территории ведется строительство мощной газотранспортной системы, включающей линейные сооружения газопроводов, компрессорные и газораспределительные станции, объекты газоперерабатывающей промышленности. Для решения задачи по локализации газонасыщенных включений в песчано-глинистом разрезе на технологической базе инженерной геофизики в составе инженерных изысканий для строительства необходим методический подход, базирующийся на обоснованном и экономически рациональном комплексе геофизических методов.

Цель работы – обоснование оптимального комплекса методов малоглубинной геофизики для выявления приповерхностных скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

Цель, поставленная в диссертационной работе, достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ свойств песчано-глинистых грунтов для оценки возможности применения методов малоглубинной геофизики для локализации песчано-глинистых грунтов ВЧР с включением приповерхностных скоплений газа;
2. Построение физико-геологических моделей песчано-глинистых грунтов ВЧР с наличием приповерхностных скоплений газа;
3. Численное моделирование и полевые эксперименты для обоснования и верификации целесообразности комплексного подхода к интерпретации методов малоглубинной геофизики;
4. Разработка методики инженерно-геофизических исследований для выявления приповерхностных скоплений газа на основе комплексной интерпретации данных;
5. Апробация методики на площадке строительства объекта газотранспортной инфраструктуры.

Научная новизна.

1. Разработана комплексная физико-геологическая модель песчано-глинистых грунтов ВЧР, содержащих приповерхностные скопления газа, с целью обоснования применения отдельных технологий малоглубинной геофизики при решении задач локализации зон аккумуляции газа;
2. Обоснована целесообразность совместной интерпретации данных электротомографии и сейсмотомографии при инженерно-геофизических исследованиях, направленных на выявление и локализацию интервалов приповерхностного газонасыщения;
3. На основе результатов численного моделирования геофизических полей и результатов апробации комплекса электротомографии и сейсмотомографии установлена взаимосвязь декремента поглощения амплитуд сейсмических волн и величин удельного электрического сопротивления, характерных для газонасыщенных песчано-глинистых грунтов ВЧР.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. На основе результатов численного моделирования и полевых электротомографических и сейсмотомографических исследований сформулированы диагностические признаки, служащие основой для локализации интервалов приповерхностного скопления газа в

песчано-глинистых грунтах ВЧР, характерных для Юго-Запада Ленинградской области.

2. Предложенный комплексный интерпретационный подход данных электро- и сейсмической томографии, базирующийся на анализе значений скоростей и декремента поглощения сейсмических волн, удельного электрического сопротивления, позволяет повысить достоверность и информативность результатов выявления локальных неоднородностей ВЧР и приуроченность их с скоплениями газа.

3. Включение комплекса сейсмической и электрической томографии в состав инженерно-геологических изысканий для строительства объектов газотранспортной инфраструктуры позволяет снизить геологические риски за счет своевременного обнаружения потенциально опасных участков развития газодинамических процессов ВЧР.

Методология и методы исследования.

В рамках исследований изучены инженерно-геологические условия песчано-глинистых грунтов Юго-Запада Ленинградской области, установлена их взаимосвязь с геоэлектрическими и сейсмическими свойствами. Результаты обобщения геофизических и инженерно-геологических исследований песчано-глинистых грунтов Юго-Запада Ленинградской области легли в основу для разработанной физико-геологической модели, на базе которой выполнено численное моделирование геофизических полей с последующей обработкой электроразведочных данных по методике геоэлектротомографии и томографической обработкой кинематических и динамических параметров волнового сейсмического поля. Базой для формирования диагностических признаков наличия приповерхностного скопления газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР, характерных для Юго-Запада Ленинградской области, служит комплексный интерпретационный подход данных электро- и сейсмотомографических исследований. Верификация результатов исследований опирается на результаты полевых электро- и сейсмотомографических работ, целевое назначение которых выявление неоднородностей, связанных с локальными скоплениями газа в песчано-глинистых грунтах. При выполнении полевых геофизических работ применялись сейсмостанции Эллисс-3 и электроразведочная аппаратура СКАЛА-48. В процессе моделирования и обработки геофизических данных использовались программные комплексы: Res2Dmod, Res2DInv

(Geotomo Software), ZONDST2D (А.Е. Каминский), RadexPro Plus (ООО «ДЕКО–ГЕОФИЗИКА СК»), XTomoLM (XGeo).

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплекс электротомографии и сейсмотомографии позволяет локализовать зоны газонасыщения в песчано-глинистых грунтах верхней части разреза, что доказано результатами математического моделирования, выполненного на базе разработанной физико-геологической модели.

2. Анализ распределения декремента поглощения амплитуд сейсмических волн для интервалов повышенных значений удельного электрического сопротивления позволяет интерпретировать неоднородности песчано-глинистых грунтов верхней части разреза, как участки газонасыщения.

3. Разработанный и опробованный на практике комплексный подход, базирующийся на данных электротомографии и сейсмотомографии, обоснованный методическими приемами совместной интерпретации, обеспечивает выявление неоднородностей песчано-глинистых грунтов, связанных с развитием опасных газодинамических процессов.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности обоснована достаточным объемом натурных исследований, результатами численного моделирования геофизических полей и их сопоставления с результатами полевых наблюдений, лабораторных данных, а также использованием современной аппаратуры и программного обеспечения для обработки и интерпретации данных геофизических исследований.

Эффективность предлагаемых методических подходов для задач проектирования и строительства объектов газотранспортной инфраструктуры подтверждается результатами инженерно-геологических работ.

Основные научные результаты докладывались и обсуждались на кафедре Геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета, а также на международных конференциях: 58 Международной конференции молодых ученых, г. Краков, «Инженерная и рудная геофизика 2018» (14th Conference and Exhibition; Engineering and Mining Geophysics 2018), Engineering and Mining Geophysics 2018, «Инженерная и рудная геофизика 2019» (Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and

Exhibition), 16-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2020».

Публикации.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 1 статье, размещенной в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях, размещенных в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Личный вклад автора.

Все рассматриваемые автором положения диссертационной работы разработаны с личным участием автора.

Автор принимал непосредственное участие в разработке методики исследования, организации полевых инженерно-геологических и инженерно-геофизических исследований, камеральной обработке и интерпретации данных по объекту исследования.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов к ним, заключения и библиографического списка. Содержит 133 страницы машинописного текста, 46 рисунков, 11 таблиц, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 118 наименований.

Благодарности.

Автор выражает признательность и благодарность за помощь в подготовке диссертации научному руководителю к.г.-м.н. Сергею Михайловичу Данильеву. За консультации и помощь в работе над диссертацией автор благодарит д.т.н., профессора Владимира Васильевича Глазунова.

