

*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 – 2020 год**

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

Научный руководитель:

кандидат геолого-минералогических наук, доцент

*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 30 декабря 2020 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета ГУ 2020.5 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](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 30 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



СЕНЧИНА  
Наталья Петровна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности**

В настоящее время на Юго-Западе Ленинградской области ведется строительство мощной газотранспортной системы, включающей линейные сооружения газопроводов, компрессорные и газораспределительные станции, объекты газоперерабатывающей инфраструктуры. В процессе инженерных изысканий для строительства объектов повышенного уровня ответственности необходимо учитывать геологические риски, которые могут повлиять на надежность и безопасность эксплуатации.

Инженерно-геологические исследования, основанные на данных буровых работ, дают точечную информацию о геологическом строении изучаемой территории. В условиях резко меняющегося геологического разреза, наличия различных неоднородностей, линз, скоплений валунов применение только геологических изысканий не позволяет обеспечить необходимые детальность и качество изыскательских работ и выявить все особенности инженерно-геологического строения.

Геофизические исследования при инженерно-геологических изысканиях для проектирования объектов газотранспортной инфраструктуры направлены, как на изучение геологического строения проектируемой трассы газопровода, так и на выявление факторов, осложняющих строительство и эксплуатацию. Кроме таких опасных геологических процессов как карст, оползни и т. д., источником повышенного геологического риска могут быть процессы, связанные с особенностями геологического развития конкретной территории.

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 [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. Локальные скопления газа в верхней части геологического разреза создают потенциальную опасность производства инженерных изысканий для строительства, а также для эксплуатации зданий и сооружений.

Приповерхностные скопления газа вызывают 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]. На этапе разработки месторождений обнаружение скоплений газа имеет важное значение для предупреждения внезапных выбросов газа в процессе бурения. Вопрос изучения приповерхностных газопроявлений в районах развития многолетнемерзлых пород освещен в работах В.С. Якушева и В.И. Богоявленского. Исследования газонасыщенных осадков на акваториях сейсмоакустическими методами изложено 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, С-Н. Johansson).

В основном перечисленные выше исследования рассматривают проблемы скоплений газа, приуроченных к крупным газовым месторождениям, пути их миграции и условия накопления.

Выявление приповерхностных скоплений газа геофизическими методами применительно к задачам инженерной геологии в литературе описано гораздо меньше, что делает актуальной тему данной работы.

Для выявления локальных скоплений газа в процессе инженерных изысканий для строительства необходим методический подход, базирующийся на обоснованном и экономически оправданном комплексе геофизических методов для решения задачи по локализации газонасыщенных включений в песчано-глинистом разрезе.

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

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ свойств песчано-глинистых грунтов для оценки возможности применения методов малоуглубинной геофизики

для исследования 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 целесообразности комплексной 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. Обоснование методики комплексной интерпретации данных методов малоглубинной геофизики при инженерно-геофизических исследованиях песчано-глинистых грунтов ВЧР с наличием приповерхностных скоплений газа;

2. Разработка комплексной физико-геологической модели, основанной на совместной интерпретации данных малоглубинной геофизики для выявления и локализации зон скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР;

3. Повышение информативности и достоверности результатов геофизических исследований, путем разработки принципов комплексной интерпретации, для выявления и локализации зон скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработка методики геофизических исследований выявления и локализации зон скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР на основе комплексной физико-геологической модели.

2. Использование методики геофизических исследований в цикле инженерно-геологических изысканий с целью снижения геологических рисков, путем выявления потенциально опасных участков развития газодинамических процессов в верхней части геологического разреза.

3. Применение методических приемов в процессе обработки данных геофизических исследований позволит повысить достоверность и информативность результатов в процессе выделения

локальных неоднородностей, связанных со скоплениями газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

#### **Методология и методы исследования**

Анализ инженерно-геологических свойств песчано-глинистых грунтов и их связь с геоэлектрическими и сейсмическими свойствами. Обобщение результатов геофизических и инженерно-геологических исследований песчано-глинистых грунтов Ленинградской области.

Численное моделирование геофизических полей с последующей инверсией для сейсмо- и электротомографических разрезов, разработанной физико-геологической модели объекта исследования. Обработка данных метода электроразведки по методике геоэлектротомографии. Томографическая обработка кинематических и динамических параметров волнового сейсмического поля. Комплексная инженерно-геологическая интерпретация данных электро- и сейсмотомографических исследований.

