

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:  
кандидат геолого-минералогических наук  
**Данильев С.М.**

Санкт-Петербург – 2020

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ ГАЗА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА .....	12
1.1 Происхождение и условия накопления газа в грунтах ВЧР .....	13
1.2 Описание газопроявлений в четвертичных осадках .....	15
1.3 Газопроявления ВЧР на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области.....	19
1.4 Влияние газонасыщенности на свойства грунтов ВЧР в условиях строительства зданий и сооружений.....	25
1.5 Выводы по главе 1 .....	29
ГЛАВА 2 ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОГО РАЗРЕЗА С ЛОКАЛЬНЫМИ УЧАСТКАМИ СКОПЛЕНИЯ ГАЗА .....	31
2.1 Физические свойства песчано-глинистых грунтов .....	31
2.2 Предпосылки применения геофизических методов для изучения газонасыщенных песчано-глинистых грунтов.....	38
2.2.1 Геоэлектрические свойства песчано-глинистых грунтов.....	39
2.2.2 Упругие свойства песчано-глинистых грунтов ВЧР.....	44
2.3 Выводы по главе 2.....	53
ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРО- И СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ВЧР С ЛОКАЛЬНЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ ГАЗА.....	54
3.1 Особенности инженерно-геологического строения участка с зафиксированными газопроявлениями на Юго-Западе Ленинградской области ..	54

3.2	Распределение УЭС песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа на Юго-Западе Ленинградской области.....	58
3.3	Распределение скоростей упругих волн песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа на Юго-Западе Ленинградской области .....	60
3.4	Комплексная физико-геологическая модель песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа для Юго-Запада Ленинградской области....	62
3.5	Моделирование электротомографических разрезов, содержащих локальные скопления газа в условиях Юго-Запада Ленинградской области .....	66
3.6	Моделирование скоростных сейсмотомографических разрезов с наличием локальных скоплений газа в условиях Юго-Запада Ленинградской области .....	71
3.7	Выводы по главе 3.....	77
ГЛАВА 4 КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕЙСМО- И ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛИНЗ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ.....		
4.1	Электроразведка методом сопротивлений в модификации геоэлектрической томографии (ГЭТ) .....	81
4.2	Сейсморазведочные исследования.....	85
4.3	Совместный анализ данных электроразведки и сейсморазведки .....	90
4.4	Методика расчета декремента поглощения поперечных волн с применением амплитудной томографии.....	93
4.5	Результаты исследований методами электроразведки и сейсморазведки ....	95
4.6	Выводы по главе 4.....	98
ГЛАВА 5 ВЫЯВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ГАЗА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ НА ПЛОЩАДКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ .....		
		99

5.1 Краткая характеристика изучаемого участка исследования с наличием приповерхностных скоплений газа .....	101
5.1.1 Физико-географические условия.....	101
5.1.2 Геоморфология и рельеф.....	102
5.1.3 Геологическое строение .....	103
5.1.4 Инженерно-геологические условия .....	107
5.2 Результаты инженерно-геофизических исследований.....	107
5.2.1 Результаты электроразведочных работ.....	109
5.2.2 Результаты выполнения полевых сейсморазведочных работ .....	111
5.3 Выводы по главе 5.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	118
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 [33], 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 малоуглубинной геофизики для выявления приповерхностных скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

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

1. Анализ физических свойств песчано-глинистых грунтов для оценки эффективности применения методов малоуглубинной геофизики для локализации песчано-глинистых грунтов ВЧР с включением приповерхностных скоплений газа;
2. Построение физико-геологической модели песчано-глинистых грунтов ВЧР, содержащей приповерхностные скопления газа;
3. Численное моделирование и полевые эксперименты для обоснования и верификации методики комплексной интерпретации данных малоуглубинной геофизики;
4. Разработка методики полевых инженерно-геофизических исследований для выявления приповерхностных скоплений газа;
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 малоуглубинной 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»), XТomoLM (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.

## **ГЛАВА 1 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ ГАЗА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА**

Современное развитие урбанизированных территорий неразрывно сопоставляется с интенсивно набирающим темпом строительных работ для возведения новых объектов промышленного, гражданского, сельскохозяйственного и прочего назначения. Строительство объектов, отвечающих современным требованиям по этажности, виброустойчивости, обводнению, предельным нагрузкам, обеспеченности в потребности сетевых ресурсов (электричество, газ), невозможно без проведения качественных инженерно-геологических изысканий, позволяющих получить детальную информацию о геологическом строении и о потенциальных рисках развивающихся опасных геологических процессов (карстообразование, приповерхностное газопроявление, оползни и т.д.). Особенностью геологического строения Санкт-Петербурга и Ленинградской области, оказывающей влияние на проектирование, строительство и эксплуатацию зданий и сооружений, является биохимическое преобразование органического вещества в грунтах верхней части разреза (ВЧР), способствующее формированию приповерхностных локальных скопления газа [50].

В настоящем разделе рассмотрен генезис скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР, характерных для Юго-Запада Ленинградской области, особенности их влияния на свойства вмещающего грунта и инженерно-геологические условия строительства на примере известных газопроявлений ВЧР.

## 1.1 Происхождение и условия накопления газа в грунтах ВЧР

Приповерхностные скопления биогенного газа в современных отложениях (морских и континентальных) образуются на глубинах до 150 м благодаря процессам биохимического разложения органического вещества, которое сопровождается выделением и поглощением газообразных веществ под действием микробиологических факторов [84]. Содержание биогенного газа в грунте определяется количеством органического вещества и скоростью его разложения, температурой, физико-химическими условиями среды.

По химическому составу все газы делятся на три группы: углеводородные, азотные и углекислотные. Из-за того, что газы легко смешиваются друг с другом, чаще всего они встречаются в виде смесей сложного состава [46].

На ранней стадии диагенеза образуются метановые углеводороды нормального строения, дальнейшее преобразование органического вещества происходит на стадии катагенеза под действием температуры и давления. Схема образования углеводородов в зависимости от глубины отображена на рисунке 1.1 [89].

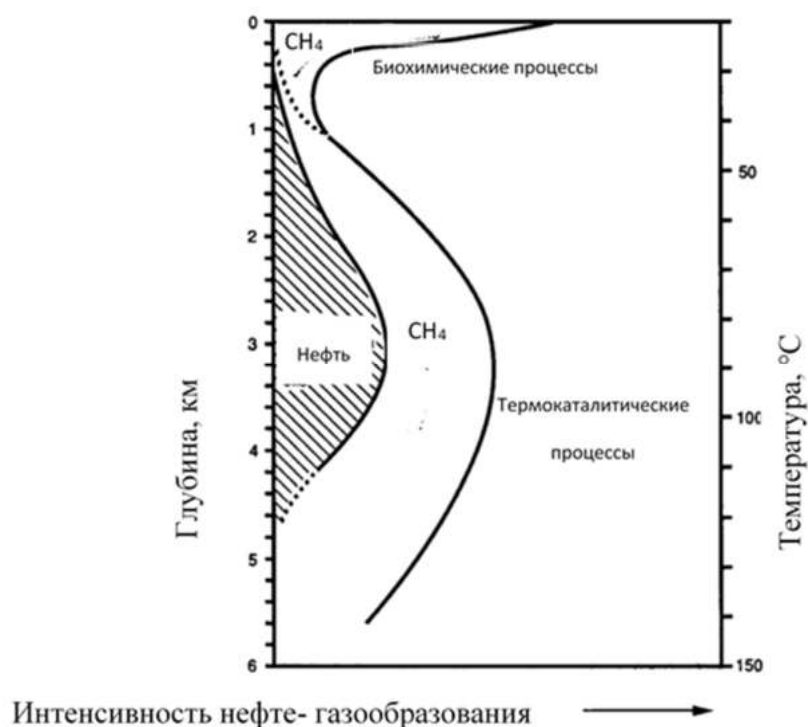


Рисунок 1.1 – Схема образования жидких и газообразных углеводородов, в зависимости от глубины залегания и температуры [89]

Исследования грунтовых газов могут использоваться для определения подземных залежей углеводородов, а также локализации путей миграции газа. Экспериментальные данные показывают, что в большинстве исследуемых подземных залежей углеводородов имеется достаточная вертикальная проницаемость геологического разреза, способствующая повышению концентрации газа в почве непосредственно над залежами углеводородов. В этом случае локальные скопления газа в ВЧР представлены газами глубинного происхождения и приурочены к крупным газовым месторождениям, когда глубинный газ по системе трещин и разломов мигрирует к поверхности и скапливается в пористых грунтах. Наличие таких скоплений осложняет разработку газовых месторождений, так как во время бурения скважин могут происходить внезапные выбросы горючих газов.

Образование газов в песчано-глинистых грунтах ВЧР происходит в процессе природной биохимической газогенерации, при разложении содержащейся в них битуминозной органики под действием микробиологических факторов, что сопровождается образованием метана, азота и диоксида углерода. Газ накапливается в четвертичных отложениях в виде локальных скоплений, представляющих собой линзы проницаемых пород, окруженных плохо проницаемыми породами (Рисунок 1.2), за счет чего создается избыточное давление и опасность внезапных выбросов газа.

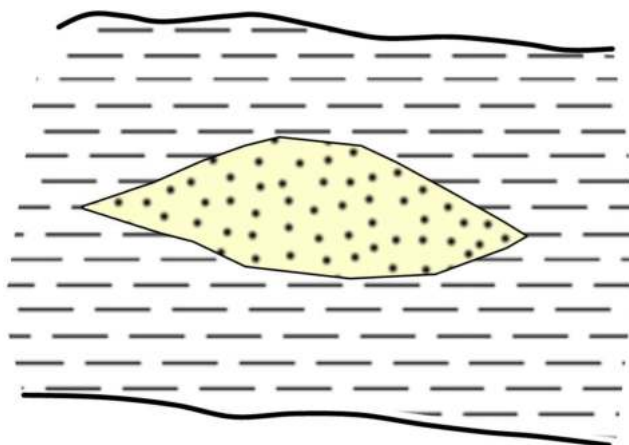


Рисунок 1.2 – Проницаемая линза, со всех сторон окруженная плохо проницаемыми породами

К геологическим условиям среды, способствующим накоплению органического вещества, относятся: водная среда с анаэробной биохимической обстановкой, застойный палеогидрогеологический режим, пониженная сульфатность, накопление и захоронение органического вещества в процессе осадконакопления. Источниками энергии, преобразующими органическое вещество, являются: геостатическое давление (уплотнение пород), биохимическое воздействие микроорганизмов и ферментов, действие каталитических свойств минералов, нисходящие тектонические движения [89].

Метан биохимического происхождения, образующийся на болотах и в молодых современных осадках морей и пресноводных водоемов, выходит на поверхность и скапливается в порах грунта в виде мелких газовых пузырьков, повышая поровое давление и снижая водопроницаемость отложений. Этим часто обуславливается низкая уплотненность молодых осадков, которая резко возрастает при извлечении и испытании его в лабораторных условиях [83].

Возраст и происхождение метана, определяется анализом изотопного состава углерода и его гомологов. Газ четвертичных осадков существенно отличается от газов нефтяных месторождений [90]. Среди исследованных природных соединений углерода метан биохимического происхождения обладает самыми низкими значениями содержания  $\delta^{13}\text{C}$ . Как правило, метан биохимического происхождения характеризуется значениями  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-50$  до  $-48,5\%$ , термокаталитического с содержанием  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-20\%$  до  $-39\%$  и метаморфического с  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-3,2\%$  до  $-19,3\%$  [20].

## 1.2 Описание газопроявлений в четвертичных осадках

Приповерхностные скопления газа широко распространены во всем мире – в зонах развития многолетнемерзлых пород, в Мировом океане [13], приуроченные к крупным газовым месторождениям. На территории Российской Федерации они вскрыты многими скважинами в Тимано-Печерском регионе, Западной Сибири, где неоднократно были зафиксированы спонтанные выбросы метана, в результате которых формируются воронки газового выброса. Такие формы рельефа,

зафиксированные в приполярных районах Западной Сибири, на полуострове Ямал [10,11], на суше, дне рек и озёр, описаны в работах [44,74,75]. Авторы этих исследований отмечают, что для предотвращения внезапных выбросов и минимизации опасности в процессе освоения территории необходимы детальные исследования природы этих газопроявлений, в том числе, и геофизическими методами.

Несмотря на повышенное внимание ученых к исследованиям приповерхностных скоплений газа, при их изучении крайне редко применяются геофизические методы, которые в комплексе с бурением могут дать информацию о геологическом строении и вероятном происхождении таких скоплений. К примеру, в статье [65], показано исследование методами геоэлектротомографии и зондирования становлением поля в ближней зоне воронки газового выброса. По результатам исследования выдвинуто две гипотезы происхождения скоплений газа: согласно первой, это миграция глубинного газа из залежи и накопление его в межмерзлотном талике под палеоозером, с последующим выбросом; по второй гипотезе избыточное давление образовалось в результате разрушения реликтовых газогидратов, вызванного повышением температуры многолетнемерзлых пород.

В работах [74,75] описаны газопроявления из четвертичных отложений на шельфе Печорского моря в песчаных линзах межледниковых отложений. Основываясь на данных бурения можно предположить, что скопления газа с аномально высоким пластовым давлением широко проявляются в разрозненных песчаных линзах, развитых на участках относительно ровного дна, разделяющих диапироподобные поднятия. Предполагается, что при снижении горного давления в результате колебаний уровня моря, сейсмических сотрясений, волнения и т.п. газ, заземленный в локальных коллекторах (песчаных линзах), расширяется, а его давление на вмещающий флюидоупор в виде мерзлых глин увеличивается [74].

В Японии с середины 20-х до 60-х годов велась добыча газа из четвертичных отложений, в пластовых водах которых содержится растворенный метан в концентрациях, близких к насыщению. Биогенная природа этого газа была впервые установлена Н. Накаи, который обобщил данные по составу газов и органического

вещества, растворенных в поверхностных водах, а также в газовых скоплениях четвертичных отложений Японии. Газовые скопления, состоящие преимущественно из метана (98%), залегают на различных глубинах от 10 до 100 м [110]. Его добывают из минерализованных вод хорошо проницаемых песков или гравийников, слагающих впадины морских или лагунных частей осадочных бассейнов. Атмосферные воды в верхней части структур ограничивают область распространения минерализованных вод проницаемыми слоями нижней части структур. Мощность продуктивных горизонтов составляет от 10 до 40 м, пористость 30% и проницаемость от нескольких до 50 мД.

Позднечетвертичные неглубокие биогенные газовые резервуары обнаружены и эксплуатируются в промышленных целях в прибрежной зоне залива Ханчжоу (северная провинция Чжэцзян, Восточный Китай). Река в этом районе сильно врезалась в подстилающие палеоруслу в период оледенения, в результате которого образовались долины Цяньтанцзян и Тайху [103,116,117]. Эти врезанные долины заполнены речными отложениями и, затем, в послеледниковый период перекрыты морскими осадками. Отложения врезанной палеодолины состоят из четырех осадочных фаций: флювиогляциальные отложения, аллювиальные отложения, морские мелководные отложения и переходные от морских к речным отложения (Рисунок 1.3).

Все промысловые месторождения газа находятся в пойменных песчаных пластах врезанных долин на глубине 30 – 60 м мощностью от 3.0 до 7.0 м, максимальная мощность достигает более 10 м. Покрывающими породами служат непроницаемые глины. Быстрое осаждение вышележащих отложений морских мелководных отложений богатых органикой, обеспечило не только обильные источники газа, но и хорошие условия для его накопления. Основными источниками углеводородов являются темно-серые глины пойменной фации и серые илы мелководных морских отложений. Эти отложения имеют высокое содержание органического углерода, как правило, более 0.4%.

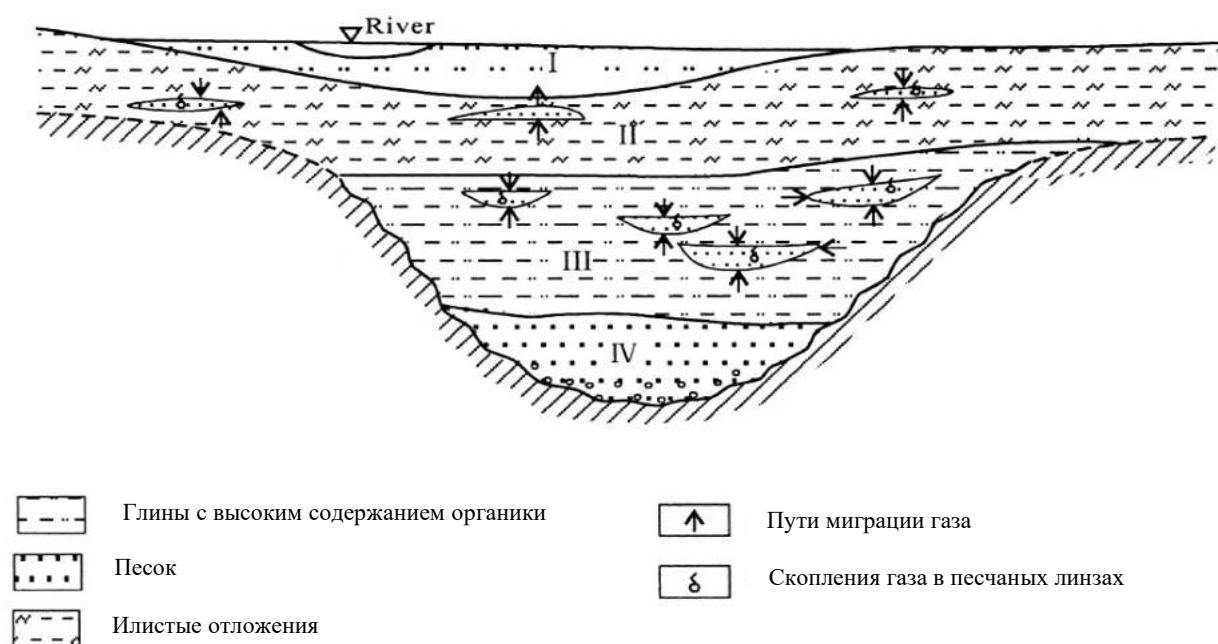


Рисунок 1.3 – Схематический разрез погребенной палеодолины с наличием локальных скоплений газа в песчаных линзах [104]

Многочисленные газопроявления также зафиксированы и на территории Эстонии, например, на острове Суур-Прангли (Большой Прангли), расположенном в Финском заливе в 25-27 км к северо-западу от г. Таллина. В 1924 году, при бурении скважины на нефть, здесь обнаружены природные газы, приуроченные к четвертичным отложениям. В скважине, общей глубиной 72.29 м, первый газоносный горизонт мощностью 1.21 м вскрыт на глубине порядка 30 м и представлен гравием крупнозернистым, второй газоносный горизонт – в песках на глубине 40 м и третий в песках с гравием на глубине 50 м. Все газонасыщенные слои перекрываются более мощными глинистыми осадками. Основным компонентом газа из скважин на острове Суур-Прангли был метан с незначительными примесями азота и углекислого газа.

В разрезе четвертичных отложений (Рисунок 1.4), полученном в результате работ по разведке природного газа на острове Суур-Прангли, присутствуют серые плотные морские суглинки зеленоватого оттенка со слабовыраженной горизонтальной линзовидной слоистостью и запахом сероводорода, содержащие створки и фрагменты раковин пелеципод и растительные остатки, прослеженные на глубинах 61-75 м ниже уровня моря [24].

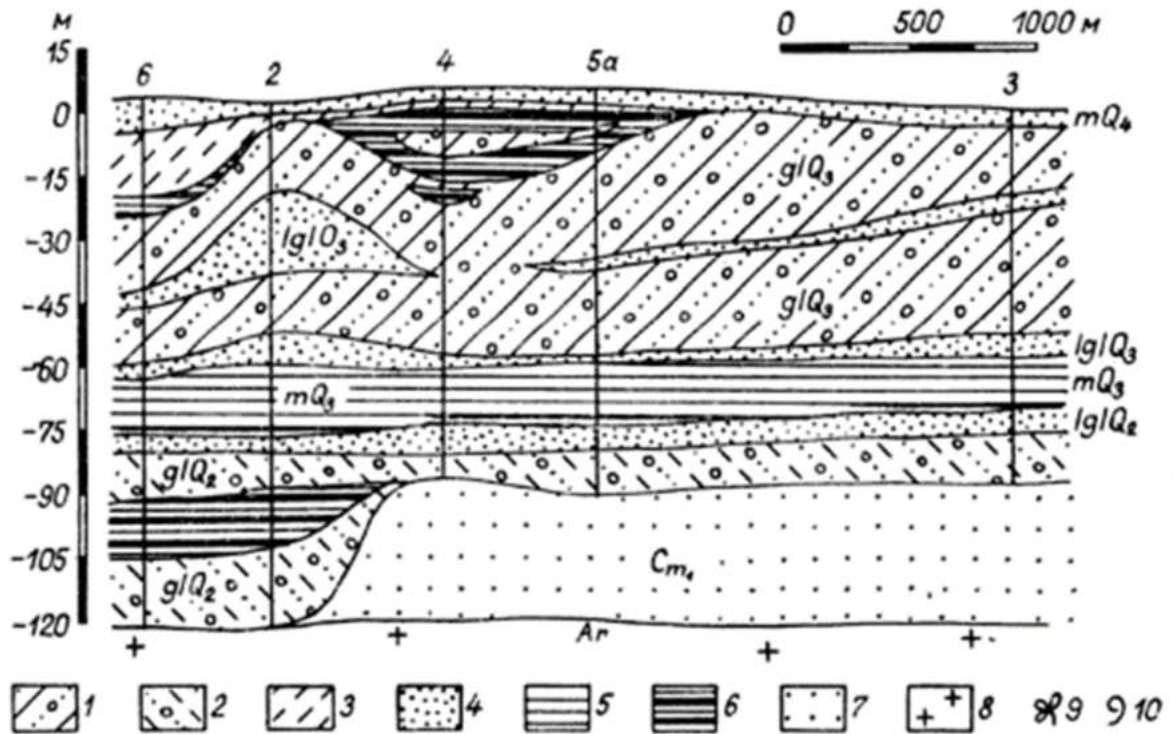


Рисунок 1.4 – Разрез четвертичных отложений острова Суур-Прангли:

(1 – морена позднего плейстоцена, 2 – морена среднего плейстоцена, 3 – супесь, 4 – песок, 5 – морские суглинки и глина, 7 – песчаник, 8 – кристаллические породы, 9 – растительные остатки, 10 – моллюски) [24]

В верхней части слоя наблюдаются песчаные прослойки, в которых содержатся зернышки ярко-синего вивианита. Описанный слой покрыт желтовато-серым песком мощностью до 2.5 м и серой ленточной глиной мощностью до 1.7 м. В морских серых суглинках, содержащих неразложившееся органическое вещество, прослеживаются газопроявления непроизводственного характера. Присутствие газов на различных глубинах в отложениях указывает, что газовые коллекторы имеют линзовидный характер залегания [24].