Автор благодарит заведующего кафедрой геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых д.г.-м.н., профессора Алексея Сергеевича Егорова, преподавателей и сотрудников кафедры за обсуждение, ценные советы и замечания в процессе работы над диссертацией.

Особую благодарность автор выражает: Андрею Игоревичу Куликову, Наталье Николаевне Ефимовой и Антону Юрьевичу Татарскому за помощь в процессе работы над диссертацией и содействие в опытно-методических исследованиях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрен генезис локальных скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР. Описаны известные газопроявления в четвертичных осадках, которые оказывают негативное влияние на здания и сооружения, построенные на таких грунтах. Показано, что газовые скопления в песчано-глинистых грунтах ВЧР на глубинах 10-50 м представлены преимущественно газами биогенного происхождения, состоящими в основном из метана с примесями азота. Скопления газа являются источником высокого геологического риска для строительства, так как вызывают разуплотнение и снижение несущей способности песчано-глинистых грунтов.

Для Санкт-Петербурга и Ленинградской области газогенерация метана в четвертичных отложениях наблюдается в межморенном микулинском горизонте, представленным глинами и суглинками с наличием органики. Газ накапливается в отдельных песчаных линзах неоднородных по составу моренных отложениях осташковского горизонта, перекрытых непроницаемыми грунтами, в результате чего создается избыточное давление в отдельных интервалах разреза, и, в процессе бурения, из них могут происходить внезапные выбросы газа. Для предотвращения опасности, связанной со скоплениями газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР необходимо их выявление, в том числе и геофизическими методами на стадии инженерных изысканий участка строительства. В нормативной документации в достаточной мере не регламентировано выявление локальных скоплений газа и методика их исследования, в связи с этим, тематика данной работы является актуальной для практики инженерных изысканий для строительства.

Во второй главе проведен анализ влияния газонасыщения на изменение удельного электрического сопротивления и скоростей продольных и поперечных волн песчано-глинистого разреза с включением неоднородностей с целью построения электро- и

сейсмогеологических моделей песчано-глинистых грунтов с локальными скоплениями газа.

Для оценки газонасыщенности важнейшими физическими свойствами песчано-глинистого разреза будут пористость и влажность. Изменение пористости связано с глинистостью, так как по мере заполнения порового пространства песка глинистыми частицами пористость будет уменьшаться, соответственно, будет уменьшаться и УЭС. Для пористых грунтов значительное влияние на величину УЭС будет оказывать тип флюида. Для песчаных водонасыщенных грунтов величина УЭС будет значительно меньше, чем при заполнении пор газом, так как газообразные углеводороды обладают очень высокими удельными сопротивлениями, превышающими 10^8 Ом·м.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования геофизических полей для различных типов песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа. С учетом имеющейся геолого-геофизической информации и на основании опытных работ определены свойства отдельных слоев инженерно-геологического разреза, взятого за основу физико-геологической модели (ФГМ) (Рисунок 1).

Для расчета геофизических полей рассматриваются следующие типы включений локальных неоднородностей в песчано-глинистом разреза:

1. Включение крупнообломочного материала с песчанистым заполнителем в толще суглинков (перекрывающие моренные отложения);
2. Локальные включения линз газонасыщенных песков, прослои водонасыщенных песков, подстилающая толща глинистых пород (межморенные отложения);
3. Включение крупнообломочного материала с глинистым заполнителем в толще суглинков (подстилающие моренные отложения).

Для оценки возможности применения электрической томографии был выполнен расчет разреза кажущегося удельного сопротивления (КУЭС) с последующей инверсией по методике 2D-электротомографии с использованием трехэлектродной

комбинированной установки с разносами АО от 7.5 м до 117.5 м, что обеспечило хорошее горизонтальное покрытие и достаточную глубинность.

Результаты моделирования приведены на рисунке 2 и рисунке 3.

Анализ результатов инверсии геоэлектрических полей позволяют сделать ряд выводов:

- невозможно с достаточной точностью оценить начальное сопротивление модели;
- невозможно восстановить контур зоны повышенных сопротивлений относительно вмещающих грунтов, наибольшее значение УЭС составляет около 260 Ом·м, при заданном УЭС 500 Ом·м;
- горизонтальные размеры объекта и контраст сопротивлений восстанавливаются достаточно хорошо и позволяют выделить аномалию повышенных значений УЭС.

Таким образом, на основании данных только электроразведки невозможно интерпретировать аномалии повышенных значений УЭС, что еще раз подтверждает необходимость комплексирования геофизических методов для решения поставленной задачи.

Из-за наличия в геологическом разрезе скоплений валунно-галечного материала возникает неоднозначность интерпретации областей повышенных значений УЭС (до 500 Ом·м). Для повышения однозначности интерпретации необходим анализ скоростей поперечных волн, который позволяет выделить высокоскоростные аномалии, связанные со скоплениями валунно-галечного и крупнообломочного материала. Для этого выполнялось моделирование времен первых вступлений поперечных волн для песчано-глинистого разреза с включением локальных неоднородностей, представляющих собой газонасыщенную песчаную линзу и скопление гравийно-галечного материала. На годографах локальная неоднородность выделяется в виде снижения времени первых вступлений поперечных волн и восстанавливается с достаточно высокой точностью в процессе инверсии (Рисунок 4). По результатам моделирования поля скоростей поперечных волн можно сделать вывод, что на скоростных разрезах локальные аномалии

исследуемого песчано-глинистого разреза выделяются с достаточно высокой точностью, что позволит более надежно интерпретировать аномалии повышенных значений УЭС и приурочить их к интервалам локальных скоплений газа.

На основании проведенного моделирования и анализа результатов инверсии геоэлектрических и скоростных разрезов сформулировано **первое защищаемое положение:** «Комплекс электротомографии и сейсмотомографии позволяет локализовать зоны газонасыщения в песчано-глинистых грунтах верхней части разреза, что доказано результатами математического моделирования, выполненного на базе разработанной физико-геологической модели».

В четвертой главе приводится обоснование методики комплексирования электроразведки и сейсморазведки для выявления газонасыщенных песчано-глинистых отложений, а также рассматриваются методические приемы обработки и интерпретации данных геофизических исследований.

В результате проведения электроразведочных работ возможно дифференцировать дисперсные грунты по удельному электрическому сопротивлению и выделить линзы или прослои песков с аномально высокими значениями УЭС, не характерными для геологического разреза района работ. Сложность интерпретации связана с наличием в разрезе скоплений крупнообломочного гравийно-галечного материала, приуроченного к ледниковым отложениями осташковского горизонта.

Для уточнения природы аномалий высокого удельного электрического сопротивления необходимо комплексирование с методом сейсморазведки, по результатам которого возможно интерпретировать скопления крупнообломочного гравийно-галечного материала, так как они будут выделяться на сейсмических разрезах более высокими скоростями поперечных волн по сравнению с вмещающими песчано-глинистыми грунтами. Сейсморазведка позволяет по распределению скоростей получить необходимую для решения поставленной задачи информацию, и интерпретировать выявленные высокоомные аномалии как скопления крупнообломочного материала.