Полевые геофизические работы по выявлению неоднородностей, связанных с локальными скоплениями газа в песчано-глинистых грунтах.

При выполнении полевых геофизических работ были задействованы сейсмостанции Эллис-3 и электроразведочная аппаратура СКАЛА-48.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты математического моделирования, выполненного на базе разработанной физико-геологической модели, позволяют обосновать эффективность применения комплекса геофизических методов для локализации зон скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

2. Анализ распределения декремента поглощения амплитуд сейсмических волн для интервалов повышенных значений удельного электрического сопротивления позволяет приурочить неоднородности песчано-глинистых грунтов ВЧР к участкам газонасыщения.

3. Разработанный и опробованный на практике комплексный подход, базирующийся на данных электротомографии и сейсмотомографии и обоснованных методических приемах совместной интерпретации, обеспечивает детальное изучение

неоднородностей песчано-глинистых грунтов, связанных с развитием опасных газодинамических процессов.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

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

Апробация методики выполнена на объекте строительства газотранспортной инфраструктуры для решения инженерно-геологических задач.

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 принимала 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, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 130 страниц машинописного текста, 40 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 117 наименований.

#### **Благодарности**

Автор выражает признательность и благодарность за помощь в подготовке диссертации научному руководителю к.г.-м.н., доценту 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: Куликову Андрею Игоревичу, Ефимовой Наталье Николаевне и Татарскому Антону Юрьевичу за помощь в процессе работы над диссертацией и предоставленные материалы полевых исследований.

#### **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, построенных 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 выявление таких скоплений, 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** представлены результаты численного моделирования геофизических полей для различных типов песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа с целью обоснования методики геофизических исследований. 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 для характеристики 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.

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).

При построении моделей учитывались результаты инженерно-геологических работ, согласно которым:

- уровень грунтовых вод (УГВ) от 1.0 до 1.2 м, т.е. все моделируемые слои находятся в состоянии полного водонасыщения;
- скопления крупнообломочного материала представлены валунно-галечниковыми отложениями с песчаным или глинистым заполнителем;
- в верхней части газонасыщенных песчаных отложений имеется сухой слой мощностью от 0.4 до 0.8 м;
- нижний слой газонасыщенных песков, мощностью от 1.5 м до 3.0 м находится в состоянии полного водонасыщения;
- подстилающие газогенерирующие грунты представлены глинами и суглинками с включениями гравия, щебня, песка.

Для анализа разрешающей способности геофизических методов были проанализированы модели, отражающие различные варианты геологического строения разреза при исследовании участков с наличием приповерхностных газонасыщенных линз:

1. Неоднородный песчано-глинистый разрез, включающий слой водонасыщенных песков в толще глинистых пород.
2. Неоднородный песчано-глинистый разрез с наличием локальной неоднородности, представленной линзой газонасыщенных песков.
3. Неоднородный песчано-глинистый разрез с наличием локальной неоднородности, представленной скоплением крупнообломочного материала с глинистым или песчаным заполнителем.

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., которая имеет хорошее горизонтальное покрытие и обеспечивает достаточную глубинность. На основании сравнения заданной модели и геоэлектрических разрезов, полученных в результате инверсии (Рисунок 2), представляется возможным выделить высокоомные песчаные линзы, в которых возможны скопления газа, и подстилающие глинистые отложения, богатые органическим веществом, которые являются источником биогенных газов.

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 локальных неоднородностей разреза, который позволяет выделить высокоскоростные аномалии, связанные со скоплениями валунно-галечного и крупнообломочного материала. Для этого был выполнено моделирование времен первых вступлений поперечных волн для песчано-глинистого разреза с включением локальной неоднородности, представляющей собой скопление гравийно-галечного материала. На годографах локальная неоднородность будет выделяться в виде снижения времени первых вступлений поперечных волн и восстанавливаться с достаточно хорошей точностью в процессе инверсии (Рисунок 3).

На основании проведенного моделирования и анализа результатов инверсии геоэлектрических и скоростных разрезов сформулировано **первое защищаемое положение**: «Результаты математического моделирования, выполненного на базе разработанной физико-геологической модели, позволяют обосновать эффективность применения комплекса геофизических методов для локализации зон скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР».

**В третьей 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, с целью повышения достоверности геологической интерпретации.