### 1.3 Газопроявления ВЧР на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Процессы газообразования на территории города происходят как в условиях естественных природных (болотных) ландшафтов, так и в условиях антропогенно-измененных ландшафтов. В процессе подготовки площадей под застройку нередко

происходит засыпка водотоков и свалок с последующим уплотнением поверхностного слоя грунтов бетонными плитами, строительным мусором, твердыми бытовыми отходами, асфальтовым покрытием и т.д., что значительно понижает изначальную проницаемость грунтов. При этом на отдельных фрагментах засыпанной территории (палеореки и озера, болота, каналы, свалки и т.д.) с первоначальным обилием органического вещества и повышенной влажностью грунтов сохраняются благоприятные условия для активного газообразования [21].

Накапливающийся в грунте биогаз в определенный момент времени под давлением может прорвать вышележащую толщу в ближайшем ослабленном месте, реализуясь в виде газо-грязевого выброса, или же будет накапливаться в близлежащих подземных сооружениях, в том числе и подвалах. Особенно опасным считается накопление метана, при определенных концентрациях которого в атмосферном воздухе смесь становится горючей и даже взрывоопасной [21]. На рисунке 1.5 представлена карта территории Санкт-Петербурга с обозначением районов, опасных по образованию биогазов. Опасность газогенерации четвертичных отложений учитывалась и в процессе строительстве метрополитена, так как газонасыщенные грунты оказывают отрицательное влияние на устойчивость подземных выработок. Это одна из причин глубокого заложения перегонных тоннелей и подземных станций в пределах большинства линий метрополитена, которые проходят в трещиноватой толще верхнекотлинских глин венда, либо переслаивания глин с песчаниками. При выходе на поверхность, тоннели пересекают четвертичные отложения и местами подвергаются действию газовой фазы в водонасыщенных грунтах [32,33].

На территории Санкт-Петербурга, по документальным источникам, с начала прошлого века зафиксированы десятки случаев газовыделения [3,33,77], сопровождавшихся выбросами газонасыщенных разжиженных грунтов и возгоранием газов. Однако, реальное число участков газообразования значительно больше, так как фиксируются, как правило, эпизоды, имеющие аварийный характер. Потенциально опасными участками по выделению биогаза в Санкт-

Петербурге являются Красногвардейский, Невский, Приморский, Фрунзенский районы (Рисунок 1.5).

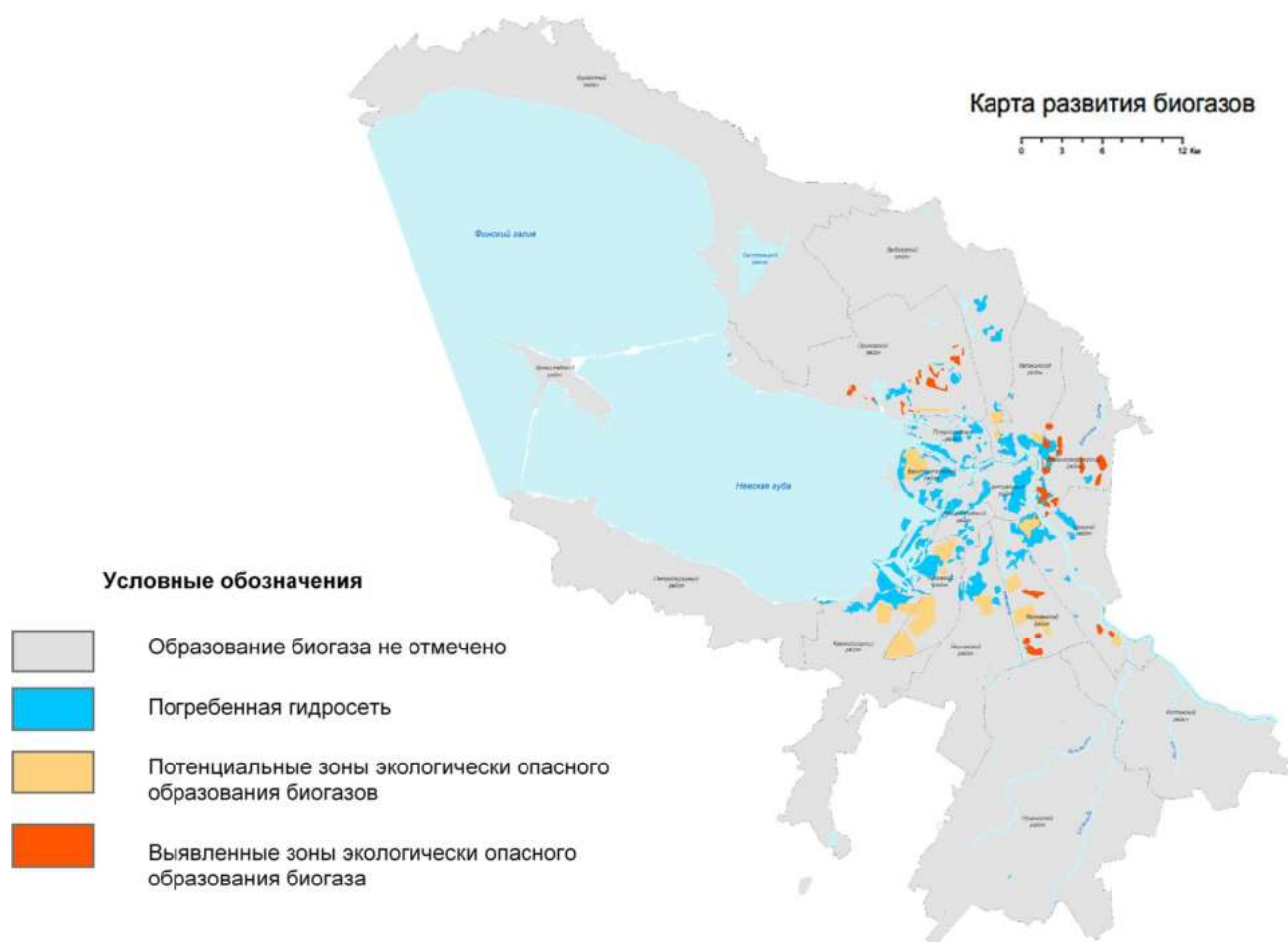


Рисунок 1.5 – Карта развития биогазов на территории г. Санкт-Петербурга [21]

Все газопроявления были зафиксированы на различных глубинах и имеют различный генезис. В верхней части четвертичной толщи (глубины от 6 до 15 м) повсеместно наблюдалось выделение метана и азота из обогащенных органическим веществом болотных, литориновых, реже озерно-ледниковых отложений. Наличие газа в этом интервале разреза объясняется присутствием богатого биоценоза, так как заторфованные песчано-глинистые отложения содержат активно действующую микрофлору. Для территории Санкт-Петербурга это определяется широким развитием погребенных болот, которые влияют на трансформацию вмещающих песчано-глинистых пород, развитие физико-химических и биохимических процессов, в том числе газогенерацию [33]. В Санкт-Петербурге в пределах города массивы болотных отложений и заторфованных

грунтов перекрыты слабопроницаемыми техногенными грунтами мощностью более 2 м, а также зданиями и асфальтобетонным покрытием. Это способствует образованию анаэробных условий и активному метаногенезу [3,33].

Вторым интервалом разреза четвертичных отложений, опасным по газогенерации, является межморенный микулинский горизонт, представленный плотными глинами, суглинками, супесями с линзами мелкозернистых песков с высоким содержанием органики. Газы микулинского горизонта представлены, главным образом, метаном и азотом, причем содержание азота на отдельных участках приближалось к содержанию метана. Углекислый газ присутствовал в количестве – от 0.3 до 4.0%.

Кроме того, газопроявления наблюдаются в толще коренных пород нижнекембрийского и вендского возрастов. Газ, выделяющийся из толщи коренных пород, представлен почти чистым азотом.

Для объектов гражданского и промышленного строительства наибольшую опасность представляют образования природного метана и азота в межморенных микулинских слоях. Микулинские межледниковые отложения на Северо-Западе Русской равнины служат одним из опорных горизонтов для стратиграфического расчленения четвертичной толщи. Они образовались в период резкого потепления климата между московским и валдайским оледенением около 110 – 130 тыс. лет назад, что обусловило большое содержание органического вещества в отдельных заливах микулинского моря и способствовало накоплению песчано-глинистых грунтов с битуминозной органикой [62]. Сложены они слоистыми плотными глинами, суглинками, супесями и реже мелкозернистыми песками. В глинах и суглинках местами наблюдаются включения вивианита. Как правило, нижние части толщи слагаются глинами, которые вверх по разрезу постепенно замещаются песчаным материалом. Пески обычно кварцевые, слюдистые, тонко- или мелкозернистые, глинистые. Иногда в них наблюдаются тонкие глинистые пропластки. Эти отложения прослеживаются на отдельных участках в погребенных долинах исторического центра города, в северных районах (опорная скважина на Гражданском проспекте), местами в южном и юго-восточном

районах (Обухово, Рыбацкое и др.). Биохимическое происхождение метана в толще микулинских морских отложений подтверждалось содержанием в этих осадках органического вещества [34]. На рисунке 1.6 представлен схематический геолого-литологический разрез, на котором показаны линзы газонасыщенных песков в толще ледниковых отложений.

Микулинские межледниковые слои перекрываются мореной осташковского (валдайского) оледенения, геолого-генетический комплекс которой представлен валунными глинами, суглинками, супесями с прослоями и линзами песка, грубозернистого глинистого песка, иногда галечника, мощность таких линз может варьировать от 0.1 м до 10 м. В связи с неоднородностью состава физико-механические свойства моренных отложений меняются в широких пределах: естественная влажность от 10 до 30%, объемный вес породы от 1.9 до 2.3 г/м<sup>3</sup>, коэффициент пористости от 0.3 до 0.8 [23]. Содержание крупнообломочного материала довольно неравномерно, обычно 5–15%, на отдельных участках – до 20% и более. Состав включений неоднороден. Представлены они кристаллическими и осадочными породами. Из кристаллических пород преобладают обломки гранитов и гнейсов, среди осадочных – карбонатных пород и песчаника. Преобладают обломки гравийно-галечной размерности, валуны и окатанные глыбы, принесенные из Скандинавии в период наступления ледника [91] встречаются реже [16].

Из вышеописанного следует, что четвертичные отложения на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области характеризуются неравномерным строением с включением газонасыщенных линз песка и скоплений крупнообломочного материала.

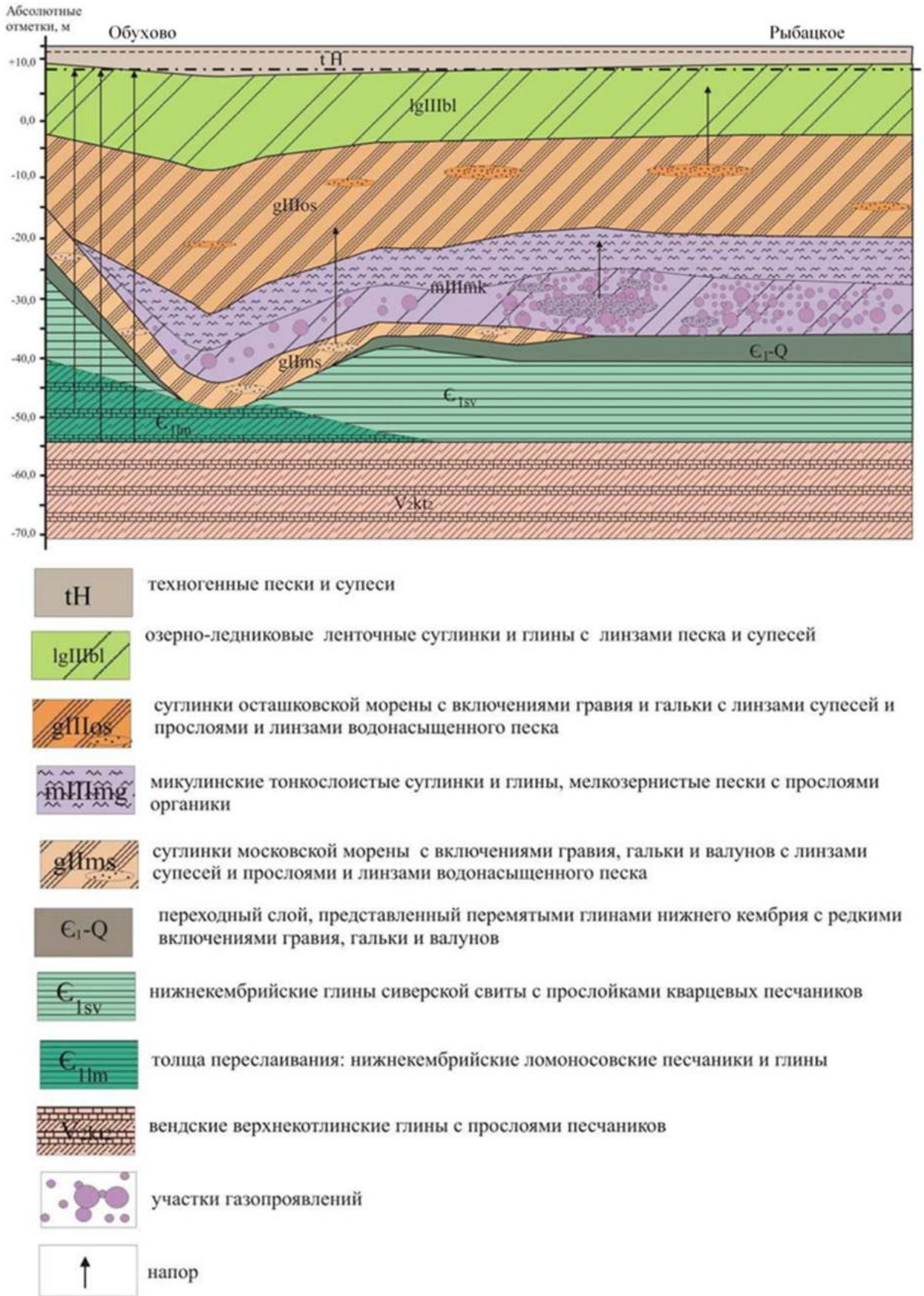


Рисунок 1.6 – Схематический геолого-литологический разрез юго-восточной части Санкт-Петербурга [33]

На территории Ленинградской области, также, фиксируются современные газопроявления из отложений микулинского горизонта, распространенного повсеместно на различных глубинах. Помимо микулинских отложений газопроявления были обнаружены в мгинских уплотненных песках мощностью порядка 20 м при бурении скважин в районе населенных пунктов Усть-Луга и Ручьи Кингисеппского района. Состав газа: метан в количестве 95.1% и 89.3% соответственно, а также примеси азота 2.7% и 7.8%, и гелия 0.006% и 0.015% [81].

#### **1.4 Влияние газонасыщенности на свойства грунтов ВЧР в условиях строительства зданий и сооружений**

Наличие в грунтах газов в «защемленном» состоянии оказывает значительное влияние на свойства грунтов. В тонкодисперсных грунтах защемленные газы повышают поровое давление и перекрывают капилляры и тонкие поры, снижая водопроницаемость грунта. Это существенно замедляет процессы консолидации таких грунтов под нагрузками. Поэтому глинистые грунты, обогащенные защемленными газами, склонны проявлять многолетнюю осадку в основании сооружений [83].

Негативное влияние газонасыщенных грунтов на инженерно-геологические условия и на устойчивость сооружений может проявляться в снижении прочности песчано-глинистых грунтов. Даже незначительное накопление малорастворимых газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) в песчано-глинистых породах и, соответственно повышение газонасыщения, приводит к изменению напряженно-деформированного состояния грунтов, существенно возрастает тиксотропность песчано-глинистых пород, что проявляется даже при незначительных динамических и вибрационных воздействиях (работе наземного и подземного транспорта, забивке свай и пр.) [77]. Газонасыщение песчаных отложений приводит к снижению угла внутреннего трения вплоть до их перехода в состояние псевдопесков. В процессе изучения донных осадков, содержащих локальные скопления биогенных газов, установлено, что они в значительной степени влияют на геотехнические характеристики, создавая опасность для сооружений [94,95].

Вследствие газонасыщения происходит преобразование напряженно-деформируемого состояния вмещающей толщи отложений за счет роста газодинамического давления в результате накопления малорастворимых газов (метана, азота) в поровом пространстве грунтов при отсутствии возможности их рассеивания приводит к развитию деформаций и разрушению размещенных в этих грунтах подземных конструкций.

Наличие растворимых в воде газов (углекислого газа, сероводорода) способствует повышению агрессивности подземных вод по отношению к конструкционным материалам подземных сооружений.

Наличие газа в грунтах может приводить к увеличению давления в поровой воде до 0,4 МПа и более. Это ведет к взвешиванию грунта, уменьшению сил трения, ослаблению связей между частицами грунта, сопротивления сдвигу. Может произойти оплывание породы, переход в плавунное состояние. Таким образом, свойства грунтов зависят от относительного содержания и свойств, входящих в него фаз, от закономерности взаимодействия частиц скелета друг с другом и с поровой водой, от особенностей совместной работы фаз под действием внешних нагрузок, приложенных к грунту [77].

В публикациях Р.Э. Дашко и ее учеников [3,30-36] неоднократно доказано, что биохимические процессы в подземном пространстве городов, вызванные активной жизнедеятельностью природной и привнесенной микробиоты, оказывают негативное влияние на состояние и свойства грунтов. Так, в г. Санкт-Петербурге при контаминации моренных супесей и суглинков стоками, содержащими органические соединения и микробиоту, отмечается заметное снижение модуля общей деформации до 2.4-3.6 МПа по сравнению с 40-50 МПа для незагрязненных грунтов.

С повышением давления газов связаны и газодинамические явления, имеющие большое значение в горнодобывающей промышленности, влияющие на безопасность проходки горных выработок в процессе разработки месторождений полезных ископаемых. Сжимаемость зацементированных газов в грунтах может обуславливать длительную осадку сооружений.

Примером негативного влияния газосонасыщенности грунтов на инженерные сооружения можно привести оползень пластичной глины на участке шоссе в Швеции в 2006 г. (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Оползень пластичной глины, 2006 г., Швеция [113]

В процессе бурения и отбора проб на разрушенном участке в скважине был обнаружен газ на глубине около 9 м. Газ выделялся в процессе бурения, как только были пройдены покрывающие отложения. Измерения методом акустического каротажа показали понижение скорости продольных волн (ниже 500 м/с), что также могло быть вызвано присутствием газа. При сравнении скважинных данных с томографической скоростной моделью на различных глубинах отмечалось понижение скорости, что указывает на наличие газовых карманов в этой области. Возможно, что мощный крупнозернистый слой песка выступал в качестве небольшого резервуара для накопления газа, а глинистые материалы выше действовали локально, как герметизирующий слой или крышка. В керне, извлеченном из этой скважины, отмечалось большое количество органических остатков, которые, вероятно, и являлись источником метана, образовавшегося путем анаэробного разложения [113].

Любая намывная территория является потенциально опасной относительно появления биогазов. При отсутствии препятствий образующийся газ свободно

выходит в атмосферу. Однако, на намывной территории среди песков нередко формируются прослой глинистых грунтов, которые являются экранами, препятствующими свободному выходу биогазов. Газы накапливаются под такими экранами и приподнимают их, образуя небольшие конусовидные возвышения, которые иногда прорываются (тогда вместе с газом на поверхность под напором изливается небольшое количество воды). Присутствие газа обнаруживается по резкому специфическому запаху – чаще всего сероводорода [6].

Есть данные о значительной загазованности, обусловленной микроорганизмами, оснований бетонных плотин крупных гидроэлектростанций, Этот процесс со временем может привести к разуплотнению грунтов [55].

С инженерно-геологической точки зрения газообразование в грунтах - негативный процесс, ведущий к изменению физико-механических свойств грунтов, поэтому определение газообразующей способности грунтов, а особенно прогнозирование ее изменения под воздействием внешних факторов (например, подтопление грунтов водами, содержащими различные химические соединения) является важной задачей при инженерных изысканиях в строительстве [72].

В практике производства инженерных изысканий в настоящее время предусмотрено выполнение газогеохимических исследований в составе инженерно-экологических изысканий.

Согласно требованиям СП 47.13330.2016 (актуализированной редакции СНиП 11-02-96) газогеохимические исследования проводятся в целях оценки газогеохимического состояния и степени опасности грунтов, слагающих инженерно-геологические массивы и газогеохимического районирования территорий проектируемого строительства.

Газогеохимические исследования проводятся методом поверхностной шпуровой газовой съемки, сопровождающиеся исследованием грунтового воздуха и приземной атмосферы. В процессе газогеохимической съемки отбираются пробы подпочвенного воздуха для полевого и (или) лабораторного анализа. Полевой анализ является более оперативным, позволяя быстрее выделять аномальные области для постановки на них детализационных работ. Отбор проб свободной

подпочвенной атмосферы проводится из призабойных частей специальных скважин или путем забивки в грунт соответствующих зондов (шпуров). В таблице 1.1 приведены критерии оценки степени газогеохимической опасности грунтов по содержанию в них горючих газов.

Таблица 1.1 Критерии оценки степени газогеохимической опасности грунтов

Степень газогеохимической опасности грунтов	Объемная доля компонента, % об.			
	СН <sub>4</sub>	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub>	О <sub>2</sub>
Безопасные	0,01 – 0,1	1,0 – 5,0	<0,1	>18,0
Потенциально опасные	0,1 – 1,0	1,0 – 5,0	<1,0	<18,0
Опасные	>1,0	>5,0	>1,0	<18,0
Пожаро- и взрывоопасные	>5,0	n*10	>4,0	<18,0

## 1.5 Выводы по главе 1

1. Факторами для формирования газа является наличие органического вещества в толще осадочных пород и микроорганизмов, которые его перерабатывают.
2. Условием накопления газа являются пористые газопроницаемые песчано-глинистые породы, по которым газ мигрирует и накапливается в локальных интервалах разреза, перекрытых непроницаемыми глинистыми породами, играющими роль «покрышки». Газовые скопления не распространены повсеместно, за счет неоднородного строения ВЧР. В местах залегания газопроницаемых пород происходит естественная разгрузка газа в атмосферу.
3. Скопления газа являются источником высокого геологического риска для объектов строительства, так как вызывают разуплотнение и снижение несущей способности песчано-глинистых грунтов, а также служат источником потенциальных газовых выбросов.
4. Для минимизации рисков, связанных со скоплениями газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР необходимо своевременная их локализация посредством проведения комплексных инженерно-геологических изысканий, включающих

современные геофизические технологии. В нормативной документации в достаточной мере не регламентировано выявление локальных мест скоплений газа и методика их изучения, поэтому рассматриваемый в работе научно-методический подход является актуальным для практики инженерных изысканий в строительстве.

5. Газовые скопления в песчано-глинистых грунтах ВЧР Ленинградской области на глубинах 10-50 м представлены преимущественно газами биогенного происхождения, состоящими в основном из метана с примесями азота и других газов.

## **ГЛАВА 2 ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОГО РАЗРЕЗА С ЛОКАЛЬНЫМИ УЧАСТКАМИ СКОПЛЕНИЯ ГАЗА**

В существующей нормативной документации в достаточной мере не регламентировано выявление локальных мест скоплений газа и методика их изучения геофизическими методами (Глава 1). Поэтому для формирования основ обоснования комплекса методов инженерной геофизики появляется потребность в проведении анализа закономерностей изменения свойств грунтов песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа и сформулировать общие требования к технологиям, применение которых необходимо и целесообразно в составе комплексных инженерно-геологических изысканий на территориях, где возможно приповерхностное газонакопление.