Из анализа скоростей продольных и поперечных волн для участка исследований, проведенного на этапе моделирования видно, что при интерпретации данных сейсморазведки возникают следующие сложности:

– ограниченные возможности применения продольных волн из-за слабого контраста скоростей в песчано-глинистом разрезе;

– высокий уровень грунтовых вод (УГВ), в результате чего на томографических разрезах по продольным волнам проявляется сильная преломляющая граница УГВ;

– необходимость использования данных сейсморазведки на поперечных волнах, так как изменение влажности и даже переход в состояние полного водонасыщения не оказывает практически никакого влияния на скорость поперечных волн [Огильви];

– низкий контраст скоростей поперечных волн и неоднородное строение ВЧР также является осложняющим фактором, затрудняющим процесс интерпретации.

Если в области повышенных значений удельного электрического сопротивления скорость поперечной волны возрастает, эта аномалия связана, с высокой степенью вероятности, с наличием включений крупнообломочного материала (валунов, гравия и щебня).

В случае, локального понижения Vs можно сделать предположение, что данная аномалия УЭС связана с водонасыщенными или газонасыщенными песками, так как влияние состава, заполняющего поры флюида на скорость поперечных волн проявляется только за счет изменения литологического состава грунтов и, следовательно, на скорости поперечных волн водо- и газонасыщение грунтов оказывает слабое влияние. Результаты моделирования показали, что при малых размерах газонасыщенных песчаных линз они не всегда будут контрастно выделяться на фоне вмещающих пород.

С целью корректности локализации газонасыщенных пород, наряду с традиционными видами томографических 2D инверсий, опробована технология амплитудной томографии, позволяющая получить оценку пространственного 2D распределения значений декремента поглощения в изучаемом геологическом разрезе. Этот

результат достигается путем обработки данных сейсморазведки по методике амплитудной томографии. Методика позволяет получить разрез декремента поглощения в среде из значений амплитуд первых вступлений на основе предварительно полученного скоростного разреза.

Поскольку практических результатов оценки коэффициента затухания и декремента поглощения для осадочных пород, формирующих верхнюю часть разреза, крайне мало, интерпретация разрезов декремента поглощения амплитуд поперечных волн проводилась на основании данных инженерно-геологического бурения и сопоставлении данных с участками, где газопроявления не наблюдались.

Изложенные выше ключевые признаки для интерпретации данных геофизических исследований песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа обобщены в виде таблицы 1, которая объединяет признаки-индикаторы наличия скоплений газа в разрезе по характеру изменения геофизических параметров – удельного электрического сопротивления, скорости поперечных волн, декремента поглощения.

Таблица 1 – Критерии для интерпретации данных геофизических исследований песчано-глинистого разреза с наличием локальных неоднородностей

Интервал песчано-глинистого разреза	УЭС	V_s	ϑs декремент поглощения
Суглинки, глины с включениями обломочного материала	Повышение, аномально высокие значения	Повышение	Незначительные изменения
Водонасыщенные пески	Незначительные изменения	Незначительные изменения	Незначительные изменения
Газонасыщенные пески	Повышение, аномально высокие значения	Незначительное понижение	Повышение

В подтверждении описанных методических приемов по интерпретации данных геофизических исследований для выявления локальных скоплений газа в ВЧР на Рисунке 5 приведены результаты

совместной обработки данных электроразведочных и сейсморазведочных работ в интервале профиля ПК40 – ПК190, на котором в районе ПК75 находится скважина №ХХ1, в которой газопроявления наблюдались в течении длительного времени.

На геоэлектрическом разрезе выделена высокоомная аномалия (более 500 Ом·м) в интервале ПК65 – ПК140 (Рисунок 5а). По данным бурения скважины №ХХ1 в этой области были вскрыты суглинки с прослоями песка и супеси с включениями гравия. Нижележащий слой представлен водонасыщенными песками с включениями гравия и щебня. Из этих песков происходили выбросы газа, и на протяжении более чем года, фиксировались газопроявления: бурление воды в скважине, высокая концентрация метана над устьем скважины по данным замеров газоанализаторов.

Как видно, на приведенном интервале геоэлектрического разреза, диапазоны значений УЭС песков и суглинков перекрываются и однозначно расчленить литологический разрез по данным электротомографии затруднительно. Тем не менее, результаты электротомографии дают первый признак-индикатор области газонасыщения – аномально высокие значения УЭС.

Выполненные на этом же профиле сейсморазведочные работы, показали, что скорость распространения поперечных волн в этом интервале разреза меняется незначительно (Рисунок 5б). Понижение скорости поперечных волн, наблюдаемое в интервале ПК70 – ПК80 и в районе скважины №ХХ1 может быть связано как газонасыщением, так и со сменой литологии. В остальном интервале ПК65-ПК140, где по данным электротомографии была выделена высокоомная аномалия, наблюдается рост скорости поперечных волн, что однозначно свидетельствует о наличии в разрезе плотных грунтов (суглинков). Следовательно, результаты работ методом сейсмотомографии позволяют отнести ранее выявленные высокоомные аномалии к скоплениям валунно-галечного материала. В случае песчаных грунтов мы получаем второй признак-индикатор газонасыщенный зоны – незначительное снижение или неизменность скорости распространения поперечных волн.

На Рисунке 5в приведен результат инверсии методом амплитудной томографии. На разрезе хорошо выделяется область

возрастания декремента поглощения в интервале ПК70-ПК80 и скважины №ХХ1. Получен третий признак-индикатор наличия области газонасыщения – значительное возрастание декремента поглощения. В интервале разреза ПК130 – ПК170 наблюдается еще одна область повышенного затухания упругих волн. По данным электротомографии, удельные электрические сопротивления в этой области характерны для суглинков с включениями гравия и гальки (УЭС 50-100 Ом·м), а скорость поперечных волн плавно нарастает с глубиной, в связи с чем можно сделать вывод, что в данной зоне разрез представлен суглинками с включениями крупнообломочного материала, а затухание упругих волн происходит в результате рассеяния энергии волны на локальных неоднородностях.