Сложностью при выделении газонасыщенных интервалов в песчано-глинистом разрезе является то, что не существует прямых геофизических методов, позволяющих однозначно выявить участки газонасыщения в толще песчано-глинистых грунтов. Поэтому необходима методика комплексных геофизических исследований, позволяющая по ряду характерных признаков определить участки возможного распространения газонасыщенных песков. Практическая значимость такого комплекса связана с повышением эффективности бурения за счет его целенаправленного применения в потенциально опасных зонах и повышением безопасности изыскательских работ путем планирования на этих участках особых мер предосторожности – использование дополнительных средств индивидуальной защиты персоналом, регулярный контроль воздуха с помощью газоанализаторов и т.п.

Изучаемый интервал геологического разреза представлен по данным инженерно-геологических изысканий дисперсными грунтами:

- суглинками, непроницаемыми для газа;
- газонасыщенными песками;
- водонасыщенными песками;
- подстилающими газогенерирующими/газопроницаемыми глинами и суглинками с включениями различных неоднородностей – песка, гравия, щебня.

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

Для уточнения природы аномалий высокого удельного электрического сопротивления необходимо дополнить комплекс методом сейсморазведки, по результатам которой 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 выявленную высокоомную аномалию 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 и высокого уровня грунтовых вод (УГВ), в результате чего на томографических разрезах по продольным волнам проявляется сильная преломляющая граница УГВ;
- необходимость использования в основном 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), которые характеризуются высокими значениями скоростей распространения упругих волн.

Локальные неоднородности, связанные со скоплениями газа в песчано-глинистых отложениях плохо различимы на скоростном разрезе поперечных волн из-за слабого контраста скоростей, поэтому для их выделения по данным сейсморазведки необходим дополнительный критерий. Для этого в работе применена оценка распределения декремента поглощения упругих волн, получаемая в

результате 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 известной геологии по данным инженерно-геологического бурения и сопоставлении данных с участками, где газопроявления не наблюдались.

Обобщить изложенные выше ключевые признаки для интерпретации данных геофизических исследований песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа, можно 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	$V_s$	$\vartheta_s$ 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	Незначительные изменения	Повышение

В подтверждении описанных методических приемов по интерпретации данных геофизических исследований для выявления локальных скоплений газа в ВЧР на Рисунке 4 приведены результаты

совместной обработки данных электроразведочных и сейсморазведочных работ в интервале профиля ПК40 – ПК190, на котором в районе ПК75 находится скважина №130, в которой газопроявления наблюдались в течении длительного времени.

На геоэлектрическом разрезе была выделена высокоомная аномалия в интервале ПК65 – ПК140, значения УЭС этой области более 500 Ом·м (Рисунок 4а). По данным бурения скважины №130 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 на этом интервале разреза, меняется незначительно (Рисунок 4б). Понижение скорости поперечных волн, наблюдаемое в интервале ПК70 – ПК80 и в районе скважины №130 может быть связано как газонасыщением, так и со сменой литологии. На всем 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 газонасыщенной зоны – незначительное снижение или неизменность скорости распространения поперечных волн.

На Рисунке 4в приведен результат инверсии методом амплитудной томографии. На разрезе хорошо видна область возрастания декремента поглощения в интервале ПК70-ПК80 и скважины №130. 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 (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 приурочить неоднородности песчано-глинистых грунтов ВЧР к участкам газонасыщения»

**В четвертой главе** приведены результаты опробования, обоснованной в Главе 3, методики комплексных геофизических исследований, выполненного 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 от 20 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, по скоростям 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 крышкой 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 до 14.2 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 5 приведена карта, характеризующая распределение УЭС в плане для глубины, соответствующей абсолютной отметке - 20 м (Рисунок 5), 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.

Анализ полученных геоэлектрических разрезов и карты показывает, что выявленные газопроявления расположены в зонах повышенных значений удельного электрического сопротивления.

В интервалах профилей, характеризующихся наиболее высокими значениями удельного электрического сопротивления, были выполнены сейморазведочные работы. Основной задачей сейморазведочных 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. На интервале профиля, расположенного на нижней части участка исследования (Рисунок 6) выделяется зона аномально высоких значений УЭС (более 500 Ом·м), скорость  $V_s$  на этом участке не изменяется и наблюдается увеличение декремента поглощения, т.е. присутствуют все три вышеперечисленных признака-индикатора наличия газонасыщенных песков. По результатам бурения были вскрыты газонасыщенные пески на глубине порядка - 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 7).