### **2.1 Физические свойства песчано-глинистых грунтов**

Породы ВЧР инженерно-геологического разреза, представленные несцементированными песчаными и глинистыми породами, можно рассматривать как многофазные системы, состоящие из минеральных частиц, воды и воздуха [63]. Минеральные частицы, в большинстве случаев, являются основной составной частью породы, образуя ее скелет. Вода и воздух заполняют промежутки между минеральными частицами – поры, в которых может находиться только воздух, только вода, или совместно воздух и вода в различных процентных соотношениях. Форма и размеры минеральных частиц рыхлых и слабосвязанных пород являются следствием их генезиса и определяют основные свойства и отличительные особенности этих пород. Структурно-текстурные особенности грунтов: дисперсность, отсортированность частиц, величина открытой пористости, форма частиц и поровых каналов, непосредственным образом влияют на их газопроницаемость. Газопроницаемостью грунтов называется способность пропускать сквозь себя газ при наличии перепада давления. Поскольку в природе не существует абсолютно сплошных грунтов, то все они в той или иной мере

газопроницаемы. Изучение газопроницаемости грунтов необходимо для оценки их экранирующей способности, т.е. способности задерживать фильтрацию газов (или жидкостей). Экранирующая способность обратна газопроницаемости: чем выше газопроницаемость грунта, тем ниже его экранирующая способность, и наоборот.

Абсолютная (или удельная) газопроницаемость – это проницаемость грунта по отношению к данному газу, не осложненная наличием в порах иных компонентов, снижающих газопроницаемость. Примесь высокодисперсных глинистых материалов снижает их газопроницаемость. Наибольшей газопроницаемостью обладают крупнодисперсные грунты, например хорошо отсортированные пески [27].

Содержание глинистых частиц лежит в основе классификации глинистых пород четвертичного возраста по гранулометрическому составу [39](таблица 2.1). Как показывают исследования [116], из всех компонентов глинистых пород параметром, определяющим их физические свойства, является содержание глинистых минералов.

Таблица 2.1 – Классификация глинистых пород четвертичного возраста по гранулометрическому составу

Породы	Содержание глинистых фракций, %
Глина тяжелая	>60
Глина	30-60
Суглинок тяжелый	20-30
Суглинок средний	15-20
Суглинок легкий	10-15
Супесь тяжелая	6-10
Супесь легкая	3-6
Песок	<3

Объемные фракции воздуха и воды в песчано-глинистых грунтах определяются через пористость и влажность. Пористость характеризует объем пор

в единице объема породы. Кроме этой характеристики также используются коэффициент пористости, равный отношению объема пор к объему твердой части породы. Его выражают в долях единиц. Пористость песчаных и глинистых пород изменяется в довольно широких пределах в зависимости от формы и размера слагающих их частиц (Таблица 2.2). У пород более тонкозернистых, обладающих большой удельной поверхностью, она, как правило, выше, чем у пород грубодисперсных с меньшей удельной поверхностью. В соответствии с этим, пористость глинистых пород обычно выше, чем пористость рыхлых пород, хотя поры и пустоты последних крупнее.

Таблица 2.2 – Пористость песчаных и глинистых пород при различном их сложении, % (в скобках указан коэффициент пористости)

Породы	Сложение		
	плотное	средней плотности	малой плотности
Пески гравелистые, крупно- и среднезернистые	<35 (<0.55)	35-40 (0.55-0.70)	>40 (>0.70)
Пески мелко- и тонкозернистые, супеси легкие	<38 (<0.60)	38-44 (0.60-0.80)	>44 (>0.80)
Глины, суглинки, супеси тяжелые	<30 (<0.40)	30-45 (0.40-0.80)	>45 (>0.80)

Для дисперсных песчано-глинистых пород относительно монотонное уменьшение проницаемости происходит с увеличением глинистости в результате уменьшения эффективного порового пространства [115] (Рисунок 2.1).

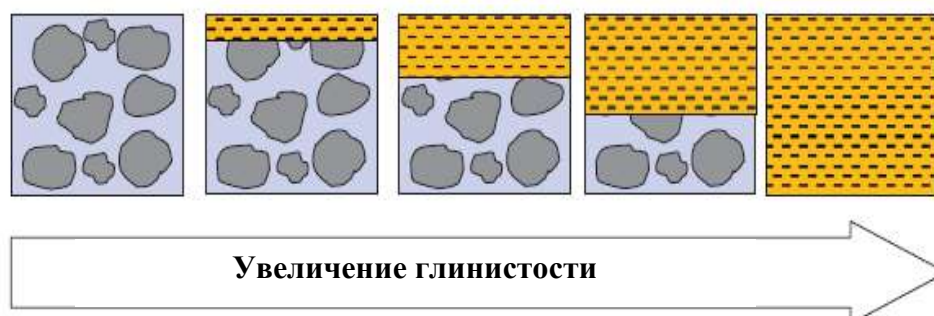


Рисунок 2.1 – Схема, характеризующая уменьшение проницаемости в песчано-глинистых грунтах в связи с увеличением глинистости

Глинистые частицы заполняют поровое пространство между песчинками, по мере заполнения глинистыми частицами порового пространства песка, общая пористость уменьшается в соответствии с зависимостью  $e=e_s-\Gamma(1-e_{cl})$ , где  $e_{cl}$  – коэффициент пористости глины. При высоком содержании глины, когда глинистость ( $\Gamma$ ) больше, чем коэффициент пористости песка ( $e_s$ ), наблюдается заметное различие в размещении частиц песка и глин. В этом случае частицы глины формируют матрицу и частицы песка не связаны. Когда глинистость возрастает, общая пористость уменьшается, потому что частички уплотняющейся глины, обладающие нулевой пористостью, замещают гранулы песка [41]. Зависимость между пористостью и глинистостью представлена на рисунке 2.2.

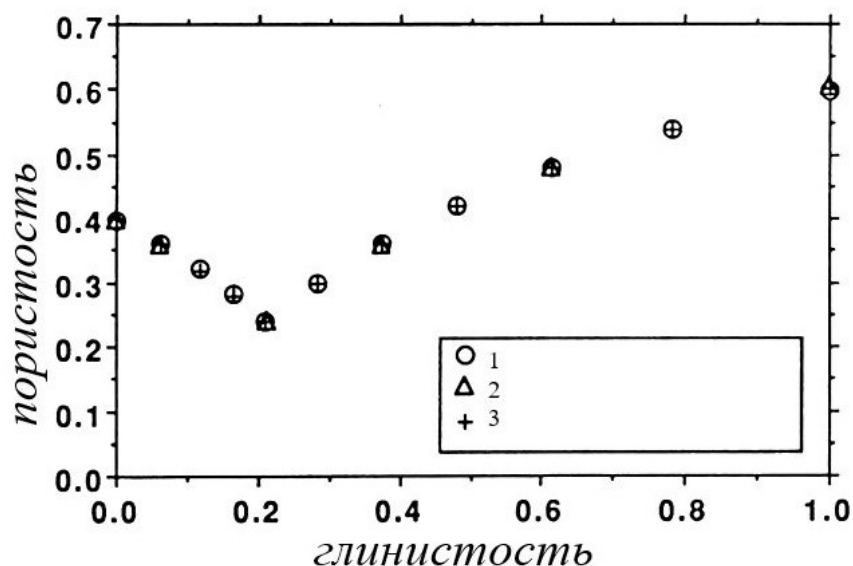


Рисунок 2.2 – Наблюдаемые и рассчитанные зависимости между пористостью и глинистостью для песчано-глинистых пород:

1 – Песчано-монтмориллонитовые породы,

2 – Песчано-каолинитовые породы, 3- рассчитанные значения [114]

При наличии в порах грунта других фаз (жидкости, биоты и т.п.), как правило оценивается эффективная или фазовая газопроницаемость, которая выражается в долях от абсолютной газопроницаемости, и зависит от влияния иных компонентов и фаз и от взаимодействия газа с различными составляющими грунта. Присутствие в порах воды или иных жидкостей является основным фактором, снижающим эффективную газопроницаемость. По мере увеличения заполнения

пор грунта водой эффективная газопроницаемость закономерно снижается и при полном водонасыщении грунта падает до нуля [27] (Рисунок 2.3)

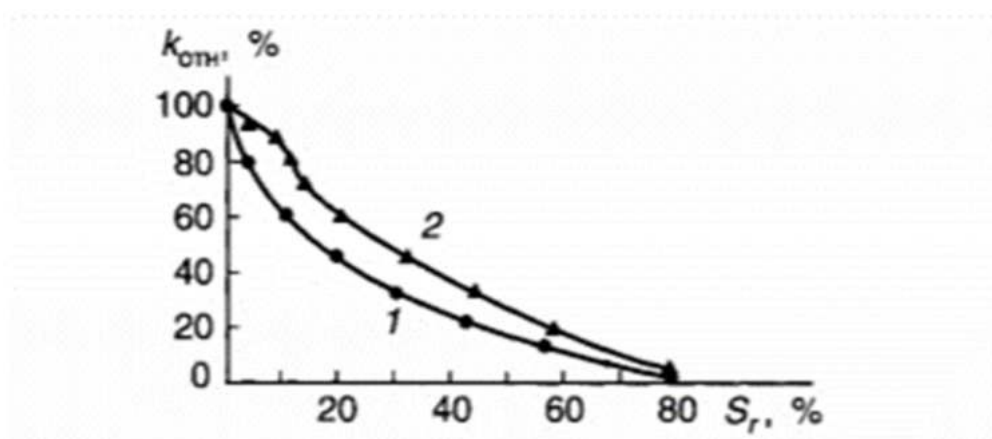


Рисунок 2.3 – Зависимость относительной проницаемости  $k_{отн}$  (по воздуху) от степени водонасыщения  $S_r$  мелкозернистых песчаников (по О.Ф. Корчагину и А.А. Ханину)

1 – пористость 18% и проницаемость 81 мД, 2 – пористость 23% и проницаемость 1279 мД

Количество воды, заполняющей поры, характеризуется влажностью. Различают весовую ( $W$ ) и объемную ( $W_{об}$ ) влажности. Первая определяется как отношение массы воды к массе сухой породы в долях или процентах от массы сухой породы. Под объемной влажностью понимают объем воды, содержащейся в единице объема породы. Если поры породы полностью заполнены водой, то объем воды в породе равен объему ее пор.

Влажность песчаных и глинистых пород в условиях естественного залегания может изменяться в сравнительно широких пределах. Так, например, естественная влажность песков в зоне аэрации нередко достигает 4 – 5%, в зоне капиллярного увлажнения и насыщения – 27 – 30%, а влажность тонкозернистых песков в этой зоне может достигать 35 – 40%. Естественная влажность глинистых пород изменяется в более широких пределах 12 – 90%.

Для характеристики степени насыщения пород водой используют коэффициент водонасыщения ( $G$ ), выражающий отношение естественной влажности пород ( $W$ ) к их полной влагоемкости (1):

$$G = \frac{W\gamma_M(1-e)}{e}, \quad (1)$$

где  $\gamma_M$  – плотность твердой части породы,

$e$  – коэффициент пористости, д.е.

Коэффициент водонасыщения выражают в долях единиц, его значение может изменяться от 0 до 1. Коэффициент водонасыщения характеризует фазовый состав песчаных и глинистых пород.

1.  $G = 0$ . Порода абсолютно сухая, состоит из двух фаз – твердой (скелета породы) и воздуха, заполняющего его поры.
2.  $G < 0.1 - 0.2$ . Порода воздушно-сухая, состоит из трех фаз – твердой (скелета породы), воздуха, заполняющего поры, и физически связанной воды, адсорбированной на поверхности частиц породы.
3.  $0.1 < G < 0.5$ . Порода маловлажная, состоит из трех фаз – твердой (скелета породы), воды, физически связанной на поверхности частиц и незначительно заполняющей поры породы, и воздуха.
4.  $0.5 < G < 0.8 - 0.95$ . Порода влажная или сильновлажная, состоит из трех фаз – твердой (скелета породы), воды, заполняющей ее поры, и воздуха, адсорбированного на поверхности частиц или заземленного в порах
5.  $G = 1$ . Порода водонасыщена, состоит из двух фаз – твердой (скелета породы) и воды, полностью заполняющей поры. Полностью водонасыщенными являются, как правило, породы, залегающие ниже уровня грунтовых вод.

При проведении исследований ВЧР песчано-глинистых грунтов с наличием приповерхностных скоплений газа – грунты относятся к 2,3,4 типу по фазовому составу пород. Отсутствие первого типа фазового состава песчаных и глинистых пород обусловлено наличием в них зоны аэрации.

Зона аэрации – это водоненасыщенная область геологической среды от поверхности до глубин первых десятков метров. Нижняя граница зоны аэрации совпадает с уровнем грунтовых вод. Часть пор и пустот зоны аэрации заполнены воздухом, а также частично водой в парообразном состоянии, физически связанной и капиллярной. Кроме того, в зоне аэрации обычно временно может находиться и гравитационная вода. Это, в отличие от зоны полного водонасыщения, определяет ее трехкомпонентный состав: минеральный скелет, вода, воздух. По особенностям

водного режима в зоне аэрации выделяется три подзоны – переменного увлажнения, транзита и капиллярной каймы (Рисунок 2.4) [37].

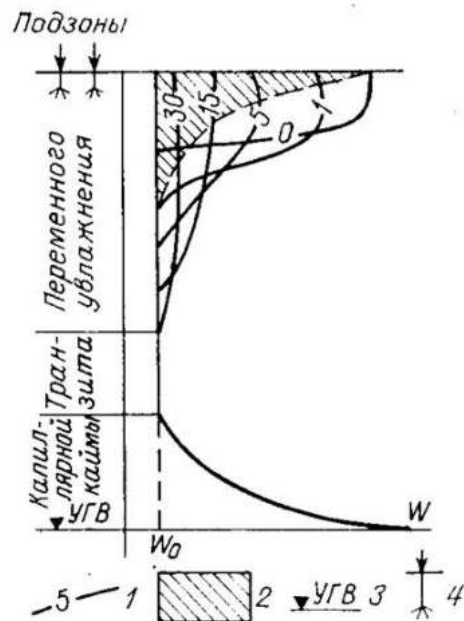


Рисунок 2.4 – Гидродинамический режим зоны аэрации. Перераспределение атмосферной влаги в зоне аэрации (по И.С. Пашковскому)

- 1 – эпюры влажности  $W$  на различные периоды времени после дождя, сутки ( $W_0$  – начальная влажность); 2 – области восходящих потоков влаги в результате испарения; 3 – уровень грунтовых вод; 4 – водно-атмосферное питание.

Зона аэрации непосредственно связана с наземной атмосферой. Вода в ней может удерживаться только на поверхности частиц в заземленном виде или в некоторых капиллярах. Часть воды в виде пара находится в воздухе, заполняющем поры и пустоты. Поверхностные воды при инфильтрации просачиваются через зону аэрации, поэтому ее также называют зоной инфильтрации. Влажность грунтов в этой зоне в разные периоды года существенно изменяется, так же, как и степень насыщения их водой. В засушливые периоды количество поровой влаги существенно уменьшается и породы становятся воздушно-сухими или маловлажными. После дождей, когда происходит инфильтрация поверхностных вод через зону аэрации, влажность горных пород, так же, как и степень насыщения их, повышается. В эти периоды насыщение пород водой может быть полным, и они

характеризуются как сильновлажные, или водонасыщенные. Следовательно, влажностный режим пород зоны аэрации изменчив и необходимо учитывать при проектировании и производстве инженерно-геологических изысканий.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать основные факторы, определяющие физические свойства песчано-глинистых грунтов ВЧР: пористость грунта, влажность грунта, структура грунта, минерализация поровой жидкости, температура, минералогический состав грунта. Данные характеристики основных физических свойств грунтов и их соотношения формируют инженерно-геологические условия, уникальные для конкретного объекта (территории) исследований. Пренебрегать и ограничивать информацию о инженерно-геологических условиях особенно недопустимо при геофизических исследованиях, так как они оказывают очень существенный вклад в вариативность геофизических параметров.

## **2.2 Предпосылки применения геофизических методов для изучения газонасыщенных песчано-глинистых грунтов**

Исследования газонасыщенных песчано-глинистых грунтов должны проводиться в составе инженерно-геологических изысканий для строительства, поэтому методический подход и технологии современной геофизики, используемые для их изучения, должны опираться на применяемую в Российской Федерации нормативную базу. Ведущими методами геофизических исследований при выполнении инженерных изысканий, в соответствии с действующей нормативной документацией, являются электроразведка и сейморазведка [СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ]. При этом, нормативная документация не регламентирует комплексирование геофизических методов для решения конкретных сложных геологических задач, таких как поиск линз газонасыщенных песков в верхней части разреза, можно решить только при комплексном подходе к проектированию и выполнению геофизических работ [53].

При выборе рационального комплекса геофизических методов необходимо исходить из сложившейся практики инженерно-геологических изысканий. Это значит, что геофизические методы, включаемые в предлагаемый комплекс, должны:

- соответствовать действующей нормативно-технической документации [85];
- широко применяться на практике при выполнении инженерных изысканий;
- быть экономически обоснованными.

Например, несмотря на высокую информативность и результативность сейсморазведки методом отраженных волн, данный метод достаточно ограниченно используется при инженерно-геологических изысканиях из-за высокой стоимости и значительных трудозатрат. Более широкое применение получил метод преломленных волн в модификации сейсмической томографии.

В предыдущем разделе обозначена вариативность геофизических параметров от особенностей инженерно-геологических условий исследуемого песчано-глинистого разреза с наличием локальных газонасыщенных линз. Поэтому целесообразно рассмотреть влияние основных факторов, изучаемых в инженерной электроразведке и сейсморазведке.

### **2.2.1 Геоэлектрические свойства песчано-глинистых грунтов**

Основными методами электроразведки в составе инженерно-геологических изысканий являются различные модификации методов сопротивлений, где основным изучаемым свойством является удельное электрическое сопротивление (УЭС). Удельное сопротивление грунтов изменяется в чрезвычайно широких пределах (от 0.1 до  $10^{10}$  Ом·м) и зависит от следующих факторов: 1) пористости; 2) влажности; 3) содержания глинистой фракции; 4) минерализации и химического состава вод; 5) структуры и текстуры пород; 6) температуры. Увеличение пористости, влажности, минерализации подземных вод в разной степени (от обратно пропорциональной до обратно квадратичной) уменьшает сопротивление породы. Как правило, связь удельного электрического сопротивления с геолого-

гидрогеологическими параметрами является эмпирической и находится опытным путем в пределах какого-либо района исследований. В результате большого объема экспериментальных исследований (главным образом, параметрических измерений в шурфах, скважинах – по данным [9]) получены достаточно представительные и статистически обоснованные корреляционные зависимости удельного электрического сопротивления рыхлых пород от ряда геолого-гидрогеологических показателей (рисунок 2.5).

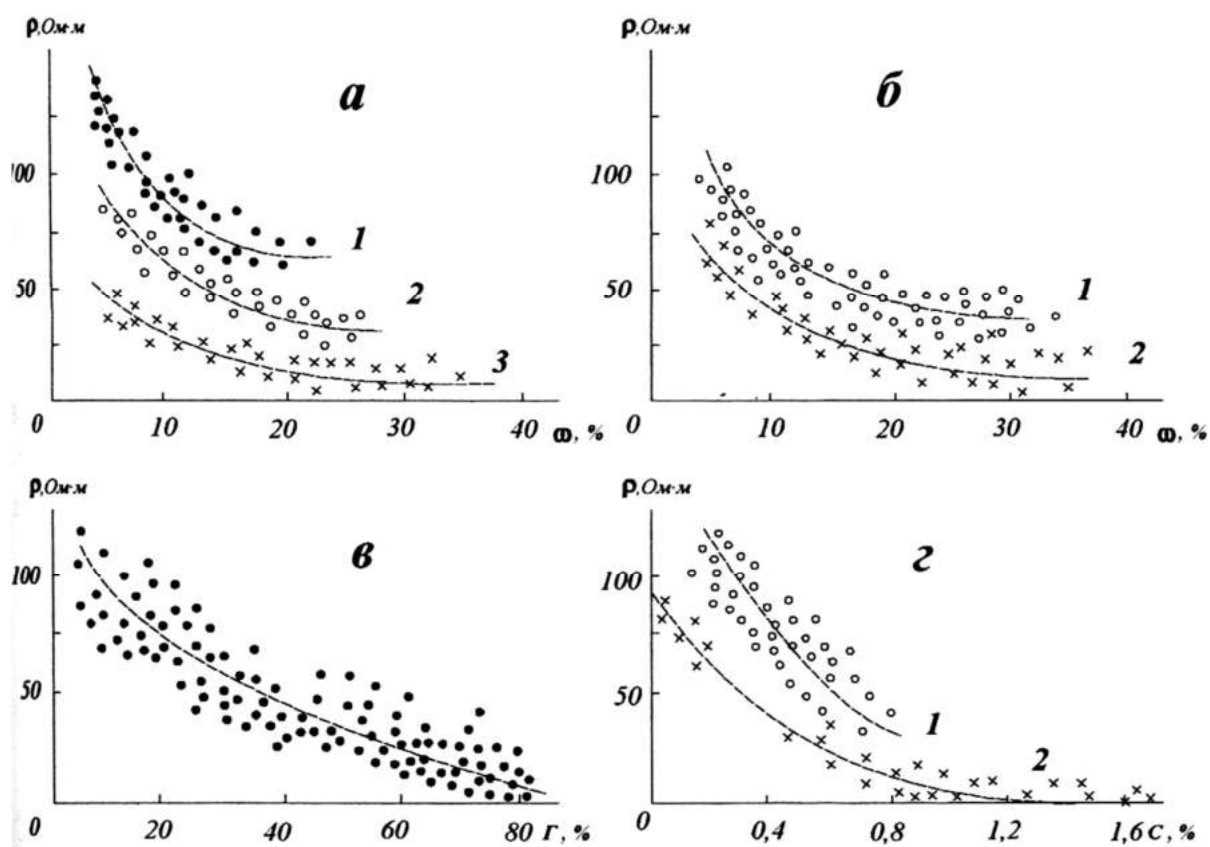


Рисунок 2.5 – Зависимость удельного электрического сопротивления от геолого-гидрогеологических параметров песчано-глинистых пород [9]:

а - от влажности  $W$ , полученная по результатам измерений в шурфах (1 - песок, 2 - супеси, 3 - суглинки),

б - от влажности  $W$ , по результатам каротажа сухих скважин (1 – легкие суглинки, 2 – средние и тяжелые суглинки)

в – от процентного содержания глинистой фракции,

г - от минерализации жидкой фазы пород зоны аэрации при влажности более 10% (1 – супеси, 2- суглинки)

Большинство породообразующих минералов являются диэлектриками и имеют УЭС свыше  $10^8$  Ом·м. Породы, состоящие из этих минералов, обладают ионным типом проводимости, который обусловлен наличием поровой влаги. Особое положение занимают глины, которые, благодаря тонкодисперсной структуре, удерживают вокруг твердых частиц тонкий слой поляризованных молекул воды, обладающий высокой удельной проводимостью. Благодаря этому слою сопротивление глин мало и составляет 3-20 Ом·м.