По результатам анализа характерных признаков газонасыщенных песчано-глинистых отложений сформулировано **второе защищаемое положение**: «Анализ распределения декремента поглощения амплитуд сейсмических волн для интервалов повышенных значений удельного электрического сопротивления позволяет интерпретировать неоднородности песчано-глинистых грунтов верхней части разреза, как участки газонасыщения»

В пятой главе приведены результаты опробования, обоснованные в Главе 4, методики комплексных геофизических исследований, выполненных в рамках научно-исследовательских работ по выявлению интервалов возможного газопроявления на площадке проектируемого объекта газотранспортной инфраструктуры, расположенного на Юго-Западе Ленинградской области в Кингисеппском районе в долине реки Луга. Рельеф участка исследований представлен двумя разноуровневыми площадками – верхней и нижней, которые в значительной степени различаются по геологическому строению. На исследуемом участке был выполнен большой объем бурения инженерно-геологических скважин, глубиной до 75 м, что дает хорошее представление о геологическом строении разреза.

На верхней площадке, которая сложена суглинками с включениями гальки, щебня и дресвы, с редкими прослоями пылеватого песка, газопроявлений из скважин практически не наблюдалось, либо они были непродолжительными. По данным

электротомографии, эта часть характеризуется достаточно однородным строением, а высокоомные аномалии электрического поля в сочетании со скоростями поперечных волн могут быть проинтерпретированы, как скопления гравийно-галечного и валунного материала.

Нижняя ступень участка исследования отличается более неоднородным строением. В пробуренных скважинах вскрыты суглинки с включениями органики, линзы песка, а также скопления гальки, дресвы и щебня. Песчаные прослои встречаются на различных интервалах разреза и имеют различную мощность. Скопления газа приурочены к песчаным интервалам разреза, перекрытым пластичными суглинками и глинами, которые являются покрышкой для газа. По результатам бурения скважин на участке исследования было выявлено два интервала газопроявлений, относящихся к четвертичным отложениям. Первый газонасыщенный интервал разреза, приуроченный к ленинградскому горизонту, залегает на глубинах от 14.0 м, мощность пласта меняется от 1.5 до 3.1 м. Второй газонасыщенный горизонт вскрыт на глубине 20.0 м мощностью от 5.0 до 9.0 м. Оба интервала представлены водогазонасыщенными песками. Наиболее интенсивные газопроявления наблюдались в межморенном горизонте, где газогенерирующими отложениями являются микулинские суглинки и глины с высоким содержанием органики. Состав газа, определенный по результатам лабораторных исследований, является, в основном, метановым.

Электроразведочные работы позволяют оперативно изучить значительную территорию и выделить зоны повышенных значений УЭС в плане и разрезе. На первом этапе работ были проведены площадные исследования методом электротомографии по системе параллельных профилей, заложенных на всем участке исследования. На Рисунке 6 приведена карта, характеризующая распределение УЭС в плане для глубины, соответствующей абсолютной отметке минус 20 м (Рисунок 6). именно с этой глубины наблюдались наиболее интенсивные и продолжительные газопроявления в процессе бурения скважин. Эта карта позволяет наглядно оценить распределение высокоомных аномалий по площади. На карте показаны скважины,

которые в ходе инженерно-геологических изысканий в 2017 г. вскрыли газонасыщенные пески.

В интервалах профилей, характеризующихся наиболее высокими значениями удельного электрического сопротивления, были выполнены сейсморазведочные работы. Основной задачей сейсморазведочных работ было уточнение природы аномалий, поскольку они могут быть связаны как со скоплениями газа в песчаных отложениях, так и со включениями валунно-галечного материала в толще суглинков.

В результате сравнительного анализа данных геофизических исследований по площадкам установлено, что области газонасыщения характеризуются повышенными значениями декремента поглощения амплитуд поперечных волн. В интервале профиля, расположенного в нижней части участка исследования (Рисунок 7) выделяется зона аномально высоких значений УЭС (более 500 Ом·м), скорость V_s на этом участке не изменяется и наблюдается увеличение декремента поглощения. Таким образом. присутствуют все три охарактеризованных в главе 4 признака-индикатора наличия газонасыщенных песков. По результатам бурения газонасыщенные пески были вскрыты на глубине около минус 20 м.

Аналогичный комплекс геофизических исследований, выполненный на верхней площадке, не выявил участков, которые можно было бы отнести к потенциально опасным по наличию приповерхностных скоплений газа. Характерным примером может служить интервал профиля ПР6в, где была выделена зона повышенных значений УЭС в интервале ПК100 – ПК150 (Рисунок 8).

На основании результатов апробации методики комплексных геофизических исследований сформулировано **третье защищаемое положение**: «Разработанный и опробованный на практике комплексный подход, базирующийся на данных электротомографии и сейсмотомографии, обоснованный методическими приемами совместной интерпретации, обеспечивает детальное изучение неоднородностей песчано-глинистых грунтов, связанных с развитием опасных газодинамических процессов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – обоснование оптимального комплекса методов малоглубинной геофизики для выявления приповерхностных скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

Скопления газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР, представляют опасность для объектов строительства, поэтому для минимизации рисков, связанных с внезапными выбросами газа, необходима их локализация посредством проведения комплексных инженерно-геологических изысканий, включающих современные геофизические технологии.

Распространение газовых скоплений в песчано-глинистых грунтах ВЧР Ленинградской области, рассмотренных в данной работе, в значительной степени зависит от условий формирования и генетических типов отложений, что определяет их физические свойства и отражается в параметрах геофизических полей. При формировании физико-геологической модели песчано-глинистых грунтов ВЧР с наличием приповерхностных скоплений газа необходимо учитывать уникальные особенности исследуемого участка (территории), влияющие на геоэлектрические и упругие свойства для конкретных инженерно-геологических условий.

Комплексные геофизические исследования, включающие методы сейсморазведки и электроразведки позволяют решить задачу по выделению участков, возможно связанных с газопроявлениями, что подтверждается данными бурения. Совместная интерпретация данных по сочетанию характерных для соответствующих литологических комплексов дисперсных пород значений УЭС и скоростей поперечных волн позволяет приурочить неоднородности песчано-глинистых грунтов ВЧР Юго-Запада Ленинградской области к участкам газонасыщения. Включение в процесс обработки и интерпретации данных сейсморазведки методом преломленных волн амплитудной сейсмической томографии и анализ распределения декремента поглощения в разрезе значительно повышает качество интерпретации геофизических материалов и

более точно определяет целевые горизонты при изучении процессов газопроявлений.

Методика комплексных геофизических исследований для выявления потенциально опасных участков развития газодинамических процессов прошла апробацию на участке строительства объекта газотранспортной инфраструктуры для оценки газоопасности территории. Таким образом, в дальнейшем возможно использование данной методики на аналогичных объектах для предотвращения геологического риска при наличии локальных скоплений газа в верхней части разреза при производстве инженерно-геофизических исследований для строительства объектов повышенного уровня ответственности и транспортной инфраструктуры.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикация в издании из Перечня ВАК

1. Куликова, Н.В., «Моделирование данных сейсмотомографии и электротомографии для песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа», Куликова, Н.В., Данильев С.М., Ефимова Н.Н., Куликов А.И. Текст: непосредственный «Мониторинг. Наука и технологии» (МНТ). – 2020. № 2(44) – С.26 – 30

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования SCOPUS:

2. Kulikova, N.V. Comprehensive Geophysical Surveys of Gas Sand Deposits in the Leningrad Region/ Glazunov, V.V., Efimova, N.N., Kulikov, A.I. and Tatarskij, A.Y.//Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers; Source: Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition, Apr 2019, Volume 2019, p.1 – 5.