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 и обоснованных методических приемах 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:

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 позволяет значительно повысить качество интерпретации геофизических материалов и более точно определять 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

### *Публикации в изданиях 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. Glazunov V.V., Efimova N.N., Kulikov A.I., Kulikova N.V. and Tatarskij A.Y. / Comprehensive Geophysical Surveys of Gas Sand Deposits in the Leningrad Region; 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. Glazunov, V.V. and Gorodnova, E.V. and Efimova, N.N. and Kulikov, A.I. and Kulikova, N.V. Geophysical monitoring of changes in the condition of the embankment base of a road by soil stabilization using explosion energy/ journal Engineering and Mining Geophysics 2018 – 14th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2018, Apr 2018, Volume 2018, p.1 – 9.

### *Публикации в прочих изданиях:*

4. Куликова, Н.В. Локализация газонасыщенных песчаных отложений по данным комплексных инженерно-геофизических исследований с применением амплитудной сейсмотомографии, Куликова Н.В., Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Куликов А.И., Татарский А.Ю. Текст: непосредственный // «Естественные и технические науки». – 2019 – №6 – С.104-109

5. Тельтевская (Куликова) Н.В., Оценка технического состояния магистральных газопроводов на основании физико-математического моделирования / Текст: непосредственный // «Записки Горного института». – 2004 – том 159, № 2, С. 31 - 34

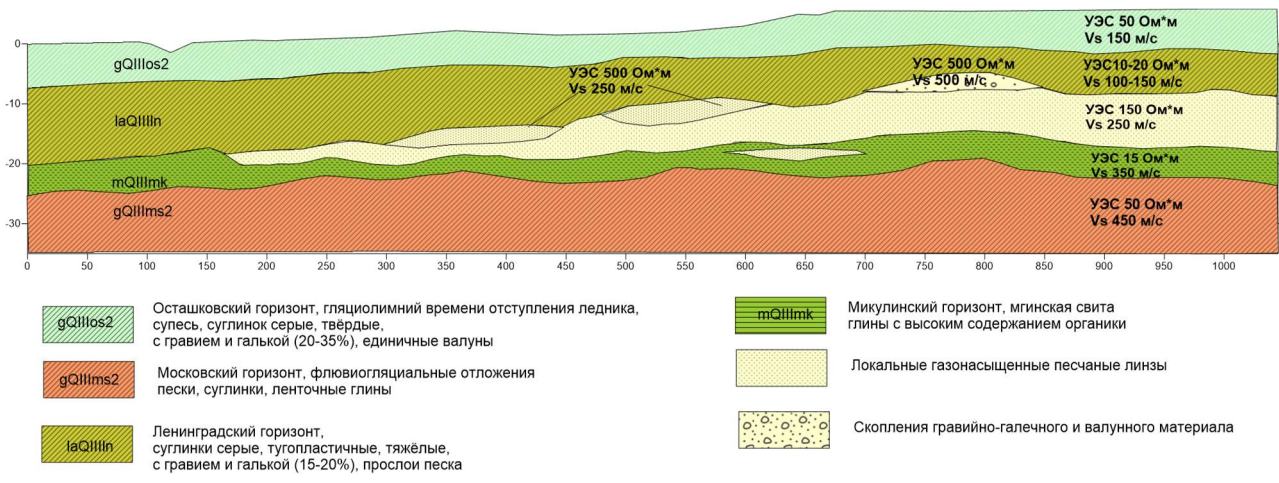


Рисунок 1 – Геолого-геофизическая модель песчано-глинистого разреза с включениями газонасыщенных линз и валунно-галечного материала