Минеральный скелет большинства горных пород, включая осадочные и из них особенно чистые (неглинистые породы), не проводит электрический ток. Насыщенная водой порода обладает электропроводностью благодаря содержащейся в ее порах воде. Таким образом, пористость оказывает основное влияние на прохождение электрического тока в породе. Фактором, оказывающим влияние на прохождение жидкости по порам, будет степень уплотнения. Существует ряд формул, выражающих зависимость относительного сопротивления от литологических факторов – пористости и степени цементации. Наиболее известная и широко применяемая это формула Арчи (2):

$$P = k_{\Pi}^{-m} \quad (2)$$

где  $P$  – относительное сопротивление,

$m$  – показатель степени пористости, который зависит от степени цементации породы (для рыхлых песков его значение будет равно 1.3),

$k_{\Pi}$  - коэффициент пористости горной породы [69].

Если в порах породы наряду с водой содержится газ, который не является проводником электрического тока, то из-за уменьшения объема пор, по которым может распространяться электрический ток, УЭС будет увеличиваться [66]. Проводимость газов имеет ионную природу, удельное сопротивление смеси газообразных углеводородов составляет  $10^{14}$  Ом·м. Заполнение пор горных пород помимо водных растворов нефтью и газом приводит к увеличению удельного электрического сопротивления [42].

Удельное электрическое сопротивление жидкостей, заполняющих поры и трещины в горных породах, зависит от концентрации растворенных солей и

температуры раствора. С ростом минерализации электрическое сопротивление водных растворов убывает. Увеличение количества растворенных солей в поровой влаге приводит к пропорциональному увеличению проводимости всего раствора. В меньшей степени на проводимость воды влияет тип растворенной в ней соли (Рисунок 2.6).

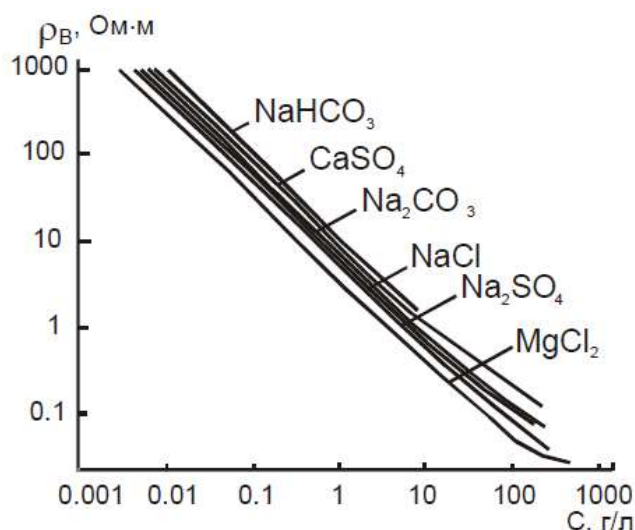


Рисунок 2.6 – Зависимость удельного электрического сопротивления воды от концентрации и химического состава растворенных солей [30]

В природных условиях наименьшим сопротивлением (менее 1 Ом·м) обладают глубинные сильноминерализованные, а также морские воды. Сопротивление подземных вод в зависимости от минерализации колеблется от 10-20 до 10<sup>2</sup> Ом·м. Воды поверхностных водотоков обладают сопротивлением 10-10<sup>2</sup> Ом·м, а дождевые – 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> Ом·м.

Используя предложенную В.В. Охтиным градацию грунтов по механическим свойствам, В.А.Шемшурин развил ее для сопоставления литологии (Л) с некоторыми геофизическими параметрами. Он выделил: глины (1 – тяжелые, 2 – средние, 3 – легкие); суглинки (4 – тяжелые, 5 – средние, 6 – легкие); супеси (7 – тяжелые, 8 – средние, 9 – легкие); пески (10 – мелкозернистые, 11 – среднезернистые, 12 – крупнозернистые). Приведенные номера градаций литологических разностей пропорциональны логарифму среднего диаметра ( $d_{cp}$ ) частиц твердых фракций (при основании логарифма, близком к 2). Зависимость литологического ряда глина-суглинок-супесь-песок от их удельного

электрического сопротивления, составленная А.А. Огильви, приведена на рисунке 2.7.

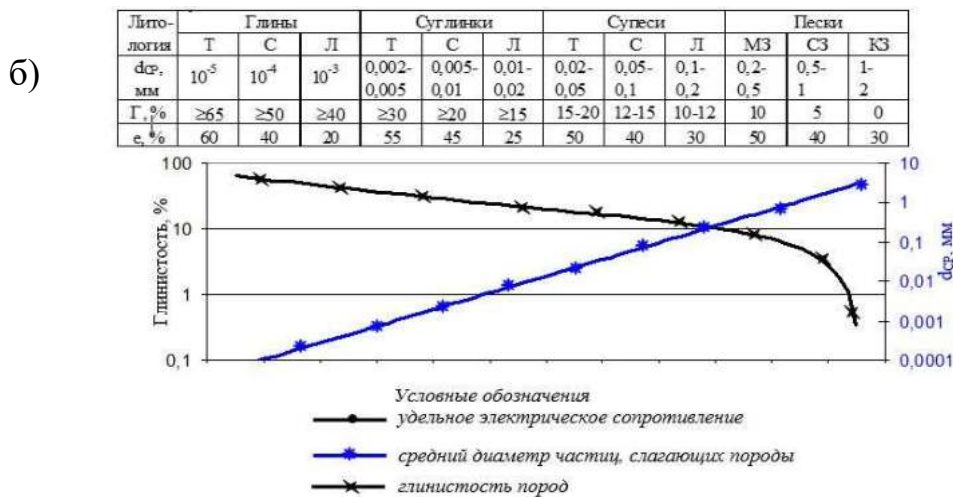
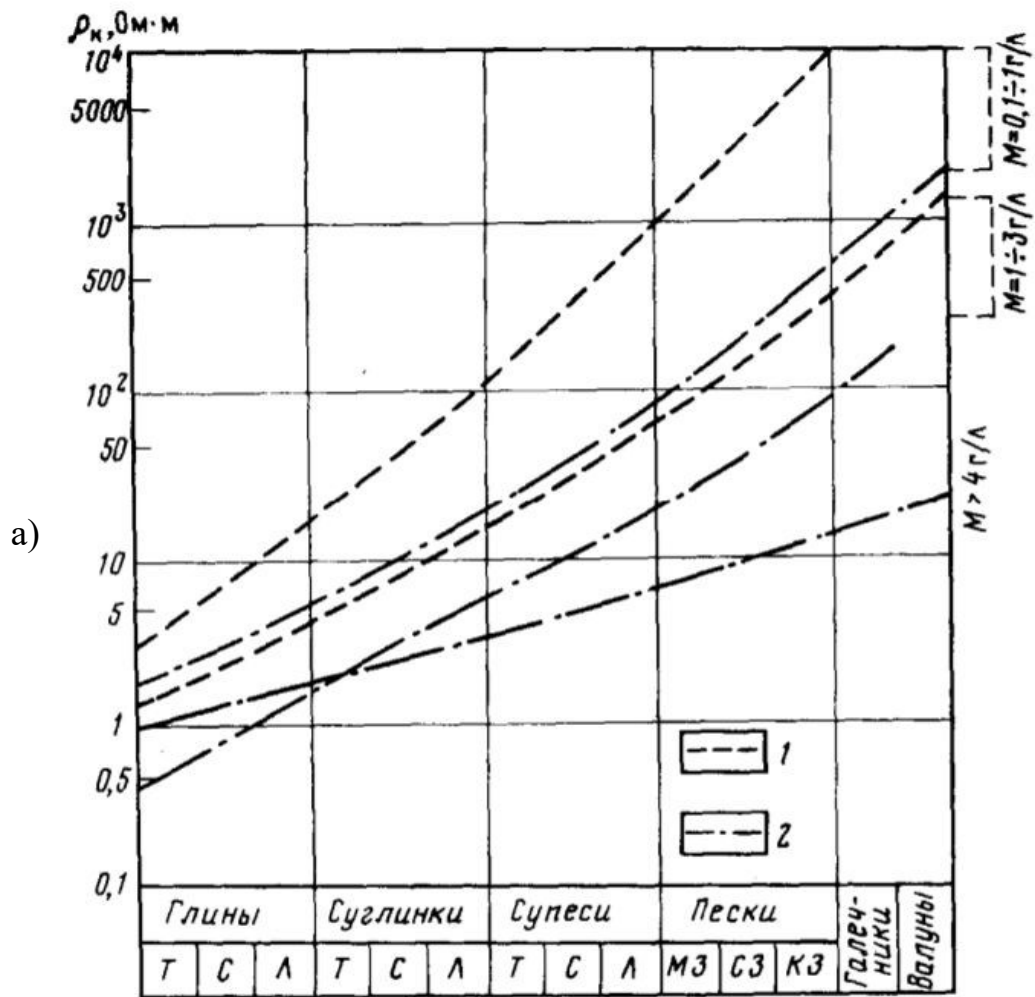


Рисунок 2.7 – Зависимость удельного электрического сопротивления (а) от литологического состава (б) при естественной влажности (1) и полного водонасыщения (2).

Обозначения: d<sub>ср.</sub> – средний диаметр частиц, слагающих породы, Г – глинистость, е – коэффициент пористости, Т, С и Л – тяжелые, средние и легкие для соответствующих глинистых пород, МЗ, СЗ и КЗ – мелко-, средне- и крупнозернистые пески

Изменение удельного электрического сопротивления рыхлых и слабосвязанных грунтов зависит от количества глинистых частиц, которое определяет основные физико-механические и деформационные характеристики и заполнителя порового пространства. При полном насыщении порового пространства влагой увеличение пористости пород сопровождается пропорциональным уменьшением сопротивления пород. Поэтому в природных условиях водонасыщенные породы обычно имеют низкое УЭС. Сухие (залегающие выше зоны аэрации) или газонасыщенные породы характеризуются высокими значениями УЭС.

Пределы изменений УЭС, характерные для песчано-глинистых пород приведены в Таблице 2.4 [16].

Таблица 2.4 – Удельные электрические сопротивления песчано-глинистых грунтов

Наименование горной породы	УЭС мин., Ом·м	УЭС типовое, Ом·м	УЭС макс. Ом·м
Глины	5	10	15
Суглинки	15	30	50
Супеси	30	50	80
Пески водонасыщенные	50	80	200
Пески слабо увлажненные	100	150	500
Пески сухие	200	500	10000

### 2.2.2 Упругие свойства песчано-глинистых грунтов ВЧР

К сейсмическим свойствам горных пород относятся скорости распространения продольных и поперечных волн, их соотношение и коэффициенты затухания продольных и поперечных волн [26]. Скорость – это петрофизическая характеристика осадков, которая связана с другими характеристиками – литологией, пористостью, проницаемостью, плотностью, флюидонасыщением [71].

Как показывают многочисленные экспериментальные данные, сейсмические свойства грунтов существенно зависят от соотношения в них твердой, жидкой и газообразной фаз. По экспериментальным данным, для большинства горных пород характерна положительная корреляция между их плотностью и сейсмическими скоростями, т.е. более плотные породы обычно являются и более высокоскоростными. С увеличением плотности породы, как правило, еще быстрее возрастает модуль Юнга, в различных горных породах этот модуль изменяется на несколько порядков – от уровня около 25 МПа в слабых осадочных образованиях до уровня 125 ГПа в крепких изверженных породах. За счет этого фактора величины сейсмических скоростей могут различаться в десятки раз [70].

По характеру структурных связей песчано-глинистые породы делятся на два типа: песчано-обломочные (силы трения на контактах) и глинистые, в которых преобладают водно-коллоидные связи. Кроме того, есть переходные типы. Для указанных типов пород зависимость сейсмоакустических свойств от указанных факторов различна [56].

#### *Крупнообломочные и песчаные породы*

Очень существенным фактором для величин сейсмических скоростей является их пористость. При прочих равных условиях, с увеличением пористости породы сейсмические скорости в ней уменьшаются. Эта зависимость наиболее выражена в терригенных отложениях, у которых величина пористости может достигать 30-40%. Изменение пористости непосредственно влияет на плотность грунта. В зависимости от типа заполнителя при пористости песчаников в 20% и заполнении пор газом их плотность будет ниже на 10 – 15%, чем у водонасыщенных [42].

Такие породы, особенно пески и песчаники, рассматривают как гетерогенные среды, состоящие из твердого скелета (зерен) и пор, заполненных флюидом (жидкостью, газом и их смесью). Скорость продольных волн в двухфазных дискретных средах, состоящих из твердых частиц и жидкого или газового заполнителя, при отсутствии внешнего давления, составляет для сухих песков 200 – 700 м/с и для водонасыщенных песков 1500 – 2000 м/с. Для сухого и

водонасыщенного галечника 400 – 800 и 2000 – 2700 м/с. Величина  $V_s$  в отличие от  $V_p$  практически не изменяется при переходе обломочно-песчаных пород из воздушно-сухого состояния в водонасыщенное и составляет для песков 100 – 400 м/с и для галечника 250 – 500 м/с. Отношение  $V_s/V_p$  для случая заполнения пор воздухом 0.6 – 0.7, водой – 0.1 – 0.2. Сейсмические скорости неконсолидированных пород в значительной степени зависят от водонасыщенности. На рисунке 2.8 показано влияние степени водонасыщенности на скорости продольных и поперечных волн. При степени водонасыщения ниже критической заметного влияния на скорость не наблюдается. При полном водонасыщении (более 90%) наблюдается резкое увеличение скорости продольных волн  $V_p$  и незначительное снижение скорости поперечных волн  $V_s$  [101].

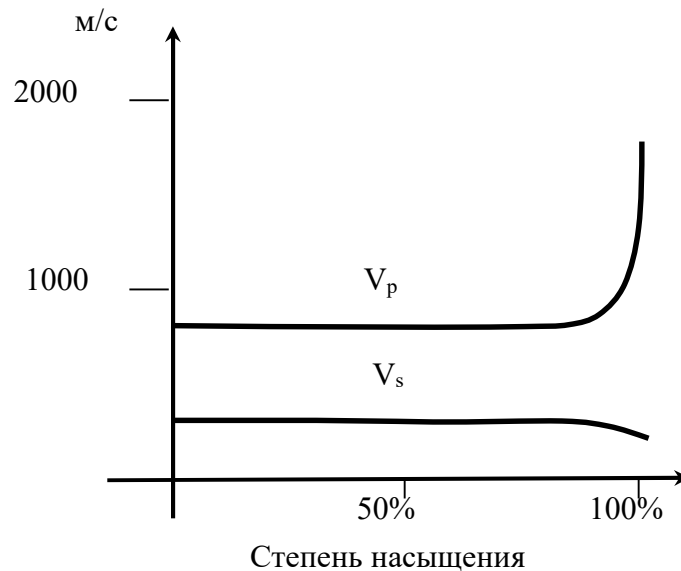


Рисунок 2.8 – Зависимость изменения скоростей продольных и поперечных волн от степени водонасыщения [101]

### *Глинистые породы*

В коренных глинах наблюдаются большие значения скоростей  $V_p$ , чем в молодых четвертичных. Для первых обычно  $V_p > 1000$  м/с, для вторых –  $V_p < 1000$  м/с. Это объясняется уплотнением коренных глин при диагенезе, в результате чего возникает структурное сцепление, которое вместе со связностью увеличивает прочность глин. Поэтому плотные коренные глины ведут себя при малых давлениях до 0.2 МПа как жесткие породы: не деформируются,  $V_p$

заметно не изменяется. Для четвертичных глин, в которых структурные связи не установились, наблюдается плавное возрастание  $V_p$  и  $V_s$  с увеличением глубины и давления. Скорость  $V_s$  в коренных глинах составляет 250 – 700 м/с, а в четвертичных глинах 100 – 250 м/с. Отношение  $V_s/V_p$  для коренных глин составляет 0.15 – 0.25; для четвертичных глин 0.25 – 0.35; для суглинков 0.30 – 0.50 [56].

Зависимость скоростей  $V_p$  и  $V_s$  от объемной влажности  $\omega_v$  для песчано-глинистых пород изучена Н.Н. Горяиновым [26]. На графике, представленном на рисунке 2.9 наблюдается вначале рост  $V_p$  с увеличением влажности  $\omega_v$ . При достижении полной молекулярной влагоемкости рост  $V_p$  прекращается. Дальнейшее увеличение  $\omega_v$  вызывает образование свободной (гравитационной) воды, не влияющей на  $V_p$  вплоть до полного водонасыщения, когда  $V_p$  резко увеличивается.

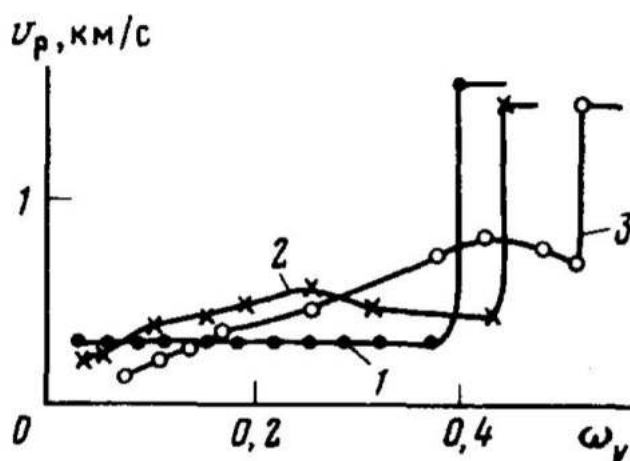


Рисунок 2.9 – Зависимость скорости продольных волн от объемной влажности для песчано-глинистых пород: 1 – песок,  $k_{п} = 40\%$ ; 2 – каолиновая паста,  $k_{п} = 44\%$ ; 3 – гидрослюдисто-каолиновая паста,  $k_{п} = 52\%$  [26]

Данные полевых наблюдений показывают [56], что при расположении уровня воды в четвертичных глинах и суглинках, как и в песках, наблюдается возрастание значений  $V_p$  в грунтах, расположенных ниже уровня УГВ до значений 1400 – 1600 м/с. Однако, эта граница менее резкая, чем в песках, так как из-за наличия над уровнем воды капиллярной каймы образуется небольшая (1 – 3 м) переходная зона. В результате четвертичные и коренные глины при их

расположении ниже уровня воды могут мало различаться по значению  $V_p$ . Однако, как указано выше, наблюдается заметное различие в значениях  $V_s$ . Отсюда вытекает заметное различие отношений  $V_s/V_p$  для коренных и четвертичных глин, расположенных ниже уровня воды. Для последних  $V_s/V_p$  составляет 0.16 – 0.08, а для коренных глин  $V_s/V_p$  около 0.2. Аномально низкие скорости поперечных волн – менее 300 м/с, а иногда менее 100 м/с наблюдаются в илистых отложениях, слоях торфа на болотах и связаны с насыщением их воздухом или болотным газом [43].

Для осадочных пород характерно более или менее существенное увеличение скорости с глубиной их залегания из-за роста горного давления. Это обусловлено, с одной стороны, уменьшением пористости, с другой стороны, скорость зависит от площади соприкосновения соседних зерен породы, которая возрастает с увеличением давления, что приводит к увеличению модуля Юнга и, соответственно, скоростей упругих волн.

Пески относятся к грунтам с несвязной структурой, у них отсутствуют структурные связи между отдельными частицами. Такие грунты характеризуются высокой пористостью (30-40%), относительно небольшой плотностью (1.6 – 2.2 г/см<sup>3</sup>). Прочность и деформируемость таких грунтов определяется размером и однородностью структурных элементов, их формой, характером поверхности и степенью уплотнения [83].

На экспериментальных данных в работах [67,68] показано, что с ростом пористости и коэффициента пористости природных грунтов также происходит закономерное снижение скоростей продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн.

С увеличением пористости снижаются модули упругости и прочность грунтов. Для рыхлых слабосцементированных грунтов важными характеристиками прочностных свойств являются сцепление  $C$  и угол внутреннего трения  $\phi$ , определяющие сопротивление породы сдвигу. Для песков сцепление и угол внутреннего трения в значительной степени зависят от минералогического, гранулометрического состава и формы зерен [41]. Для песка одного и того же состава сопротивление сдвигу зависит от плотности сложения. С ростом пористости уменьшается плотность породы, что в свою очередь сказывается на

прочностных свойствах грунта и его скоростных характеристиках. Наличие газа в порах грунта также является причиной снижения плотности.

Углеводородные газы обычно состоят из легких алканов (метан, этан, пропан и др.), более тяжелые углеводороды будут присутствовать в газе в зависимости от давления, температуры и истории залежи. Газовые смеси характеризуются удельным весом  $G$ , отношением плотности газа к плотности воздуха при  $15,6^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении. Типичные газы имеют значения  $G$  от 0,56 для почти чистого метана до более 1,8 для газов с более тяжелыми компонентами и более высоким числом атомов углерода. Значения плотности представлены на рисунке 2.10.

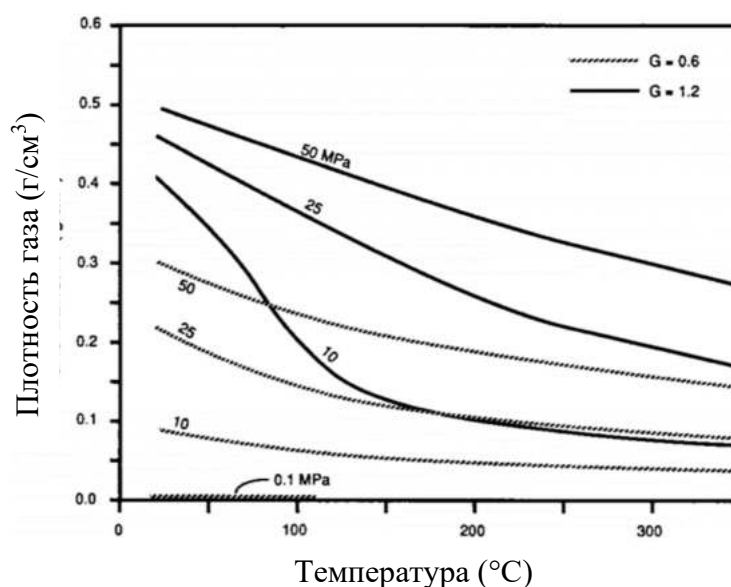


Рисунок 2.10 – Плотность углеводородного газа в зависимости от температуры и давления

Литологические границы в рыхлых породах являются неконтрастными для продольных волн, которые имеют наиболее сильное преломление на границе УГВ и проследить с помощью их границы, залегающие ниже УГВ, бывает проблематично в условиях слабого контраста скоростей. Поэтому, при необходимости выделения границ в обводненных породах целесообразно использовать скорости поперечных волн [60]. Известно, что присутствие флюида приводит к уменьшению скорости продольных волн в горных породах. Скорости

поперечных волн в породе с двухфазным заполнителем ведут себя противоположным образом, так как тип флюида не влияет на сопротивление породы сдвиговой компоненте – она ослабляется только присутствием пор. Изменения скоростей поперечных волн возникают лишь за счет изменения плотности флюида и по масштабам они значительно меньше, чем для скоростей продольных волн [18].