3. Kulikova, N.V. Geophysical monitoring of changes in the condition of the embankment base of a road by soil stabilization using explosion energy/ Glazunov, V.V., Gorodnova, E.V., Efimova, N.N. and Kulikov, A.I.//journal Engineering and Mining Geophysics 2018 – 14th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2018, Apr 2018, Volume 2018, p.1 – 9.

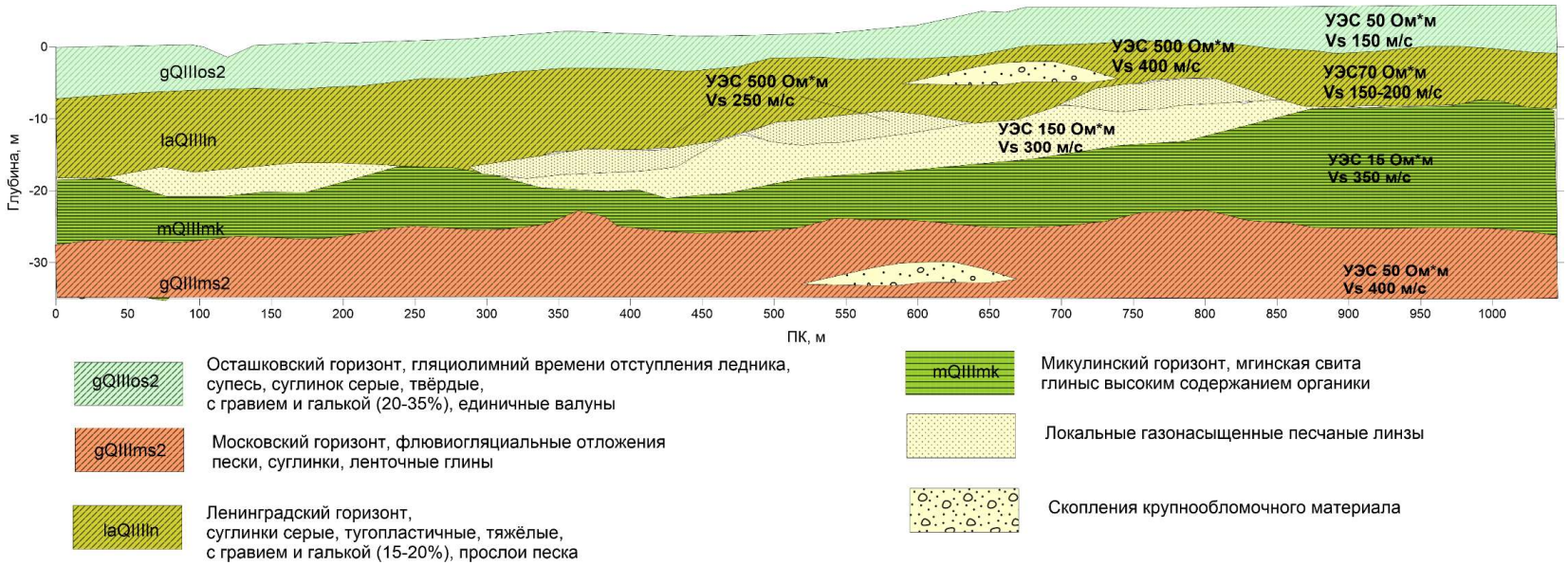

Рисунок 1 – Геолого-геофизическая модель песчано-глинистого разреза с включениями газонасыщенных линз и валунно-галечного материала

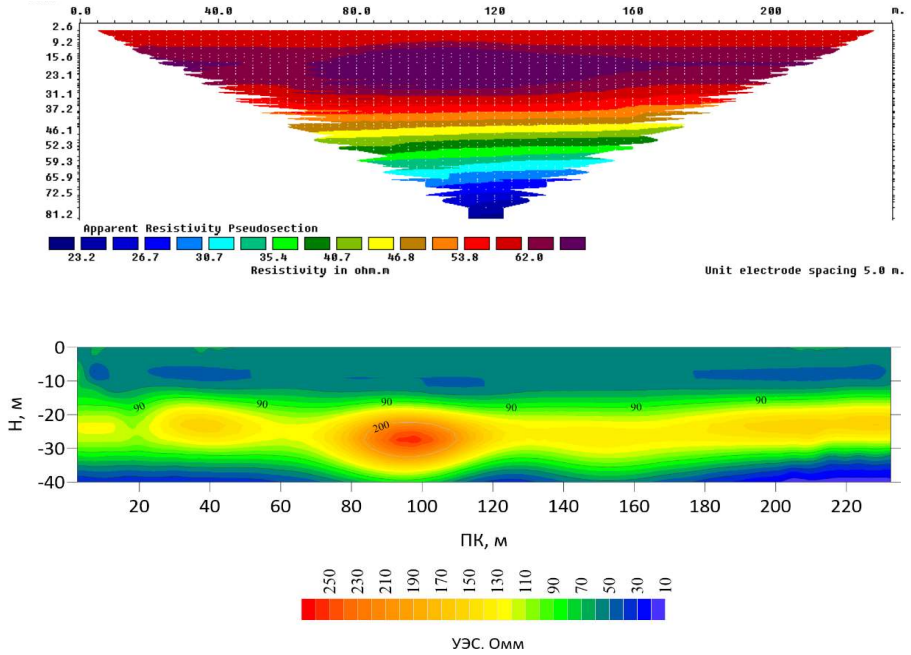

Рисунок 2 – Разрез кажущегося удельного сопротивления и геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии для модели песчано-глинистого разреза с включением локальной неоднородности (газонасыщенная песчаная линза)