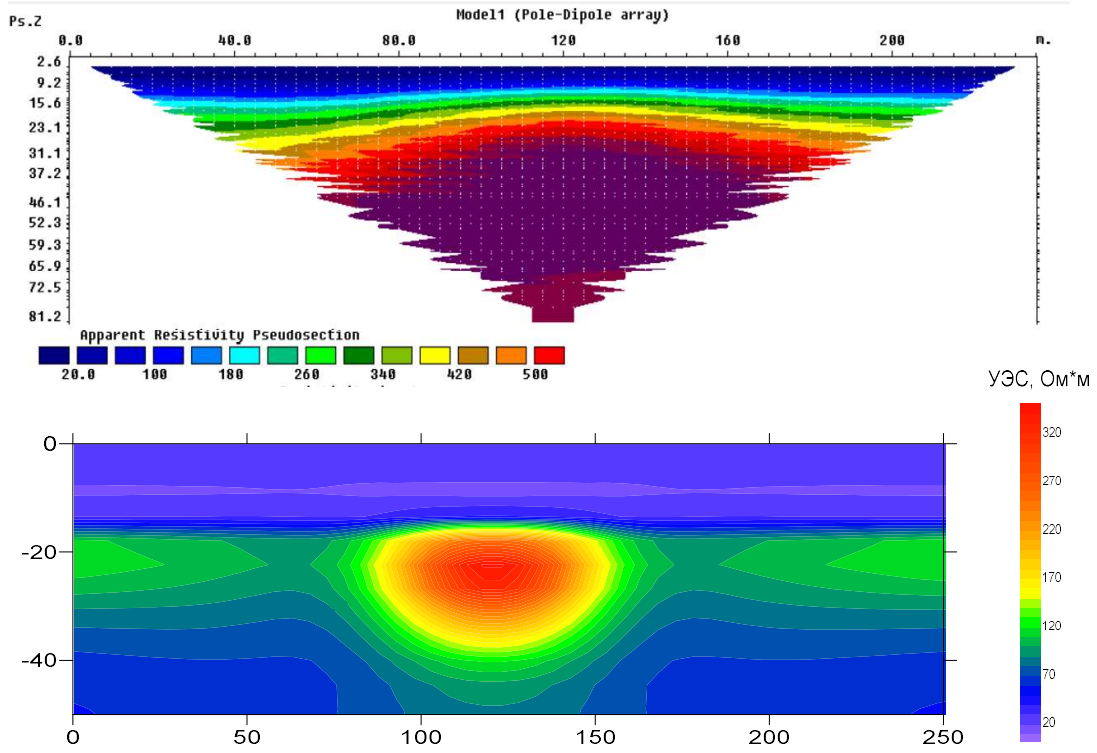


Рисунок 2 – Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии для модели неоднородного песчано-глинистого разреза с включением локальной неоднородности (газонасыщенная песчаная линза, скопление валунно-галечного материала)