В связи со слабой дифференциацией по скоростным характеристикам песчано-глинистых пород, определяющее влияние на численные значения скоростей оказывает давление вышележащей толщи и структурное упрочнение пород с глубиной, которое обычно преобладает над влиянием литологии, поэтому для песчано-глинистого разреза характерно градиентное нарастание скорости с глубиной и основной тип волн, которые будут формироваться в таком разрезе, будут преломленные рефрагированные волны.

Скорости распространения упругих волн, характерные для песчано-глинистых грунтов, приведены в Таблице 2.5 [58].

Таблица 2.5 – Скорости распространения продольных и поперечных волн в песчано-глинистых грунтах

Наименование грунтов	$V_p$ , м/сек.	$V_s$ , м/сек.
Насыпные грунты рыхлые неводонасыщенные	100 - 300	70 - 150
Гравелисто-песчаные грунты	200 - 500	100 - 250
Песчаные грунты маловлажные (сухие)	150 - 900	130 - 500
Песчаные грунты средней влажности	250 - 1300	160 - 600
Песчаные грунты водонасыщенные	300 - 1600	200 - 800
Супеси	300 - 1200	120 - 600
Суглинки	1000 - 1400	140 - 700
Глинистые грунты влажные, пластичные	500 - 2800	130 - 1200
Глинистые грунты плотные, полутвердые и твердые	2000 - 3500	1100 - 2000

Помимо анализа кинематических характеристик упругих волн, которые в песчано-глинистом разрезе слабо дифференцированы, важное значение имеет дополнительный анализ динамических параметров упругих волн сейсмического

сигнала, наиболее важным из которых является затухание амплитуды волны. Значения затухания характеризуют неоднородности литологического состава геологического разреза, в котором проходит упругая волна. С помощью оценки затухания амплитуд сейсмических волн можно оценить различия таких параметров геологической среды, как неравномерное распределение в среде слоистости, трещиноватости, пористости, насыщенности [48].

Исследованием поглощающих свойств геологических сред занимались многие ученые начиная с 50-х годов прошлого века [4,18,45]. Под руководством В.И. Рыжкова разработаны механизмы, объясняющие аномальное поглощение и дисперсию скорости сейсмических волн в залежах нефти и газа [79]. Амплитуды преломленных волн реже используются в практике сейсмических исследований. Nikrouz [111] показал, что изменение амплитуды на границе преломления волны связано с изменением скорости. Чем выше контраст скоростей на границе 2-х геологических сред, тем ниже будет амплитуда волны [112].

Среди прочих факторов, влияющих на поглощение сейсмической энергии, такие как: неэластичность матрицы, диссипация трения вследствие относительных движений на границах зерен и поперек поверхностей трещин, были выделены и частичное газонасыщение в водонасыщенном грунте. Влияние внутривещного давления флюида противоположно действию внешнего всестороннего давления. Повышение порового давления приводит к уменьшению эффективного давления, соответствующего разнице внешнего и внутривещного давления, что приводит, в свою очередь, к уменьшению скорости и возрастанию затухания сейсмических волн [48]. В монографии [41] также отмечается что, чем ниже скорость распространения упругих колебаний в породе, тем выше значения коэффициента поглощения, с увеличением пористости поглощение возрастает.

При измерениях на сейсмических частотах коэффициент поглощения осадочных рыхлых пород (галечники, рыхлые глины, пески, лёссовые суглинки), залегающих на глубинах до 50 м, составляет  $0.01 - 0.1 \text{ м}^{-1}$ . На тех же частотах, залегающие глубже 100 м, песчано-глинистые породы имеют коэффициент поглощения от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-1}$ . Плотные осадочные породы (мергели, доломиты,

известняки и пр.), залегающие на глубинах более 500 м, имеют коэффициент поглощения в пределах  $10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ .

Практических результатов оценки коэффициента затухания и декремента поглощения для осадочных пород, формирующих верхнюю часть разреза, крайне мало. Трудности в определении характеристик поглощения, экспериментальные значения которых сильно отличаются от теоретических в силу сложности механизма поглощения, на данном этапе развития как сейсмоакустических, так и инженерно-геологических методов изучения свойств грунтов приходится пользоваться не столько функциональными, сколько статистическими зависимостями [59].

Параметры коэффициента затухания продольных и поперечных волн для песчано-глинистых грунтов приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Значения коэффициента затухания продольных и поперечных волн для песчано-глинистых грунтов [58]

Наименование грунтов	Тип волн	Частота, Гц	Коэффициент затухания, $[\text{м}^{-1}]$
Гравийно-галечные и песчаные грунты, суглинки, рыхлые глины	-	5 - 35	0.6 – 0.1
Песчано-глинистые породы	-	70	0.048 – 0.35
Сухая твердая глина	P	80 – 140	0.095
Влажная пластичная глина	P	20 – 40	0.06 – 0.07
Влажная пластичная глина	S	30	0.35
Влажная пластичная кембрийская глина	S	30 – 70	0.33 – 0.5

### 2.3 Выводы по главе 2

1. Инженерно-геологические условия ВЧР песчано-глинистых грунтов сильно варьируются и вызывают существенные изменения в геоэлектрических и упругих свойствах, поэтому методические рекомендации и подходы к изучению локальных мест скоплений газа являются единственными и уникальными для конкретного изучаемого участка (территории) с учетом соотношения инженерно-геологических показателей.
2. Важнейшими физическими свойствами, влияющими на газопроницаемость, являются: глинистость, пористость и влажность грунта. Содержание глинистых частиц определяет экранирующие способности грунта, чем их больше, тем меньше газопроницаемость. УЭС грунтов также зависит от глинистости, пористости и влажности. Таким образом целесообразно применение метода сопротивлений с целью выявления газонасыщенных интервалов разреза.
3. Глинистые грунты при залегании ниже уровня подземных вод характеризуются слабым контрастом по значению  $V_p$ , но при этом отмечается заметное отличие в значениях  $V_s$ , следовательно для задач, связанных с изучением песчано-глинистых грунтов ВЧР с наличием приповерхностных скоплений газа целесообразно проводить анализ распределения  $V_s$ .
4. Для формирования физико-геологических моделей песчано-глинистых грунтов ВЧР с наличием приповерхностных скоплений газа необходимо выявить особенности изменения геоэлектрических и упругих свойств для конкретных инженерно-геологических условий исследуемого участка (территории).

### **ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРО- И СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ВЧР С ЛОКАЛЬНЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ ГАЗА**

Для обоснования эффективности и целесообразности применения комплекса геофизических методов необходимо сформировать базовую характерную для инженерно-геологических условий Юго-Запада Ленинградской области физико-геологическую модель (ФГМ). Как рассматривалось в главе 2, инженерно-геологические условия носят уникальный характер и требуют дополнительного изучения для каждого объекта (участка, площади и т.д.), поэтому выполнялись экспериментальные исследования на участке, расположенном на Юго-Западе Ленинградской области с известным, вскрытом скважиной, приповерхностным скоплением газа с целью установления закономерностей изменения УЭС и скоростей упругих волн инженерно-геологического разреза данной территории. Анализ геологической и справочной информации по участку на Юго-Западе Ленинградской области, результаты экспериментальных геофизических работ легли в основу формирования базовой физико-геологической модели (ФГМ) ВЧР песчано-глинистых грунтов с наличием локальных скоплений газа. Данная ФГМ служит основой для моделирования геоэлектрических и сейсмических полей различных типов песчано-глинистого разреза с включением неоднородностей, представляющих собой скопления газа в песчаных линзах и валунно-галечного материала.

#### **3.1 Особенности инженерно-геологического строения участка с зафиксированными газопроявлениями на Юго-Западе Ленинградской области**

Основой для изучения инженерно-геологического разреза являются прямые геологические методы – бурение скважин с отбором и изучением керна. По результатам бурения скважин в пределах участка, расположенного на Юго-Западе Ленинградской области, выявлено два интервала газопроявлений, относящихся к

четвертичным отложениям. Первый газонасыщенный ленинградский горизонт залегает на глубинах 14.0-14.2 м, мощность пласта составляет 1.5 – 3.1 м. Второй газонасыщенный горизонт вскрыт на глубине 20.0 м мощностью 5.0 – 9.0 м. Оба интервала представлены водогазонасыщенными песками. Выделенные песчаные пласты характеризуются неравномерным распространением по геологическому разрезу, имеют зоны выклинивания или замещения более плотными породами. Аккумуляция газов происходит, в основном, в отложениях ленинградской свиты валдайского надгоризонта.

Песчаные отложения характеризуются высокой пористостью до 31.83%, проницаемостью до 950 мД, плотностью от 1.28 до 1.61 г/см<sup>3</sup>. Содержание C<sub>орг</sub> в среднем составляет 0.25%. Отложения насыщены, в основном, легкими битумами. Средние значения физических свойств песчаных пластов участка исследований приведены в таблице 3.1 [73].

Наиболее интенсивные газопроявления наблюдались в межморенном горизонте, где газопродуктивными слоями служат микулинские суглинки и глины с высоким содержанием органики. Состав газа четвертичных отложений является, в основном, метановым с примесями азота [73].

Таблица 3.1 – Средние значения физических свойств песчаных пластов участка исследования

Название горизонта	Пористость, %	Плотность скелета, г/см <sup>3</sup>	Проницаемость, мД
Ленинградский горизонт, 1 – й песчаный пласт	26.78	1.47	732.14
Ленинградский горизонт, 2 – й песчаный пласт	25.42	1.54	679.72
Ленинградский горизонт, 3 – й песчаный пласт	28.85	1.47	976
Московский горизонт	26.08	1.66	668

Наличие органики зафиксировано в осташковском, ленинградском, микулинском и московском горизонтах четвертичных отложений, причем, газонасыщенные пески встречены в трех песчаных пластах ленинградского горизонта. Наиболее интенсивные газопроявления наблюдались с глубины от 17 до 20 м. Органика обнаружена в суглинках осташковского горизонта; в пласте глин, залегающем между песчаными пластами ленинградского горизонта и в самих песчаных пластах, в глинах межморенных отложений микулинского горизонта, и в моренных отложениях московского горизонта. На рисунке 3.1 приведена колонка инженерно-геологической скважины, которая характеризует типовой разрез исследуемого участка.

Подстилающими отложениями являются глины микулинского горизонта с высоким содержанием органики и раковин. Мощность отложений колеблется от 4.8 м до 10.5 м. Глины, слагающие данные отложения, плотные (до  $2.03 \text{ г/см}^3$ ), проницаемость не превышает 0.01 мД, характеризуются наличием большого количества органики, содержание органического углерода достигает 0.59%. Микулинские отложения содержат легкие и маслянистые битумы.

Обнаруженный газ на исследуемой территории имеет биогенное происхождение из четвертичных отложений, что подтвердилось результатами лабораторных исследований по определению изотопного состава углерода метана и гомологов аналитическим расчетом соотношения изотопов углерода в метане и газообразных углеводородных компонентах отобранного газа. Средняя плотность газовой смеси, по данным лабораторных исследований составляет от 0.8 до  $1.2 \text{ кг/м}^3$  [73].

Мощность слоя, м	Глубина слоя, м	Абс. отметка подошвы слоя, м	Геолого-литологический разрез	Наименование пород и их характеристика	Сведения о воде		
					Появление воды	Уровень, уровень	Глубина отбора образцы
0.30	0.30	6.28		почвенно-растительный слой с корнями деревьев			
2.00	2.30	4.28		суглинок серо-коричневый полутвердый, прослой (до 2 см) песка коричневого мелкого малооблажного линзы супеси пластичной, включения грабля и гальки гранита 50%, отдельные валуны гранита.			2
6.90	9.20	-2.62		суглинок серый тугопластичный, прослой (до 5 см) суглинка серого мягкопластичного, линзы песка мелкого водонасыщенного, с глубины 4.2 м – включения грабля и гальки гранита до 15%.		5.6 06.07.18	4 6
8.40	17.60	-11.20		суглинок серый мягкопластичный, гнезда песка пылеватого малооблажного, включения грабля и гальки гранита до 25%. С глубины 12.4 м – прослой (до 5–10 см) суглинка текучепластичного, тонкие (1–3 мм) прослойки песка пылеватого светло-коричневого. В интервалах 14.5–15.3 и 17.2–17.4 м – грабляно-галечниковый прослой.			8 10 12 14 16 18
3.40	21.00	-14.42		Песок серо-коричневый пылеватый водонасыщенный, плотный, гнезда песка мелкого. В кровле слоя (17.6–18.0 м) валуно-галечниковый прослой.	17.6 31.05.18		20
4.20	25.20	-18.62		Песок светло-коричневый средней крупности водонасыщенный, однородный плотный, гнезда песка серого пылеватого плотного.			22 24
5.10	30.30	-23.72		Песок светло-коричневый средней крупности водонасыщенный, однородный плотный, гнезда песка серого пылеватого плотного.			26 28 30
9.20	39.50	-32.92		Глина серая, темно-серая пластичная, с глубины 33,5 м включения орехники в интервале 36,0–39,0 м – мелкие (3–5 мм) раковины, редкие окатанные гальки гранита.			32 34 36 38

Рисунок 3.1 – Колонка скважины, характеризующая инженерно-геологический разрез участка исследования

### 3.2 Распределение УЭС песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа на Юго-Западе Ленинградской области

Непосредственно на участке с зафиксированными газопроявлениями на Юго-Западе Ленинградской области проведены экспериментальные электроразведочные исследования [50], по результатам обработки и интерпретации которых получены следующие пределы значений УЭС для грунтов, формирующих геологический разрез участка исследования (таблица 3.2):

Таблица 3.2 – Удельные электрические сопротивления песчано-глинистых грунтов участка исследования

Характеристика грунта по данным инженерно-геологических работ	Пределы изменений значений УЭС, Ом·м
Осташковский горизонт, гляциолимнический времени отступления ледника, супесь, суглинки серые, твёрдые, с гравием и галькой (20-35%), единичные валуны	20 – 50
Ленинградский горизонт, суглинки серые, тугопластичные, тяжёлые, с гравием и галькой (15-20%)	20 – 150
Прослой песка газонасыщенного	500 – 700
Микулинский горизонт, мгинская свита глины с высоким содержанием органики	70 – 150
Московский горизонт, флювиогляциальные отложения пески, суглинки, ленточные глины с включениями гравия и щебня	20 – 50

Как видно из приведенной выше таблицы 3.2, при интерпретации данных электроразведки возникает неоднозначность разделения высокоомных аномалий, которые могут быть связаны как с газонасыщенными песками, так и с включениями неоднородностей (гнезда песка, гравий, щебень) в толще суглинков и глин со скоплениями крупнообломочного материала.

Значения УЭС для песчано-глинистого разреза взяты согласно данным [64], исходя из следующих наблюдений:

– уровень УГВ 1.0 – 1.2 м (по данным бурения), т.е. все моделируемые слои находятся в состоянии полного водонасыщения;

- скопления крупнообломочного материала, по данным бурения, представлены валунно-галечниковыми отложениями с песчаным или глинистым заполнителем;
- в верхней части газонасыщенных песчаных отложений, по данным бурения, имеется сухой слой мощностью от 0.4 до 0.8 м;
- нижний слой газонасыщенных песков, мощностью от 1.5 до 3 м находится по данным бурения в состоянии полного водонасыщения;
- растворенные в воде газы не оказывают влияние на УЭС водонасыщенных песков, так как невозможно учесть влияние растворенных газов на УЭС;
- УЭС водонасыщенных песков определяется УЭС воды, заполняющей песчаные отложения, и составляет 70 – 150 Ом·м (по данным электроразведочных работ и лабораторным определениям УЭС отобранных проб воды);
- подстилающие газогенерирующие грунты представлены глинами и суглинками с включениями гравия, щебня, песка до 15% согласно данным бурения.

Присутствие в поровом пространстве нефти или газов существенно увеличивает УЭС пород, поскольку их наличие эквивалентно сокращению доли проводящего компонента в объеме породы.

В процессе моделирования необходимо рассмотреть следующие геоэлектрические модели:

1. Песчано-глинистый разрез с включением локальной неоднородности крупнообломочного материала в слое суглинков;
2. Песчано-глинистый разрез с включением локальной неоднородности газонасыщенной песчаной линзы.

Таким образом, используя метод электротомографии применительно к исследуемому разрезу песчано-глинистых отложений, необходимо выделить следующие интервалы разреза:

- приповерхностную часть, связанную с рыхлыми песчано-глинистыми отложениями;
- песчаные линзы, связанные со скоплениями газа;

– подстилающие глинистые отложения, богатые органическим веществом, которые являются источником биогенных газов.

### 3.3 Распределение скоростей упругих волн песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа на Юго-Западе Ленинградской области

На участке с зафиксированными газопроявлениями на Юго-Западе Ленинградской области, наряду с экспериментальными электроразведочными исследованиями, так же выполнены сейсморазведочные работы методом КМПВ. Выделение границ корреляционным методом преломленных волн выполнялось с помощью программного обеспечения RadExPro Plus методом  $t_0$ . Результатом интерпретации данного метода является определение геометрии преломляющей границы и значений граничных скоростей и скоростей в покрывающем слое. (Рисунок 3.2). Верхняя граница построена по данным измерений по профилю с шагом между пунктами возбуждения (ПВ) 2 м и дает представление о скоростях в верхней части разреза до 5 м. Вторая граница получена при исследованиях с шагом между ПВ 5 м характеризует границу между суглинками и песками ленинградского горизонта, для данной границы характерна изменчивость скорости по латерали, которая, по всей вероятности, объясняется включением локальных скоростных неоднородностей в разрезе.

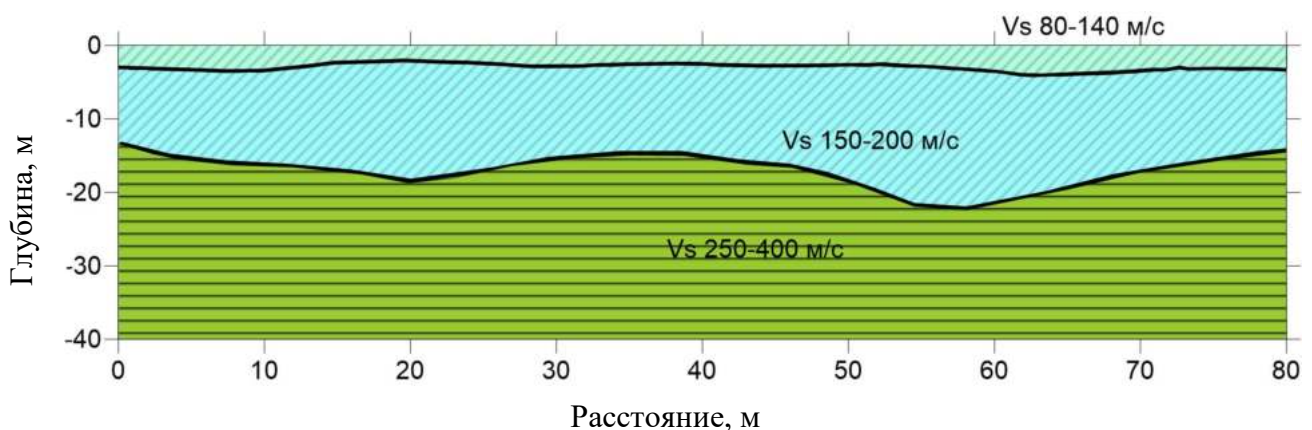


Рисунок 3.2 – Границы песчано-глинистого разреза, выделенные по методу КМПВ участка исследования

Скорости продольных и поперечных волн, полученные на участке экспериментальных исследований, приведены в таблице 3.3:

Таблица 3.3 – Скорости распространения продольных и поперечных волн в песчано-глинистых грунтах участка исследования

Характеристика грунта по данным инженерно-геологических работ	$V_p$ , м/с	$V_s$ , м/с
Осташковский горизонт, гляциолимнический времени отступления ледника, супесь, суглинки серые, твёрдые, с гравием и галькой (20-35%), единичные валуны	1500	100 – 250
Ленинградский горизонт, суглинки серые, тугопластичные, тяжёлые, с гравием и галькой (15-20%)	1600	300
Прослой песка газонасыщенного	1500	250
Микулинский горизонт, мгинская свита глины с высоким содержанием органики	1600	350
Московский горизонт, флювиогляциальные отложения, пески, суглинки, ленточные глины глины с включениями гравия и щебня	2000	400

В песках и в слабосцементированных песчаниках, когда порода обладает высокой пористостью, скорости распространения упругих волн во флюидах, заполняющих поровое пространство, будут ниже, чем скорости перекрывающих глинистых пород. Скопления валунно-галечного материала, наоборот, будут иметь более высокие скорости распространения упругих волн по сравнению с песчано-глинистыми породами.

Следует отметить, что моделирование скоростей распространения продольных волн не целесообразно из-за слабого контраста скоростей в песчано-глинистом разрезе и высокого уровня грунтовых вод (Глава 2).

### **3.4 Комплексная физико-геологическая модель песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа для Юго-Запада Ленинградской области**

Оценить применимость комплекса геофизических методов для выявления скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР возможно с помощью моделирования. Выполнить натурное моделирование затруднительно в связи с масштабами и сложностью изучаемого геологического объекта. Можно выполнить численное моделирование сейсмических и геоэлектрических параметров разреза. Для этого необходимо уточнить петрофизические характеристики объекта исследования, включающие совокупность имеющихся об объекте сведений, позволяющих решать поставленную геологическую задачу, и на ее основе сформировать базовую физико-геологическую модель (ФГМ), в обобщенном виде аппроксимирующую размеры, форму и контрастность физических свойств реального геологического объекта, который необходимо обнаружить.

Для численного моделирования ФГМ наиболее удобна, так как позволяет формализовать представление о группе объектов, сложных по вещественному составу и морфологии, заменив их геометрически упрощенными объектами с неизменными физическими свойствами, упростить алгоритмы расчета моделируемых геофизических полей и выделить те геофизические параметры, которые позволяют наиболее точно идентифицировать искомый объект. При этом ФГМ должна отражать изученность геофизических и геологических параметров цели, соответствовать задачам исследований, учитывать район исследований и условия проведения работ и при этом не быть избыточно сложной для существующих программ компьютерного моделирования геофизических полей.

Комплексная ФГМ, приведенная в данной работе, сформирована по результатам анализа выполненных ранее инженерно-геологических и экспериментальных геофизических работ методами сейсморазведки и электроразведки с учетом инженерно-геологических условий участка исследования, расположенного на Юго-Западе Ленинградской области.

Моделируемый разрез, построенный по обобщенным данным инженерно-геологических изысканий, представляет собой чередование слоев суглинков и глин с включениями линз газонасыщенных песков и локальных неоднородностей в виде скоплений валунно-галечного материала (Рисунок 3.3).

Основанная на данных электро- и сейсмотомографии, комплексная ФГМ должна обеспечивать детальное изучение неоднородностей песчано-глинистого разреза ВЧР с наличием приповерхностных скоплений газа, что позволяет на стадии выполнения проектно-изыскательских работ выявить участки газонасыщения в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

ФГМ включает также численное моделирование геофизических полей, необходимое для выбора оптимальной методики производства геофизических исследований и оценки возможностей применимости данных методов для решения задачи по выявлению газонасыщенных локальных неоднородностей [53].