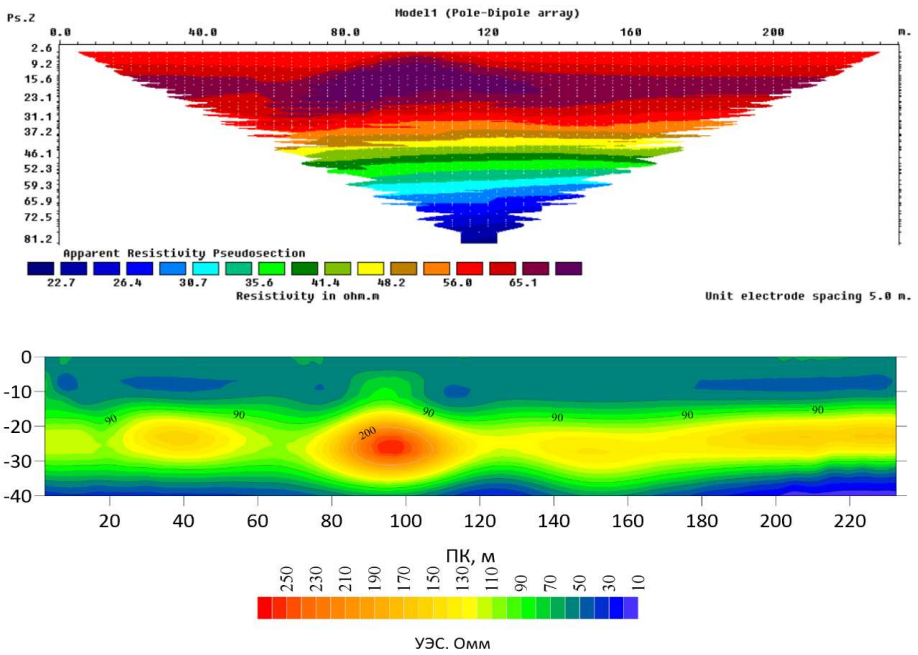

Рисунок 3 – Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии для модели песчано-глинистого разреза скопление валунно-галечного материала)

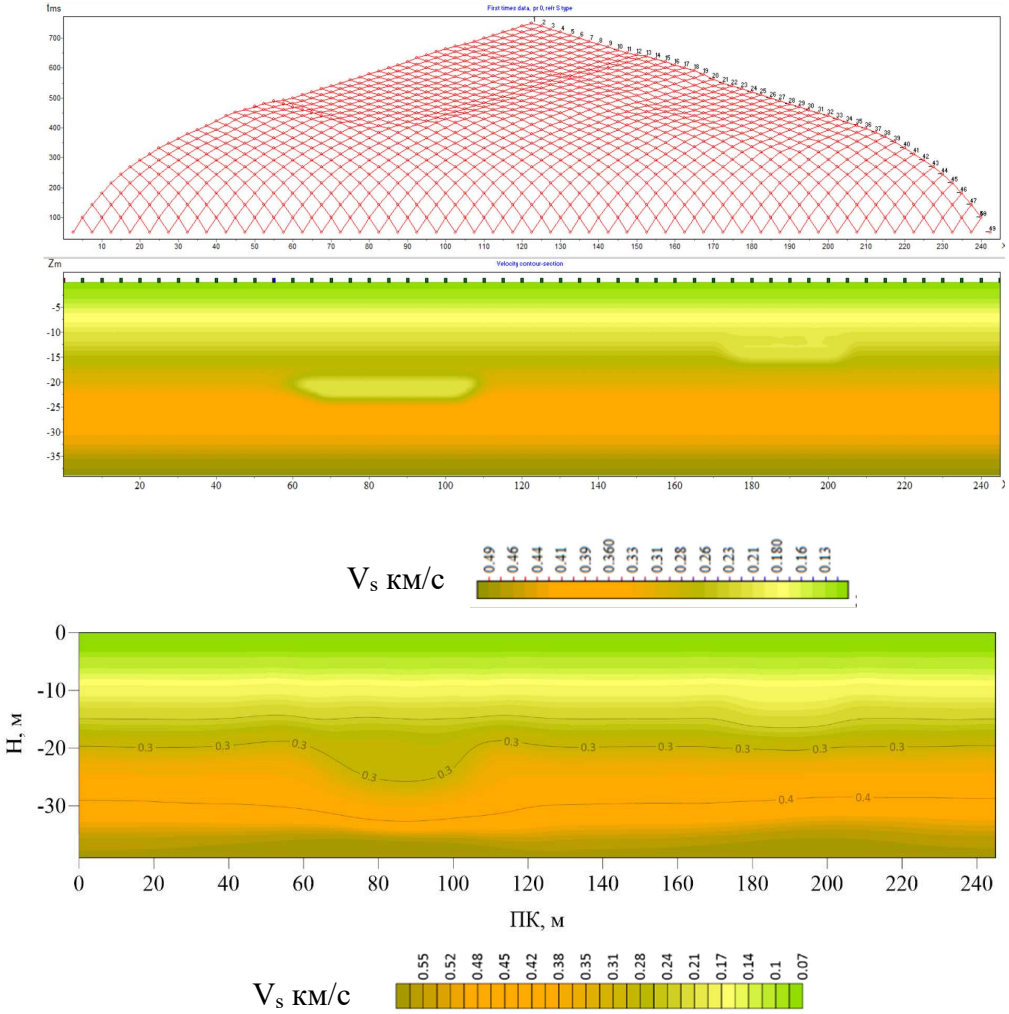

Рисунок 4 – Результат расчета скоростей поперечных волн для модели песчано-глинистого разреза с плавным нарастанием скорости по глубине и с включением неоднородностей, имитирующих песчаную газонасыщенную линзу. Сверху представлена исходная модель и годографы времен первых вступлений поперечных волн, нижний разрез – результат инверсии.