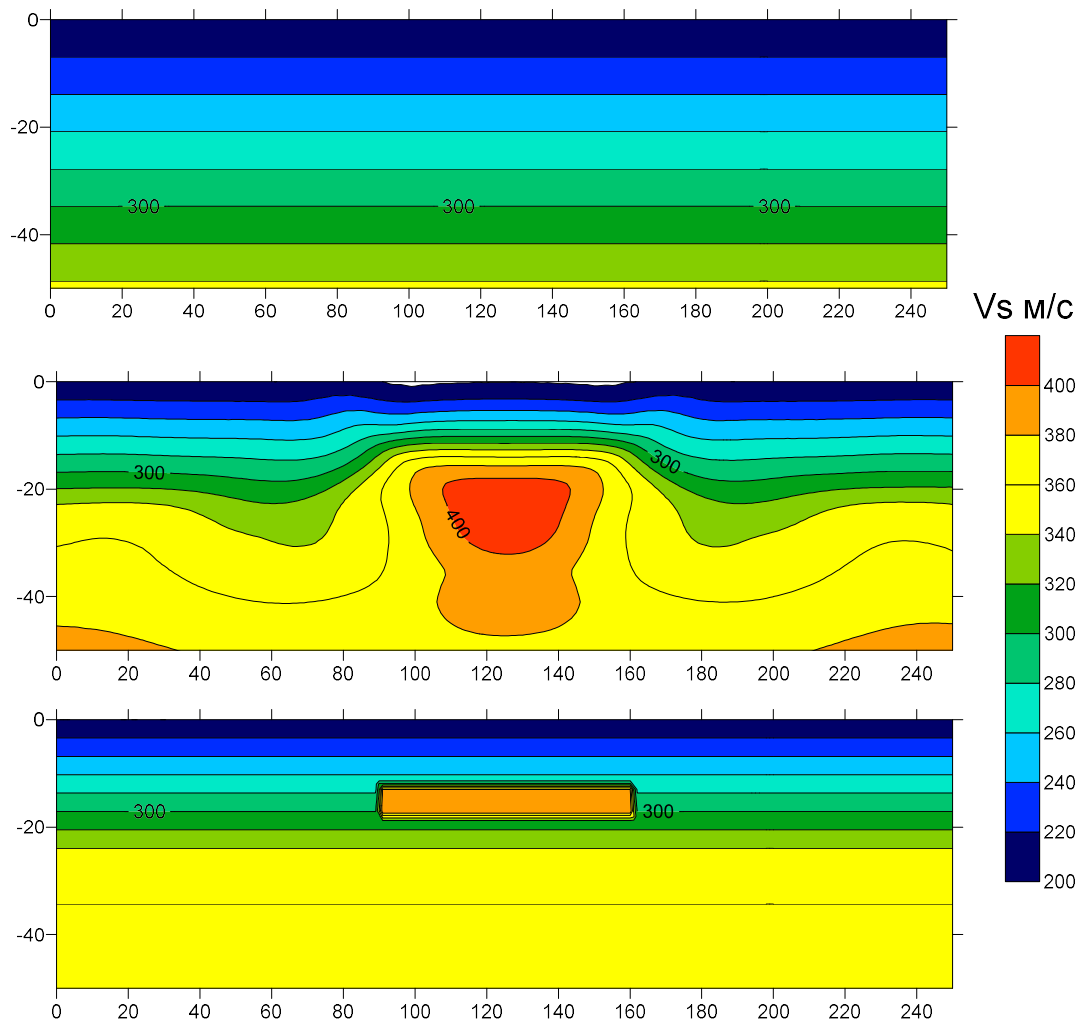


Рисунок 3 – Результаты моделирования скоростного разреза для модели с локальным скоплением валунно-галечного материала. Сверху вниз: начальная скоростная модель, результат 2D кинематической инверсии, начальная скоростная модель

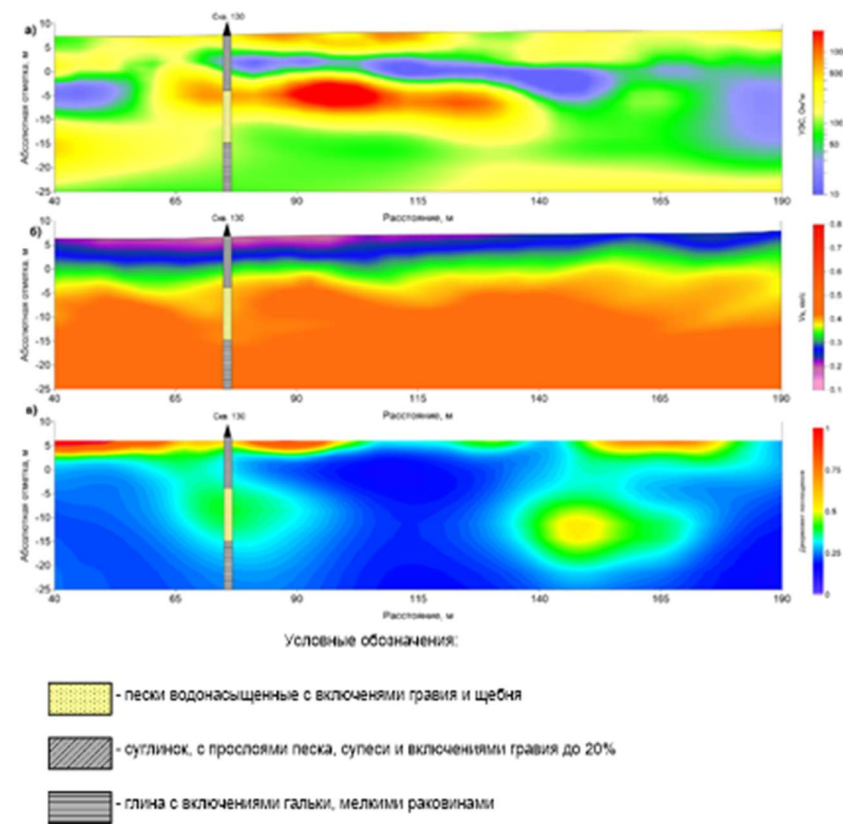


Рисунок 4 – Результаты геофизических исследований:  
 а) геоэлектрический разрез;  
 б) сейсотомографический разрез;  
 в) разрез декремента поглощения