С учетом неоднородного строения песчано-глинистого разреза, для расчета параметров геофизических полей параметризованы простые модели, отражающие потенциально возможные различные варианты строения геологического разреза, при исследовании участков с наличием приповерхностных неоднородностей, в том числе, связанных с газонасыщенными линзами. Исходными данными являются априорная информация и результаты полевых электрометрических и сейсмометрических наблюдений [86].

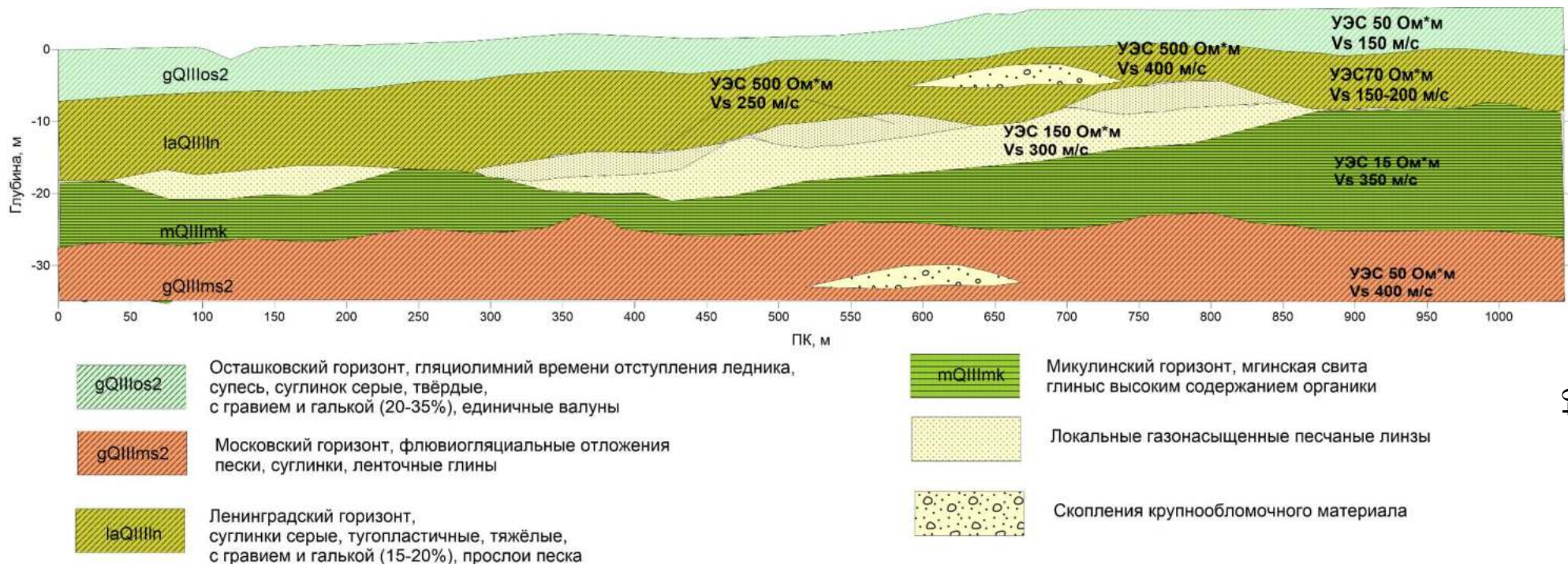


Рисунок 3.3 – Физико-геологическая модель разреза с включениями песчаных газонасыщенных линз, типичная для участка исследований, расположенного на Юго-Западе Ленинградской области

Для расчета геофизических полей рассматриваются следующие включения локальных неоднородностей в песчано-глинистом разрезе (Рисунок 3.4):

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

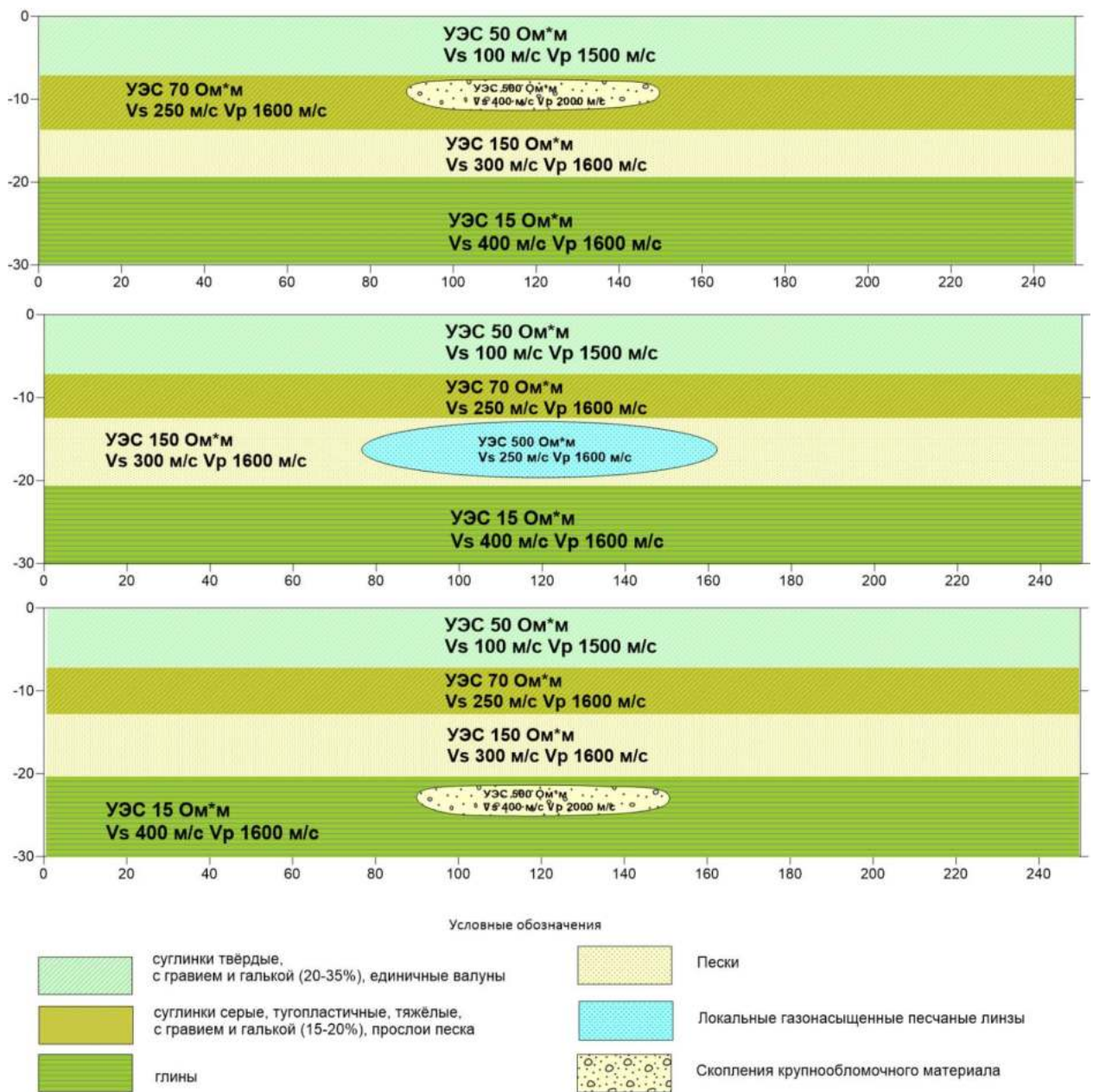


Рисунок 3.4 – Комплексные геолого-геофизические модели песчано- глинистого разреза

На основе заданных значений УЭС и скоростей поперечных волн для каждой из моделей были синтезированы геофизические поля.

Целью математического моделирования является получение восстановленных моделей по данным методов сейсморазведки и электроразведки, с последующим их сопоставлением с первоначальными данными и оценкой возможностей применения данных методов для решения задачи по выявлению газонасыщенных локальных неоднородностей и повышения достоверности и надежности интерпретации данных.

По результатам сравнения исходных моделей и данных, полученных в результате инверсии, можно сделать заключение о возможности выделения аномалеобразующих объектов. Исходя из результатов моделирования, возможна оценка разрешающей способности каждого из методов по выявлению целевых горизонтов и разработке оптимальной методики проведения полевых сейсморазведочных и электроразведочных работ. Комплексирование различных геофизических методов позволяет интерпретировать объекты, обладающие эквивалентными свойствами.

### **3.5 Моделирование электротомографических разрезов, содержащих локальные скопления газа в условиях Юго-Запада Ленинградской области**

Для оценки возможности применения электрической томографии по локализации газонасыщенных линз в песчано-глинистом разрезе выполнено компьютерное моделирование в программе Res2Dmod по методике 2D-электротомографии с использованием трехэлектродной комбинированной установки с разносами АО от 7.5 м до 122.5 м, имеющую хорошее горизонтальное покрытие и обеспечивающую достаточную глубинность исследований. Поскольку трехэлектродная установка является несимметричной, то в процессе решения прямой задачи рассчитывались измерения «прямой» (AMN) и «обратной» (MNB) трехэлектродной установки.

Параметры системы наблюдений задавались в соответствии с возможностями аппаратуры, используемой в процессе полевых наблюдений для корректного сопоставления результатов численного моделирования и данных натурных экспериментов. Длина профиля составляет – 235 м, с шагом расстановки электродов 5 м.

В программном продукте Res2Dmod (Geotomo Software) для решения прямой задачи электроразведки используются методы конечных разностей (finite difference) и конечных элементов (finite element).

Основой метода конечных элементов является построение дискретной модели в виде прямоугольных ячеек с узлами в углах. Причем для каждой ячейки присваивается значение сопротивлений, а в каждом узле определяется потенциал, который описывается в виде системы уравнений для параметров функций в пределах выбранных элементов. Получаемые системы уравнений имеют большую размерность, причем матрицы коэффициентов системы сильно разрежены, а сами коэффициенты связаны с локальным распределением электропроводности и геометрией сетки [106-108].

Результаты моделирования геоэлектрических разрезов представлены на рисунках 3.5 - 3.7. В верхней части рисунка приведен результат решения прямой задачи – разрез кажущегося сопротивления (КУЭС), а внизу результат решения обратной задачи (инверсии).

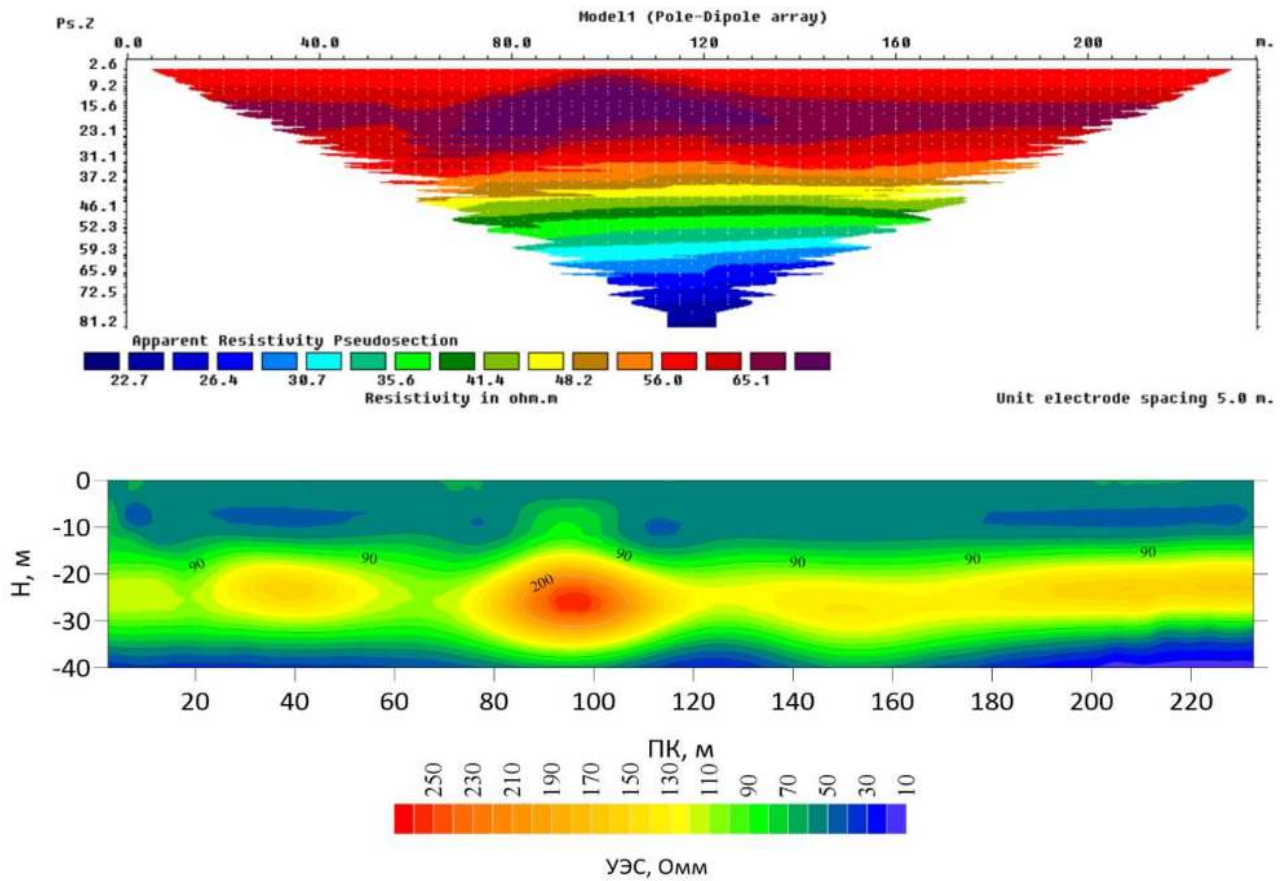


Рисунок 3.5 – Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии для модели песчано-глинистого разреза скопление валунно-галечного материала

Анализ полученных результатов моделирования на качественном уровне показывает возможность выделения высокоомных аномалий, связанных с интервалами газонасыщенных песчаных линз или крупнообломочного материала [53]. И газонасыщенная линза, и скопление крупнообломочного материала хорошо выделяются в результате инверсии благодаря значительному, почти на порядок, контрасту значений УЭС между целевым объектом и вмещающими песчано-глинистыми грунтами (рисунки 3.5 и 3.6). Очевидно, что с увеличением глубины до объекта и, соответственно, снижением разрешающей способности используемой электроразведочной установки, аномальная зона проявляется менее ярко (рисунок 3.7), тем не менее, даже при размещении аномалии в толще подстилающих моренных отложений, в результате инверсии, искомый объект обнаруживается.

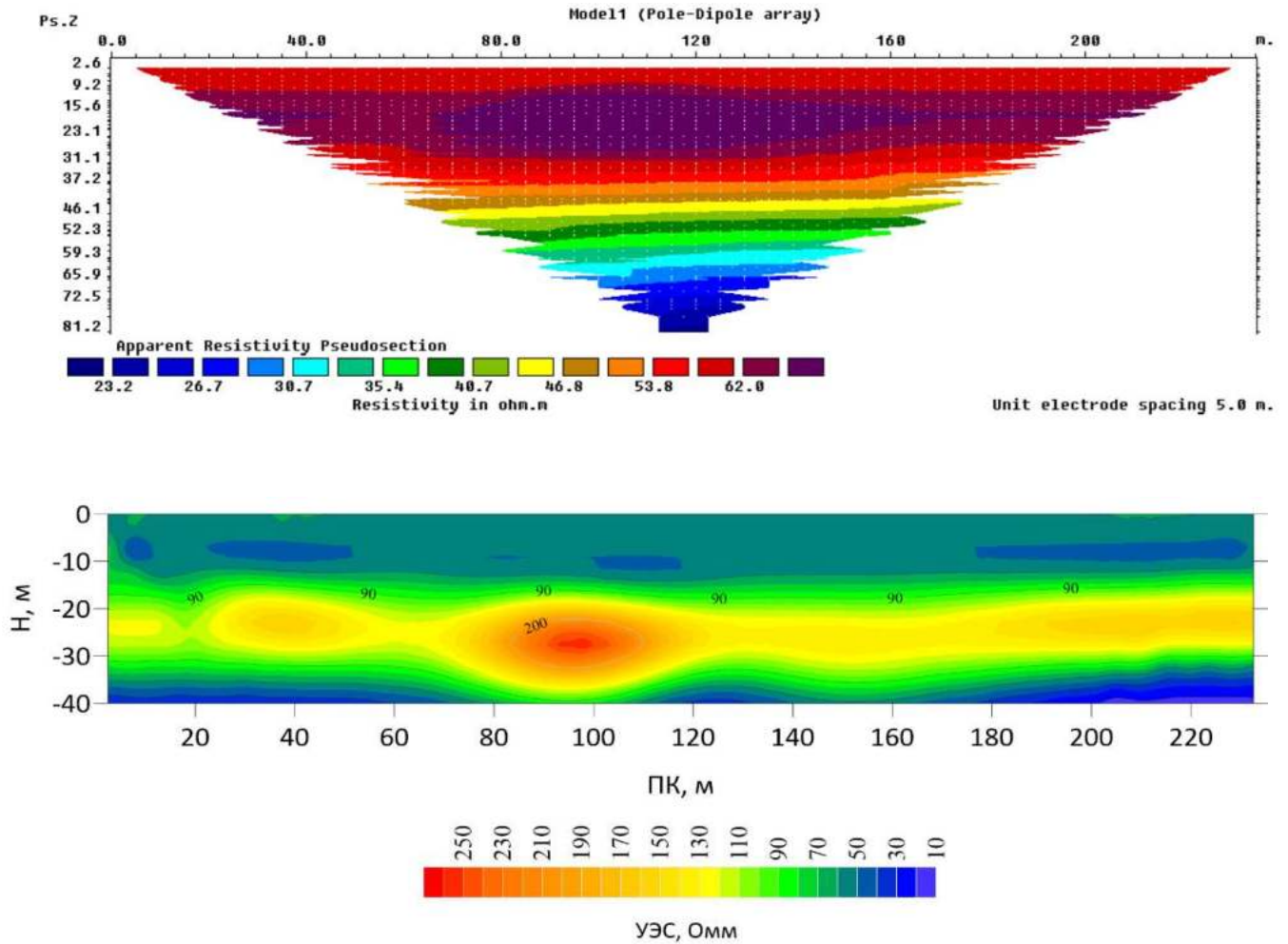


Рисунок 3.6 – Разрез кажущегося удельного сопротивления и геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии для модели песчано-глинистого разреза с включением локальной неоднородности (газонасыщенная песчаная линза)

Определить геометрические характеристики объекта или отличить по значениям УЭС линзу газонасыщенных песков от скопления валунно-галечникового материала по результатам электрофотографии не представляется возможным, так как без знания геологии или привлечения других геофизических методов, нельзя однозначно определить, какими геологическими объектами вызвано аномальное повышение удельного электрического сопротивления [53].

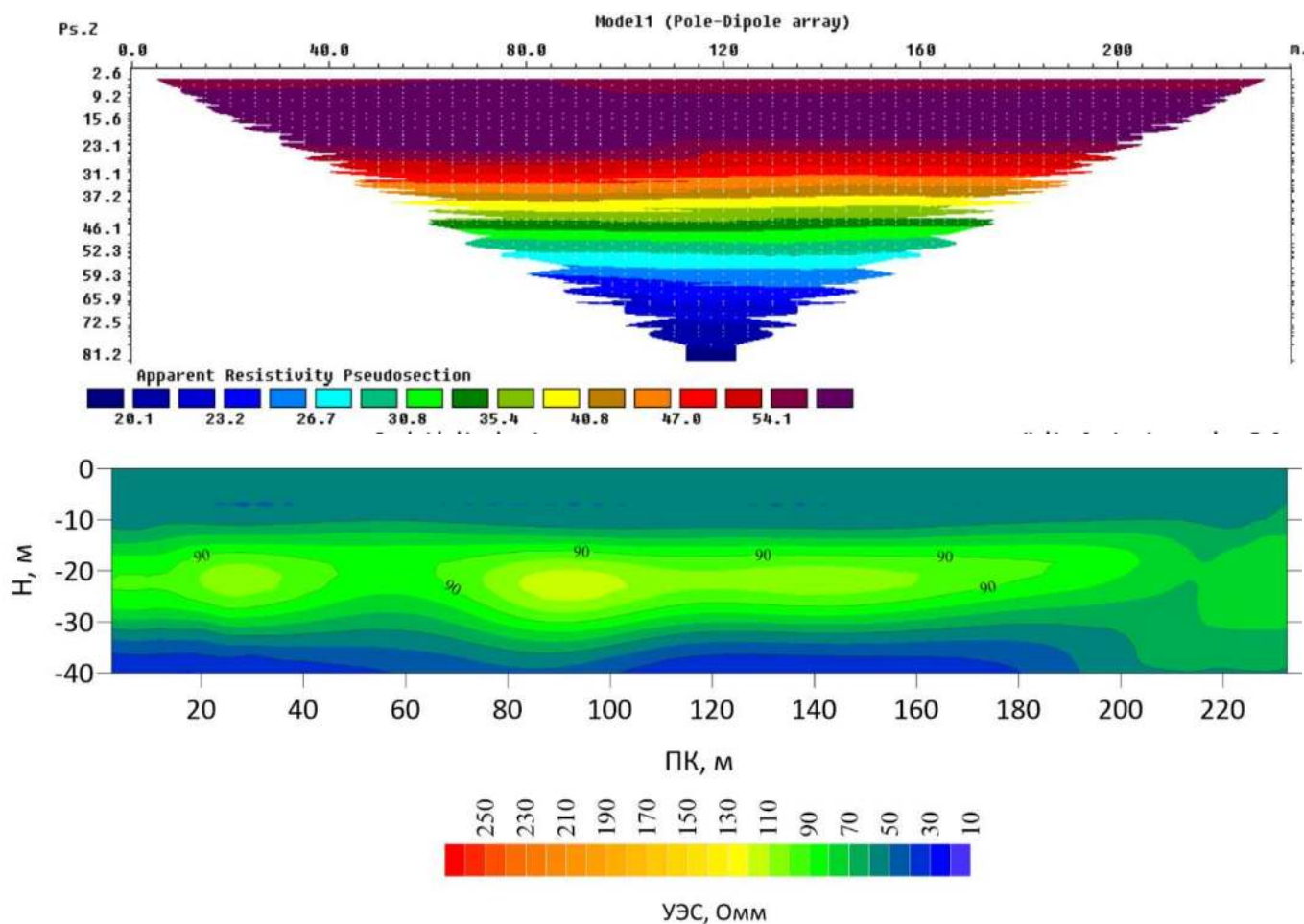


Рисунок 3.7 – Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии для модели песчано-глинистого разреза скопление валунно-галечного материала

Результаты инверсии геоэлектрических моделей позволяют сделать ряд выводов:

- невозможно с достаточной точностью воспроизвести начальное сопротивление модели;
- невозможно восстановить контур зоны повышенных сопротивлений относительно вмещающих грунтов первоначальной модели, наибольшее значение УЭС составляет порядка 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.