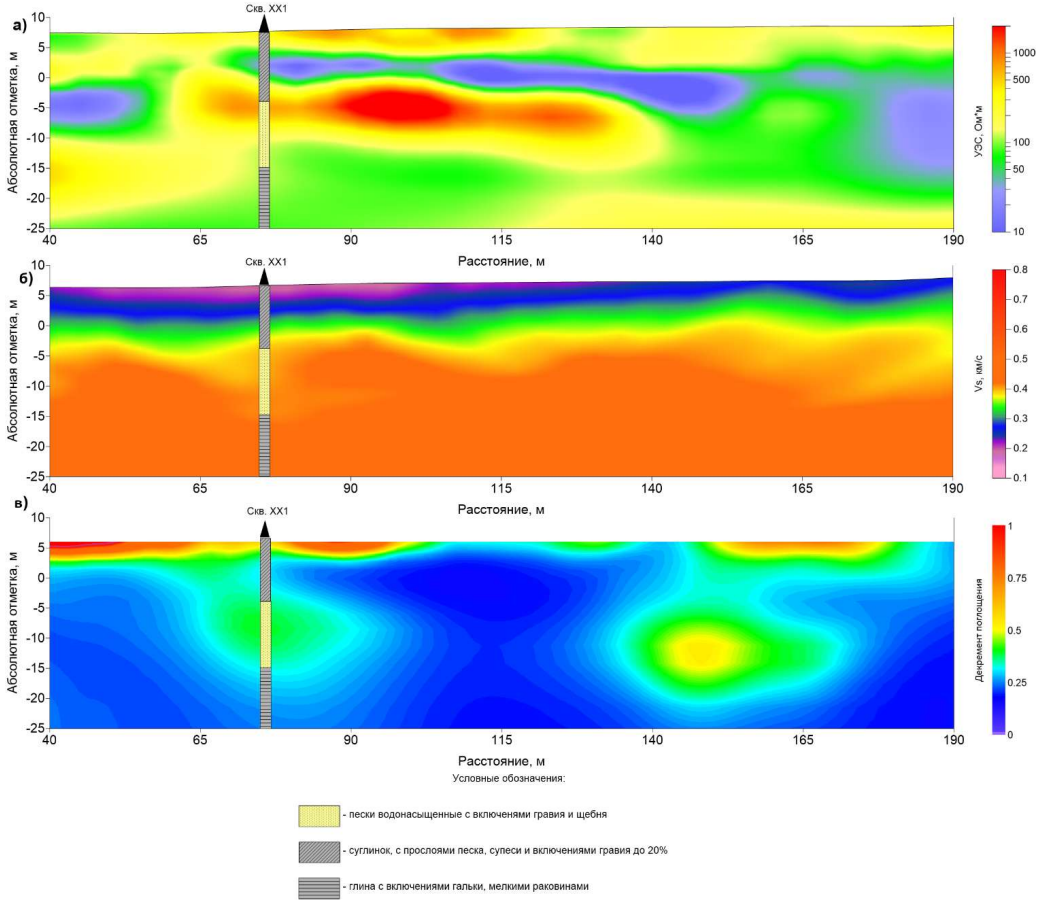

Рисунок 5 – Результаты геофизических исследований:
а) геоэлектрический разрез;
б) сейсмотомографический разрез;
в) разрез декремента поглощения

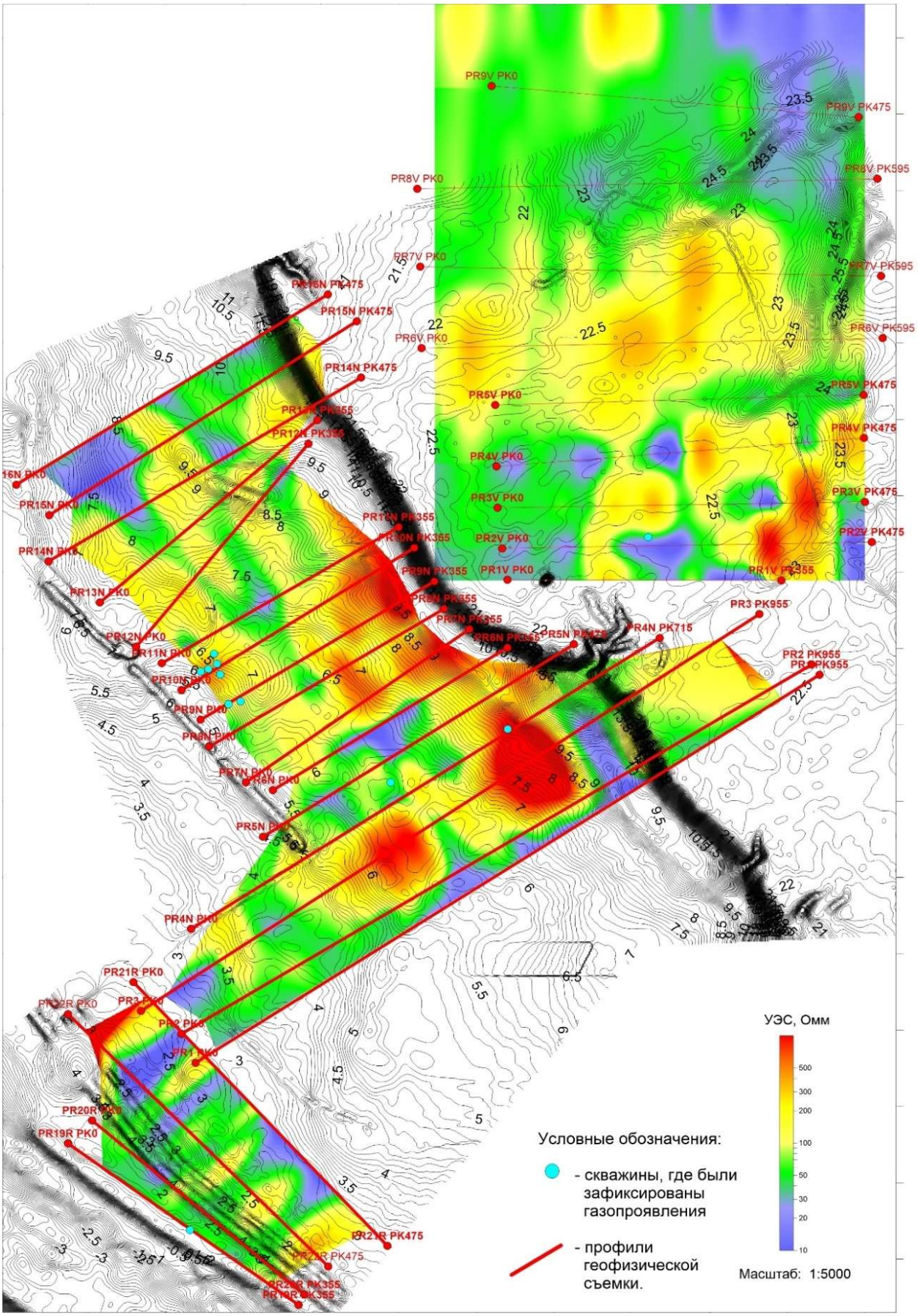

Рисунок 6 – Карта распределения УЭС по площади, построенная для глубины геоэлектрического разреза, соответствующего абсолютной отметке - 20 м