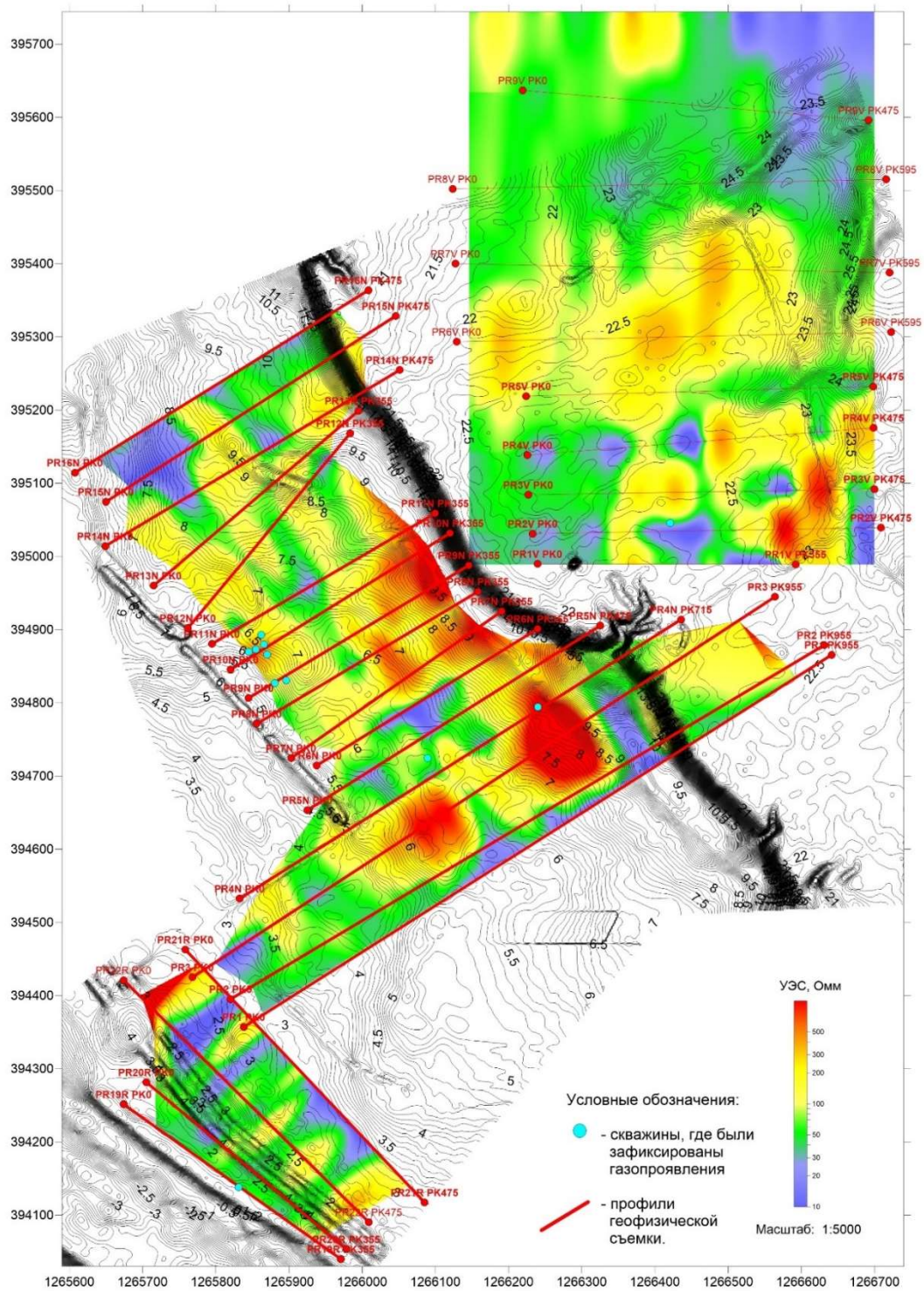
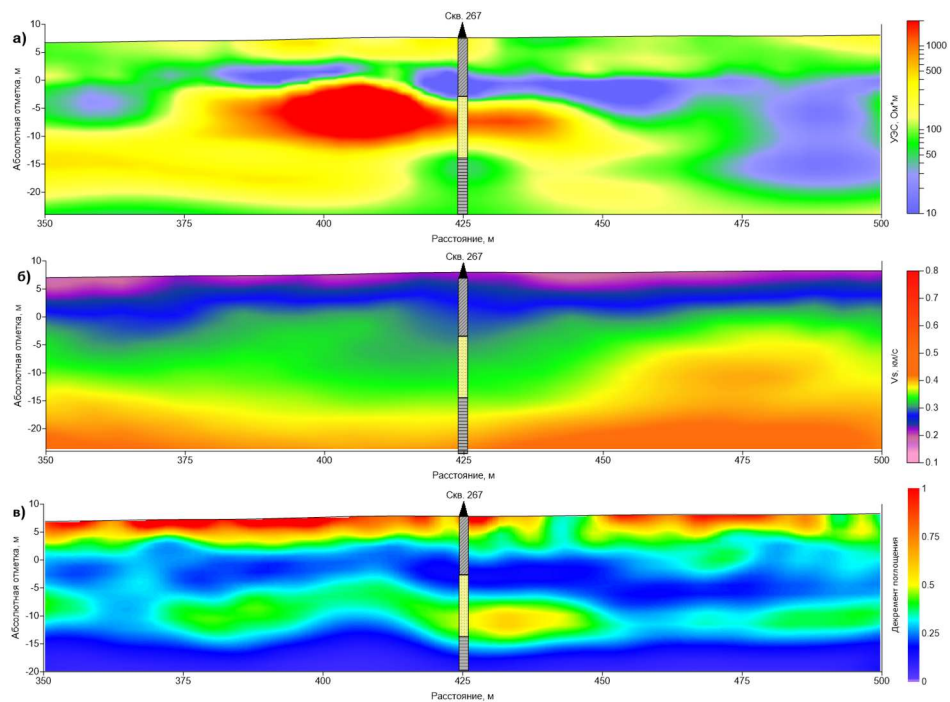