### **3.6 Моделирование скоростных сейсмотомографических разрезов с наличием локальных скоплений газа в условиях Юго-Запада Ленинградской области**

Для решения задач построения синтетических сейсмотомографических разрезов песчано-глинистых разрезов с наличием приповерхностных скоплений газа применялся пакет программ пакет ZondST2D. При решении прямой задачи трассировки лучей используется специальный алгоритм теории графов. Этот метод позволяет рассчитать кратчайший путь, по которому проходит рефрагированная волна [70].

Результатом решения прямой задачи является лучевая картина и времена пробега сейсмических волн, представленные как годографы ОПВ. В проектах обращения первостепенную важность имеет анализ лучевой картины. Плотность лучевого покрытия – функция ячейки решетки, значение которой равно числу лучей, пересекающих ячейку решетки. Лучевое покрытие определяет надежность томографического обращения: чем больше значение плотности в ячейке, тем больше можно доверять уточненному значению скорости в этой ячейке.

Для представленной модели песчано-глинистого разреза задачей сейсмической томографии является выделение локальных неоднородностей, связанных с газонасыщенными линзами песка и скоплениями гравийно-галечного и валунного материала. Моделирование сейсмотомографических разрезов выполнялось только для скоростей поперечных волн  $V_s$ .

Параметры системы наблюдения выбраны в соответствии с характеристиками аппаратуры, используемой для проведения полевых исследований и априорной информацией об исследуемом объекте (размерах и глубине залегания): длина профиля – 235 м, с шагом расстановки: пункты приема (ПП) – 5 м, пункты возбуждения (ПВ) – 5 м [53].

Значения скоростей поперечных волн для моделей взяты согласно [63] и на основании результатов сейсморазведочных работ методом КМПВ. При построении моделей учитывались результаты инженерно-геологических работ, согласно которым:

- уровень УГВ 1.0 – 1.2 м, т.е. все слои находятся в состоянии полного водонасыщения;
- скопления крупнообломочного материала представлены валунно-галечниковыми отложениями с песчанистым 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 м находится в состоянии полного водонасыщения;
- подстилающие газогенерирующие грунты представлены глинами и суглинками с включениями гравия, щебня, песка до 15%.

На рисунке 3.8 представлены результаты моделирования песчано-глинистого разреза с включением газонасыщенной песчаной линзы, с понижением скорости до 250 м/с на фоне вмещающих пород со скоростью 300 м/с. На первом этапе был выполнен расчет времен первых вступлений поперечных волн, на втором этапе инверсия полученных годографов, с итерационным уточнением скоростной модели среды. Для оценки плотности лучевого покрытия на рисунке 3.9 показан результат инверсии времен первых вступлений с нанесенными траекториями лучей поперечных волн.

В результате решения прямой задачи были получены времена пробега сейсмических волн, представленные как годографы общего пункта возбуждения. Для модели с низкоскоростным включением, имитирующим газонасыщенную песчаную линзу, на годографах наблюдаются локальные увеличения времени прихода рефрагированных волн в первых вступлениях [53].

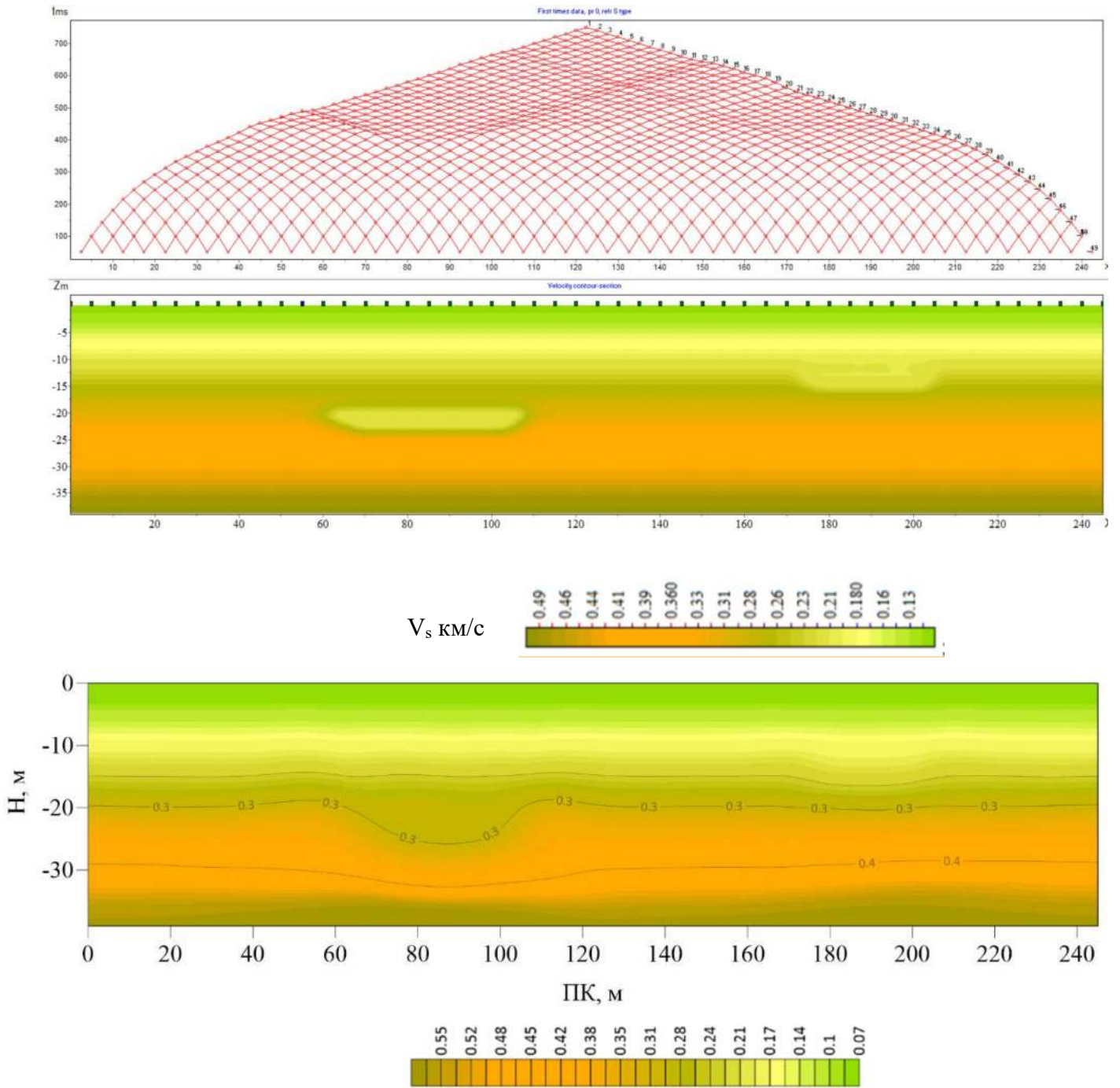


Рисунок 3.8 – Результат расчета скоростей поперечных волн для модели песчано-глинистого разреза с плавным нарастанием скорости по глубине с включением неоднородности, имитирующей песчаную газонасыщенную линзу. Сверху представлена исходная модель и годографы времен первых вступлений поперечных волн, нижний разрез – результат инверсии

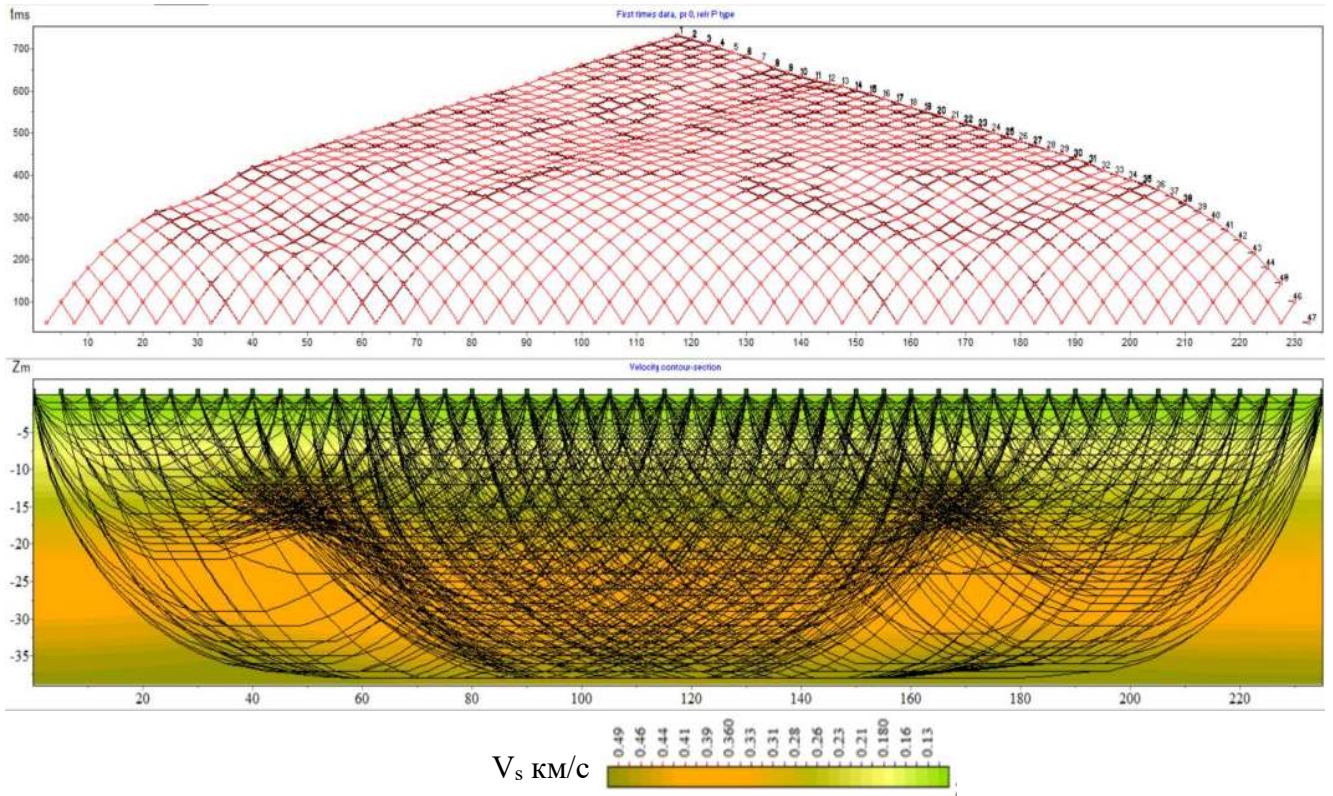


Рисунок 3.9 – Годографы первых вступлений поперечных волн и лучевое покрытие для модели песчано-глинистого разреза с плавным нарастанием скорости по глубине и с включением неоднородности, имитирующей песчаную газонасыщенную линзу

Аналогичный расчет поля скоростей поперечных волн был выполнен для модели песчано-глинистого разреза с плавным нарастанием скорости по глубине с включением высокоскоростной неоднородности, имитирующей скопление валунно-галечного материала. Результаты расчета времен первых вступлений для заданной модели и результат их инверсии представлены на рисунке 3.10.

Для оценки плотности лучевого покрытия на рисунке 3.11 показан результат инверсии времен первых вступлений с нанесенными траекториями лучей поперечных волн.

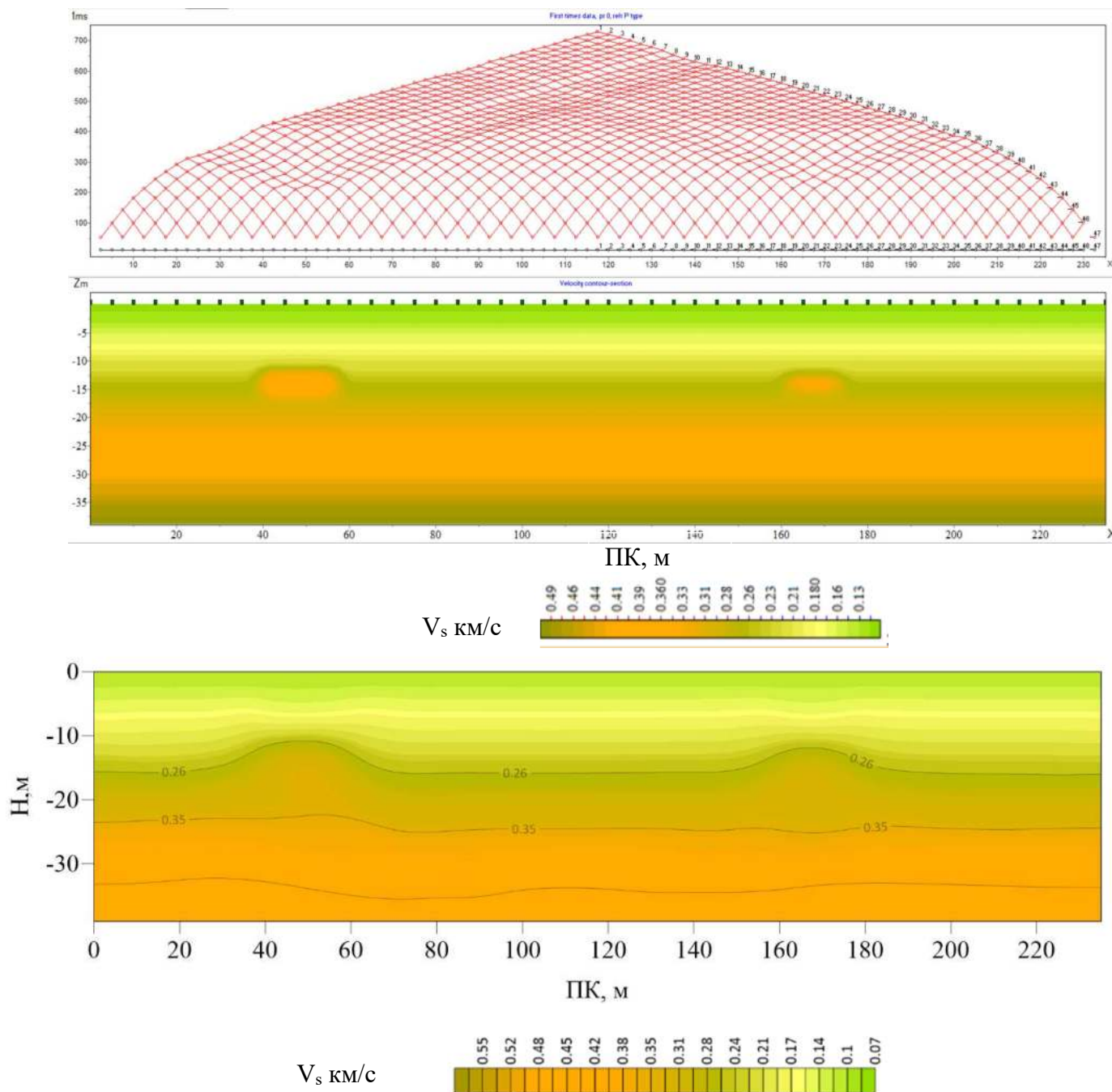


Рисунок 3.10 – Результат расчета скоростей поперечных волн для модели песчано-глинистого разреза с плавным нарастанием скорости по глубине с включением высокоскоростной неоднородности, имитирующей скопление валунно-галечного материала. Сверху представлена исходная модель и годографы времен первых вступлений поперечных волн, нижний разрез – результат инверсии

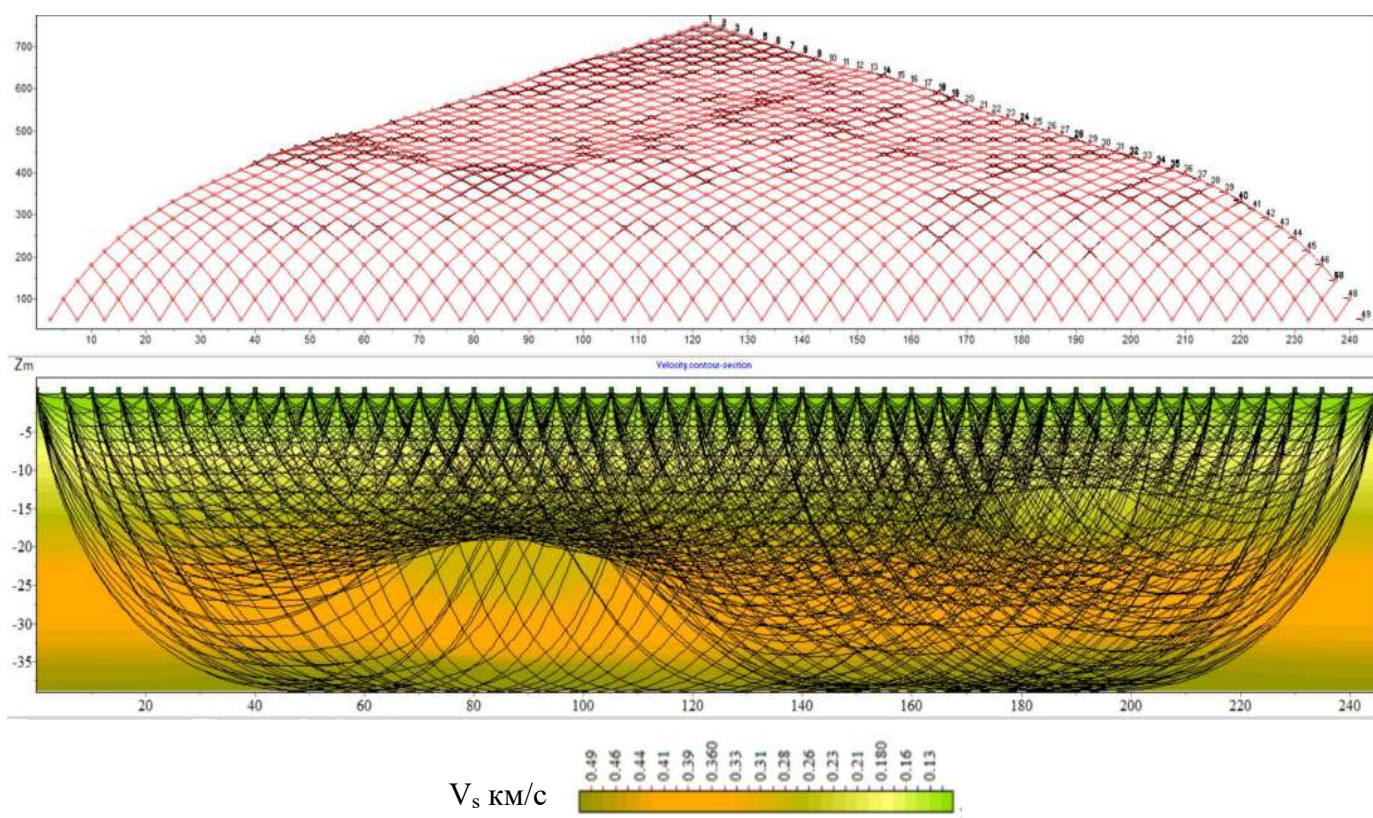


Рисунок 3.11 – Годографы первых вступлений поперечных волн и лучевое покрытие для модели песчано-глинистого разреза с плавным нарастанием скорости по глубине с включением неоднородности, имитирующей скопление валунно-галечного материала

По результатам моделирования поля скоростей поперечных волн можно сделать вывод, что на скоростных разрезах локальные аномалии исследуемого песчано-глинистого разреза будут выделяться с достаточно хорошей точностью, областями пониженных значений скоростей поперечных волн, которые в начальной модели задавалась как включение газонасыщенных песков, что позволит более надежно интерпретировать аномалии повышенных значений УЭС и приурочить их к интервалам локальных скоплений газа.

### 3.7 Выводы по главе 3

1. По данным электротомографии возможно решить следующие задачи: выделить приповерхностную часть разреза, связанную с рыхлыми песчано-глинистыми отложениями, песчаные линзы, связанные со скоплениями газа, подстилающие глинистые отложения, богатые органическим веществом, которые являются источником биогенных газов.
2. Из-за наличия в разрезе скоплений валунно-галечного материала возникает неоднозначность интерпретации областей повышенных значений УЭС 500 Ом·м. Для повышения однозначности интерпретации необходим анализ скоростей поперечных волн локальных неоднородностей разреза. Анализ скоростей поперечных волн позволяет выделить локальные аномалии, связанные со скоплениями валунно-галечного материала.
3. Результаты математического моделирования, выполненного на базе разработанной физико-геологической модели, обосновывают первое защищаемое положение о эффективности применения комплекса электротомографии и сейсмотомографии для локализации зон скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

## ГЛАВА 4 КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕЙСМО- И ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛИНЗ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Внедрение современных комплексных геофизических технологий в состав инженерно-геологических изысканий на объектах повышенного геологического риска, обусловленного наличием в песчано-глинистых грунтах ВЧР локальных скоплений газа позволит повысить эффективность буровых работ за счет целенаправленного их применения в потенциально опасных зонах и обеспечить безопасность изыскательских работ путем планирования на этих участках особых мер предосторожности, таких как: использование дополнительных средств индивидуальной защиты персоналом, регулярный контроль воздуха с помощью газоанализаторов и т.п. На сегодняшний момент в мировой практике не существует прямых геофизических методов, позволяющих однозначно выявить участки газонасыщения в толще песчано-глинистых грунтов, но можно предложить методику комплексных геофизических исследований, позволяющую локализовать участки возможного распространения газонасыщенных песков.

Моделирование и экспериментальные исследования, приведенные в главе 3, обосновывают состав комплексной геофизической методики для решения задачи по поиску зон газонасыщения в песчано-глинистых грунтах ВЧР, базирующейся на наиболее часто применяемых методах в ходе инженерно-геологических исследований – электроразведки и сейсморазведки. Результаты исследований, приведенных в Главе 3, позволяют оценить возможности использования и ограничения для внедряемых геофизических методов применительно к инженерно-геологическим условиям Юго-Запада Ленинградской области. Геологический разрез для данной территории преимущественно представлен дисперсными грунтами [52]:

- суглинками с включениями песка, гравия и щебня, непроницаемыми для газа;
- газонасыщенными песками;
- водонасыщенными песками;

– подстилающими газогенерирующими/газопроницаемыми глинами и суглинками с включениями различных неоднородностей – песка, гравия, щебня.

Целевое назначение электроразведочных работ при решении поставленной задачи заключается в дифференциации дисперсных грунтов по удельному электрическому сопротивлению и выделении линз или прослоев песков с аномально высокими значениями УЭС, по сравнению с УЭС водонасыщенных песков. Безусловным преимуществом электроразведочных работ является возможность оперативно изучить значительную площадь территории и выделить в пределах ее зоны повышенные значения УЭС в плане и разрезе.

Результаты геоэлектрического моделирования показали, что при решении обратной задачи электроразведки возникает неоднозначность разделения высокоомных аномалий, которые могут быть связаны как с газонасыщенными песками, так и с включениями неоднородностей (гнезда песка, гравия, щебня) в толще суглинков и глин со скоплениями крупнообломочного материала. Поэтому, для уточнения природы высокоомных аномалий и определения приуроченности их к скоплениям крупнообломочного материала, включенных в толщу глин и суглинков, или к линзам газонасыщенных песков, необходимо дополнить площадные электроразведочные исследования сейсморазведкой методом МПВ в модификации сейсмотомографии.