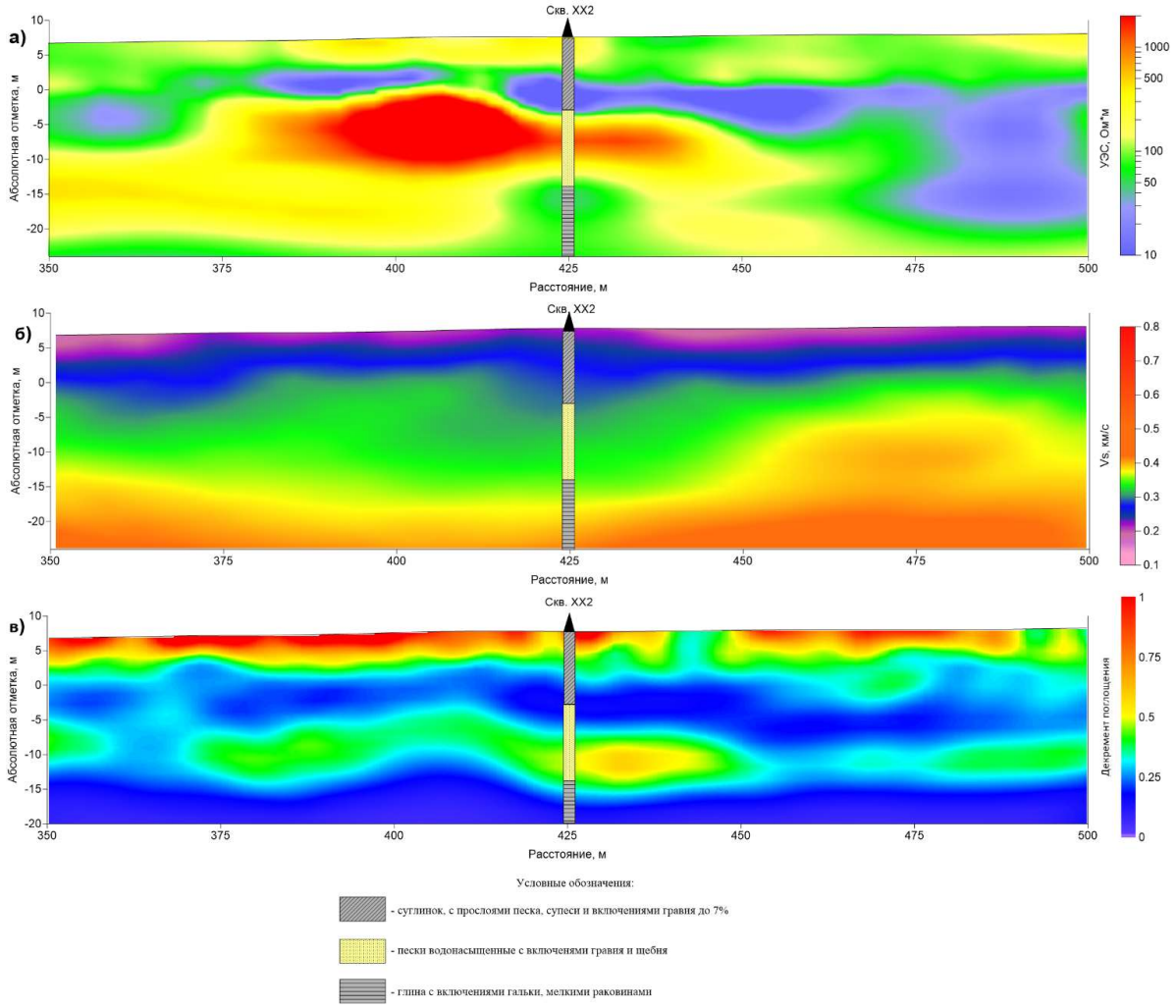

Рисунок 7 – Результат совместной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки по интервалу профиля ПР3н

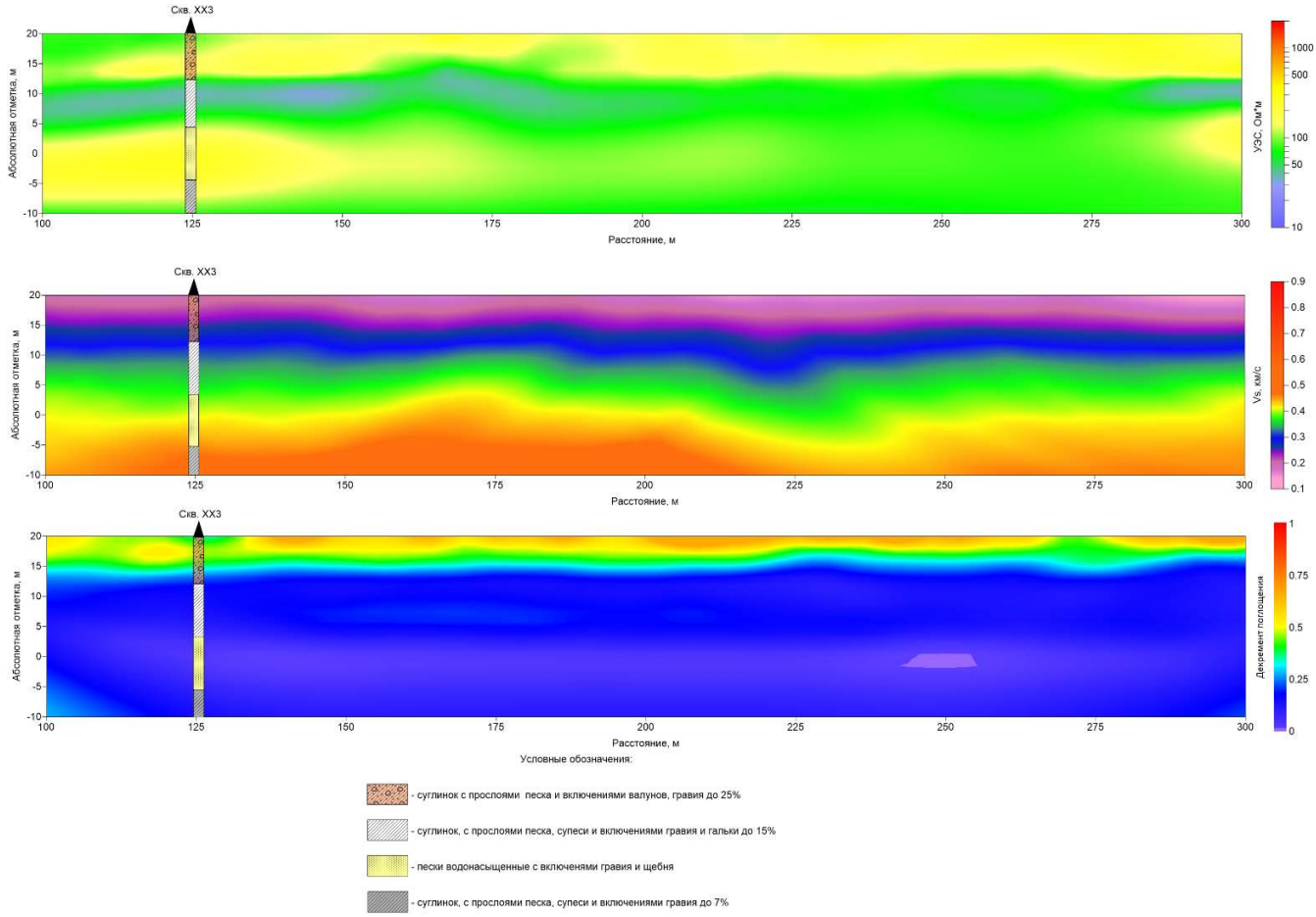

Рисунок 8 – Результат совместной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки по интервалу профиля ПР6в