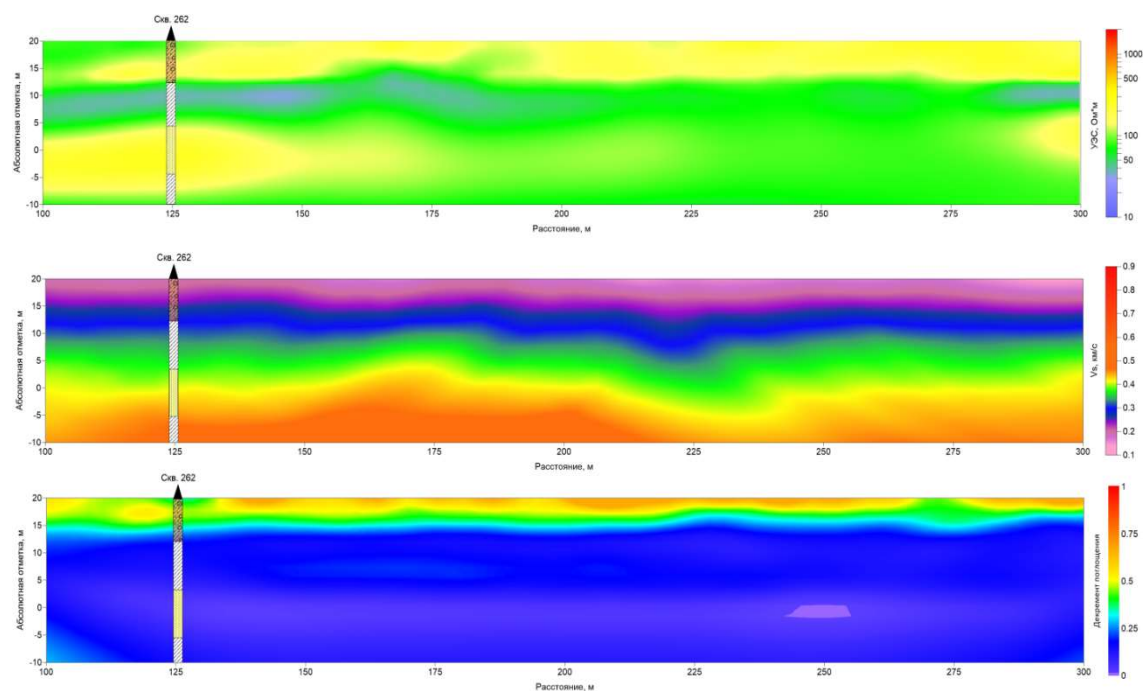
Рисунок 5 – Карта распределения УЭС по площади, построенная для глубины геоэлектрического разреза, соответствующего абсолютной отметке - 20 м



Условные обозначения:

- суглинок с прослоями песка и включениями валунов, гравия до 25%
- суглинок, с прослоями песка, супеси и включениями гравия и гальки до 15%
- пески водонасыщенные с включениями гравия и щебня
- суглинок, с прослоями песка, супеси и включениями гравия до 7%
- глина с включениями гальки, мелкими раковинами

Рисунок 6 – Результат совместной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки по интервалу профиля ПРЗн



Условные обозначения:

- суглинок с прослоями песка и включениями валунов, гравия до 25%
- суглинок, с прослоями песка, супеси и включениями гравия и гальки до 15%
- пески водонасыщенные с включениями гравия и щебня
- суглинок, с прослоями песка, супеси и включениями гравия до 7%
- глина с включениями гальки, мелкими раковинами

Рисунок 7 – Результат совместной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки по интервалу профиля ПР6в