Анализ скоростей упругих волн для района Юго-Запада Ленинградской области, проведенный на этапе физико-геологического моделирования, показывает, что при решении обратной задачи сейсморазведки возникают следующие сложности:

- ограниченные возможности применения Р-волн из-за слабого контраста скоростей в песчано-глинистом разрезе и высокого уровня грунтовых вод, в результате чего 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  $V_s$ , а в большей степени зависит от литологического состава отложений;

– низкий контраст скоростей  $V_s$  и неоднородное строение ВЧР также является осложняющим фактором, затрудняющим процесс локализации линз газонасыщенных песков.

Отдельно необходимо отметить и экономическую составляющую, касающуюся в более высокой себестоимости сейсморазведочных работ по сравнению с электроразведкой методом сопротивлений.

С учетом всего вышеизложенного, наиболее оптимально комплексные геофизические исследования в составе инженерно-геологических изысканий при изучении песчано-глинистых грунтов ВЧР с локальными скоплениями газа рекомендуется проводить в два этапа. На первом этапе на участке проведения изысканий выполнить площадные электроразведочные работы методом геоэлектрической томографии с целью выявления в пределах исследуемой площади высокоомных аномалий. Далее на втором этапе на участках, где ранее по результатам электроразведочных работ выявлены зоны высоких значений УЭС проводятся сейсморазведочные работы МПВ (в модификации сейсмотомографии). Сейсморазведка МПВ позволяет по распределению скоростей поперечных волн отнести выявленную высокоомную аномалию к скоплению крупнообломочного материала (включений в глинистой толще) или к линзам газонасыщенных песков.

Если в области повышения УЭС скорость поперечной волны возрастает, эта аномалия связана, с высокой степенью вероятности, с наличием включений валунов, гравия и щебня, так как включение в толщу глинистых пород плотных включений повышает скорость распространения упругих волн. В случае локального понижения  $V_s$ , можно сделать предположение, что данная аномалия УЭС будет 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 оказывает слабое влияние. Однако, результаты моделирования (Глава 3), позволяют сделать вывод, что при малых размерах газонасыщенных песчаных линз они не всегда будут контрастно выделяться на фоне вмещающих пород.

#### **4.1 Электроразведка методом сопротивлений в модификации геоэлектрической томографии (ГЭТ)**

Электроразведочные работы методом сопротивлений в модификации геоэлектрической томографии (ГЭТ) основаны на сочетании методов электропрофилирования (ЭП) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [8]. Особенность методики измерений методом ГЭТ состоит в многократных измерениях сигнала в приемных линиях при различных положениях питающей линии. Получение большого объема данных, характеризующих распределение УЭС в разрезе, позволяет изучать сложные двумерные среды, что значительно повышает возможности электроразведки для решения инженерно-геологических задач. Электротомография начала развиваться в конце XX века, когда появились аппаратные комплексы, позволяющие осуществлять быструю коммутацию большого количества (от десятков до сотен) электродов в приемных и питающих линиях. Вторым необходимым условием развития и широкого внедрения в практику методики ГЭТ стал прогресс вычислительной техники, разработка и программная реализация математических алгоритмов, позволяющих выполнять двумерную, а затем и трехмерную инверсии больших объемов данных. Метод ГЭТ оперирует огромным количеством измерений – от сотен и тысяч при двумерной до сотен тысяч при трехмерной электротомографии. В настоящее время метод геоэлектрической томографии широко применяется в инженерной геофизике по всему миру. Разрабатывается и выпускается значительное количество аппаратуры для ГЭТ, в том числе и российского производства, созданы различные программные пакеты для 2-D и 3-D инверсии данных геоэлектротомографии.

Применительно к выявлению областей газонасыщения в разрезе и плане электротомография позволяет решить две задачи:

- позволяет выделить в разрезе слои с разным удельным электрическим сопротивлением;
- выделить в разрезе локальные неоднородности с повышенными значениями УЭС, которые могут быть связаны как с включениями обломочного материала в

толще песчано-глинистых отложений, так и с присутствием в разрезе областей газонасыщения – целевых объектов исследования.

*Методика выполнения полевых электроразведочных работ*

При проведении экспериментальных и опытно-методических работ для сбора полевых данных электроразведки использовалась электроразведочная станция «Скала-48» (Рисунок 4.1).

Измерения выполнялись с помощью двухсегментной косы, предназначенной для коммутации 48 электродов, по 24 электрода в каждом сегменте. Шаг расстановки электродов составлял 5 м [50].



Рисунок 4.1 – Выполнение электроразведочных работ с использованием многоканальной электроразведочной станции «Скала-48»

Для обеспечения необходимой глубинности и детальности исследований на всех изучаемых интервалах глубин, в соответствии с методикой электротомографических исследований, каждый цикл электрометрических измерений вдоль профиля выполнялся с перекрытием на половину расстановки электроразведочной косы – длину одного сегмента. То есть, после завершения съемки каждой 48-ми канальной расстановки длиной 235 м перемещение всей расстановки вдоль профиля происходило на 120 м – длину одного сегмента [50].

При работе по такой схеме 25-й электрод предыдущей расстановки становится первым в следующей. Таким образом, с каждой дополнительной расстановкой захватывался новый сегмент изучаемого разреза протяженностью 120 м. Соответственно, для изучения разреза вдоль линии длиной  $X$ , была выполнена съемка  $1,5X$  профилей электротомографии (Рисунок 4.2) [8].

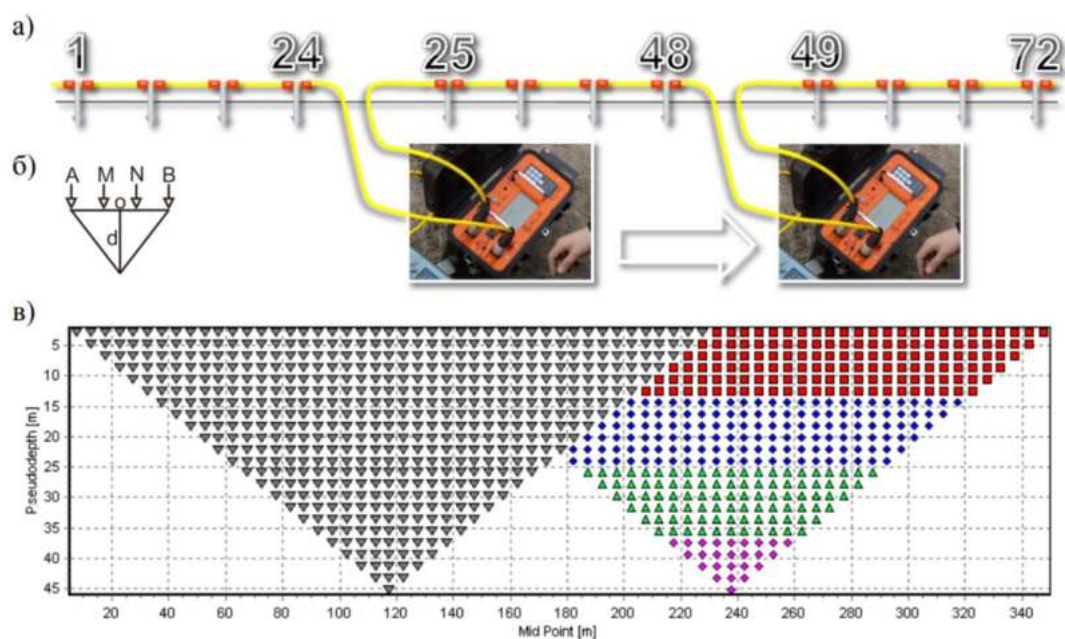


Рисунок 4.2 – (а) Схема расположения двух сегментов 24х-электродных кос с последующим переносом первого сегмента для непрерывного продолжения профиля. Вид протокола измерений (б) для электротомографии.

Установка Шлюмберже: 48 электродов, расположенных с постоянным шагом 5 м. Каждому маркеру на диаграмме соответствует одно положение четверки электродов ABMN (в) [7]

Выбор оптимальной методики электроразведочных работ и типа измерительных электроразведочных установок осуществляется в процессе исследований в соответствии с геологическими и геоэлектрическими условиями конкретного участка работ.

Предварительная камеральная обработка результатов электроразведочных измерений в виде визуализации данных в разрезе кажущегося удельного электрического сопротивления (КУЭС) выполняется в полевых условиях для оперативной оценки качества первичных данных (Рисунок 4.3).

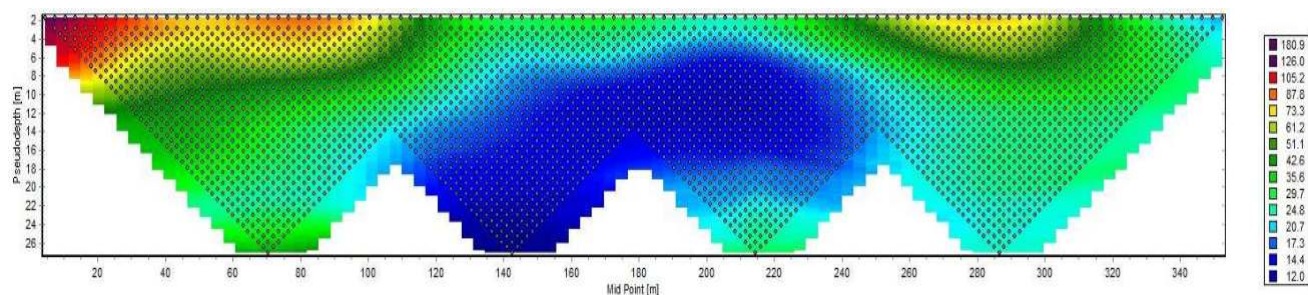


Рисунок 4.3 – Пример разреза КУЭС, получаемого в полевых условиях

При площадных наблюдениях на участках изысканий песчано-глинистых грунтов ВЧР с локальными скоплениями газа электроразведочные наблюдения целесообразно проводить по системе параллельных профилей. При неблагоприятных условиях для гальванических заземлений следует применять группирование удлиненных электродов и подлив минерализованной воды, что позволит компенсировать влияние плохих поверхностных условий заземления и обеспечить величину силы тока в цепи АВ, необходимую для устойчивых измерений величины  $\Delta U$ .

#### *Обработка и интерпретация результатов ГЭТ*

Визуализация и инверсия данных геоэлектрической томографии проведение экспериментальных и опытно-методических работ выполнялись с помощью специализированных компьютерных программ IPI2win и Res2Dinv. Совместное применение этих программ обеспечивает проведение необходимых процедур препроцессинга и инверсии данных метода геоэлектрической томографии.

Процедура инверсии заключается в подборе двумерной 2D модели сопротивления среды для данных электротомографии, измеренных в полевых условиях. Двумерная 2D модель, используемая программой инверсии, представляет собой разбиение разреза на массив прямоугольных блоков. Первоначальное расположение и размеры блоков задаются программой автоматически, исходя из параметров электроразведочной установки. В дальнейшем распределение и размер блоков определяются параметрами дискретизации модели и подбираются обработчиком опытным путем в процессе

обработки и интерпретации данных электротомографии и сопоставления результатов инверсии с имеющимися геологическими материалами [15].

Процедура подбора двумерной модели сопротивления среды выполняется программой автоматически с учетом параметров дискретизации модели и различных параметров инверсии, задаваемых интерпретатором. Подбор осуществляется до тех пор, пока не будут достигнуты минимальные значения невязки между расчетным разрезом и данными, полученными в поле. Процесс подбора 2D модели сопротивления среды выполняется с учетом топографических данных по профилю ЭТ, что необходимо для учета влияния рельефа при расчете параметров геоэлектрического разреза.

Построенные в результате инверсии данных площадной геоэлектрической томографии 2D модели геоэлектрических разрезов, характеризующие распределение УЭС по профилям геофизической съемки, визуализируются с помощью программы Surfer. Данный подход позволяет (при регулярном расположении профилей) выполнить построение карт, отражающих распределение кажущегося удельного электрического сопротивления на разных глубинах, что позволяет осуществлять площадную локализацию высокоомных аномалий для последующего обоснования и заложения мест проведения сейсморазведочных работ.

#### **4.2 Сейсморазведочные исследования**

Сейсморазведка в составе комплексных геофизических работ при исследованиях песчано-глинистых грунтов ВЧР с локальными скоплениями газа позволяют решать следующие задачи:

- уточнение строения инженерно-геологического разреза по изменениям скоростей распространения сейсмических волн в исследуемом разрезе;
- определение глубины залегания коренных грунтов;
- расчленение разреза на отдельные литологические однородные слои;
- оценка динамических параметров горных пород в естественных условиях.

*Методика проведения полевых сейсморазведочных исследований*

Экспериментальные и опытно-методические наземные сейсмические исследования выполнены на аппаратурной базе сейсмостанции Эллис-3. При проведении работ возбуждались и регистрировались поперечные S- и продольные P-волны. Регистрация поперечных S-волн выполнялась по схеме Y-Y, а регистрация продольных волн – по схеме Z-Z. Возбуждение сейсмического сигнала обеспечивалось ударом кувалды или лома по металлической подставке. При возбуждении P-волн использовалась плоская металлическая подставка, а при возбуждении S-волн – специальная металлическая конструкция, позволяющая направить энергию удара кувалды под углом 45 градусов к поверхности (Рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Металлические подставки для возбуждения продольных и поперечных волн

На каждом ПВ для возбуждения поперечных (S-волн) выполнялась регистрация по схеме «-» Y-Y и «+» Y-Y, то есть выполнялись два противоположно направленных ПВ, после суммирования которых рассчитывалась поперечная волна (Рисунок 4.5).

Для улучшения отношения «полезный сигнал»/«помеха» на каждом пункте возбуждения (ПВ) осуществлялись от 3 до 10 повторных ударов (накоплений сигнала). Впоследствии данные, полученные на каждой точке физических наблюдений, суммировались в процессе камеральной обработки, что обеспечивало увеличение отношения «полезный сигнал»/«помеха» от 2 до 5 раз соответственно.

Максимальная длина 48-ми канальной установки при размещении пунктов приема (ПП) через 5 м и 6 выносах ПВ (по три с каждой стороны косы) с шагом 10 м, 20 м и 30 м составила 265 м. Это позволило обеспечить уверенную регистрацию волн, преломлённых на глубоких границах. Пункты возбуждения (ПВ) располагались вдоль косы с шагом 10 м.

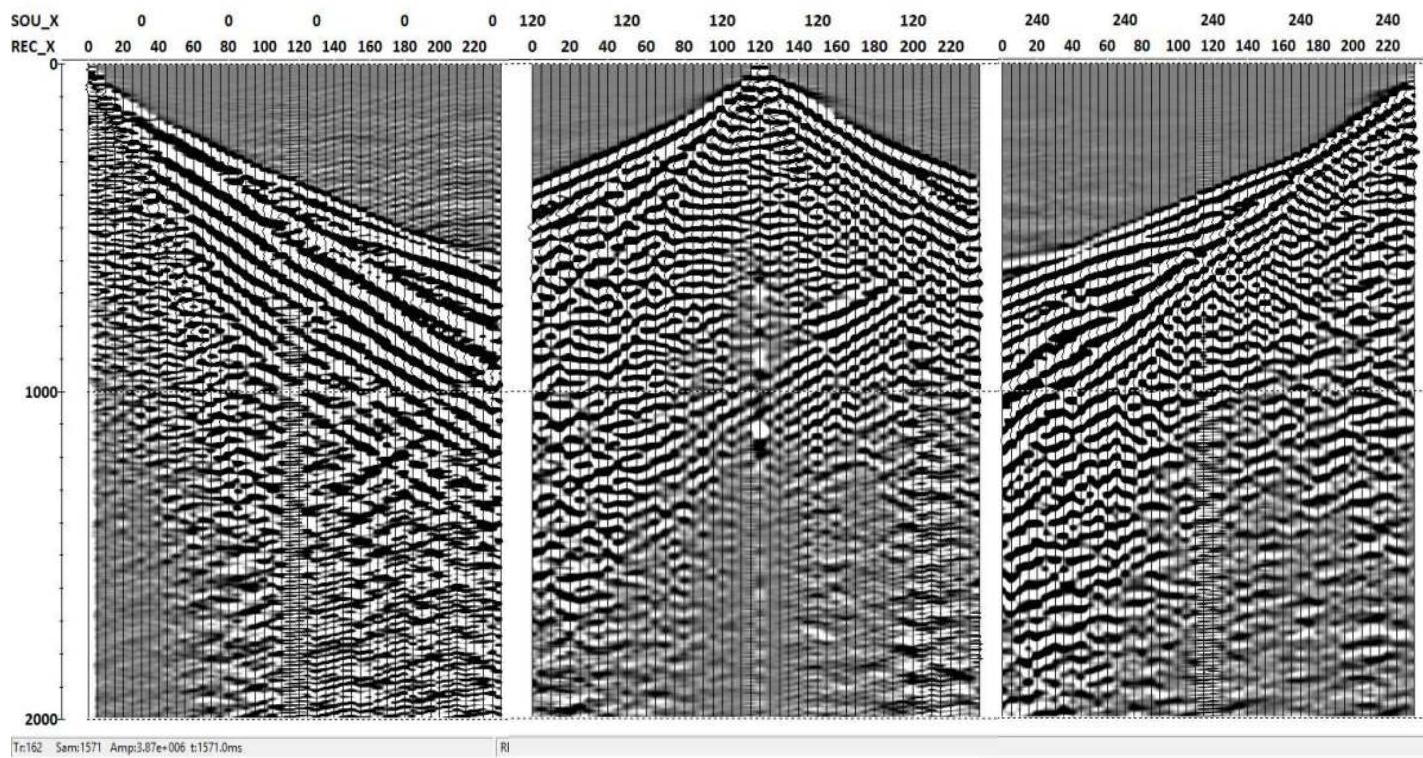


Рисунок 4.5 – Пример сейсмограммы ОПВ. Y-Y расстановка, S-волны

Для контроля качества полевого материала использовался программный пакет «RadexPro Plus». На данном этапе оценивалось качество полученного материала с точки зрения его дальнейшей обработки. Особое внимание было уделено:

- общему качеству полученного сейсмического материала;
- анализу качества сейсмических записей во взаимных точках;
- оценке возможности непрерывного прослеживания целевых волн и, при необходимости, оперативной корректировки схемы наблюдений.

Первичная обработка материалов сейсмических исследований производилась непосредственно в полевых условиях.

*Камеральная обработка материалов сейсморазведочных работ*

Исследуемый разрез содержит мало контрастных преломляющих границ, так как представляет собой толщу переслаивания песчано-глинистых пород с различными включениями. В таких условиях обработка данных корреляционным методом преломленных волн (КМПВ) дает мало информации о геологическом строении. На продольных волнах с помощью программного обеспечения RadExPro Plus методом  $t_0$  была выделена и построена граница УГВ, на поперечных волнах проявились отдельные слабоконтрастные границы, связанные с литологическим строением. При этом, в целом, сейсмический разрез характеризуется плавным нарастанием скорости распространения упругих волн с глубиной, то есть разрез благоприятен для распространяющихся в среде с положительным градиентом скорости с глубиной, рефрагированных волн.

Для такого разреза эффективным способом обработки данных сейсморазведки является метод сейсмической томографии (сейсмотомографии).

Непосредственно перед обработкой данных выполняется препроцессинг сейсмических записей, который включает следующие процедуры: ввод геометрии наблюдений, частотная фильтрация, компенсация амплитудных потерь.

Сейсмотомографическая обработка выполнена с помощью пакета программ XТomo и RadExPro Plus в три этапа. На первом этапе проводится обработка сейсмограмм с целью увеличения соотношения сигнал/помеха и ввод геометрии систем наблюдения.

На втором этапе выполняется идентификация и считывание на сейсмограммах ОПВ осей синфазности, соответствующих первым вступлениям (Рисунок 4.6).

На третьем этапе в программном комплексе XТomo выполняется томографическая инверсия годографов первых вступлений с итерационным уточнением скоростной модели среды. Решение обратной задачи заключается в коррекции начальной скоростной модели с целью минимизации невязок между теоретическими и наблюдаемыми временами вступлений.

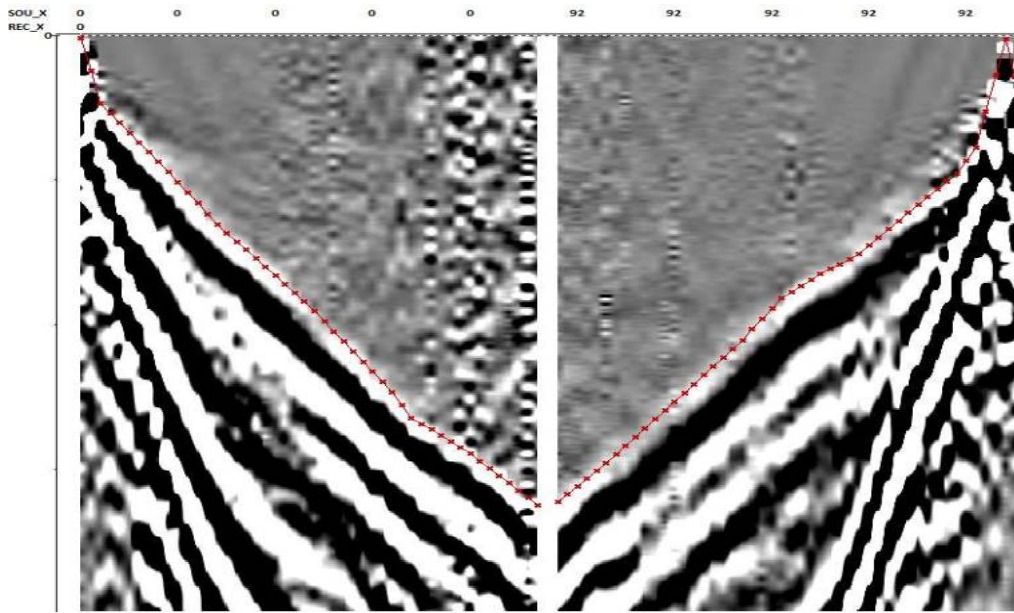


Рисунок 4.6 – Пример считывания времен первых вступлений преломленных волн

Для решения обратной задачи используется метод наименьших квадратов с регуляризацией. Данный способ обращения географов приводит к наиболее надежному результату, но главным его недостатком является то, что параметры решения в смежных ячейках модели рассматриваются как независимые. Это приводит к тому, что модель может быть представлена мелко-масштабным хаотическим чередованием положительных и отрицательных аномальных зон. Расчет модели происходит итеративно по методу сопряженных градиентов. Параметр регуляризации необходим для корректного решения обратной задачи, поскольку она изначально является некорректной, т.е не является однозначно разрешимой и устойчивой к изменению входных данных. Получаемые результаты принципиально зависят от параметра регуляризации, определяющего степень детализации искомой модели [118].

В результате обработки данных сейсморазведки методом сейсмической томографии были получены сейсмотомографические разрезы, характеризующие пространственное распределения скоростей поперечных волн (Рисунок 4.7).

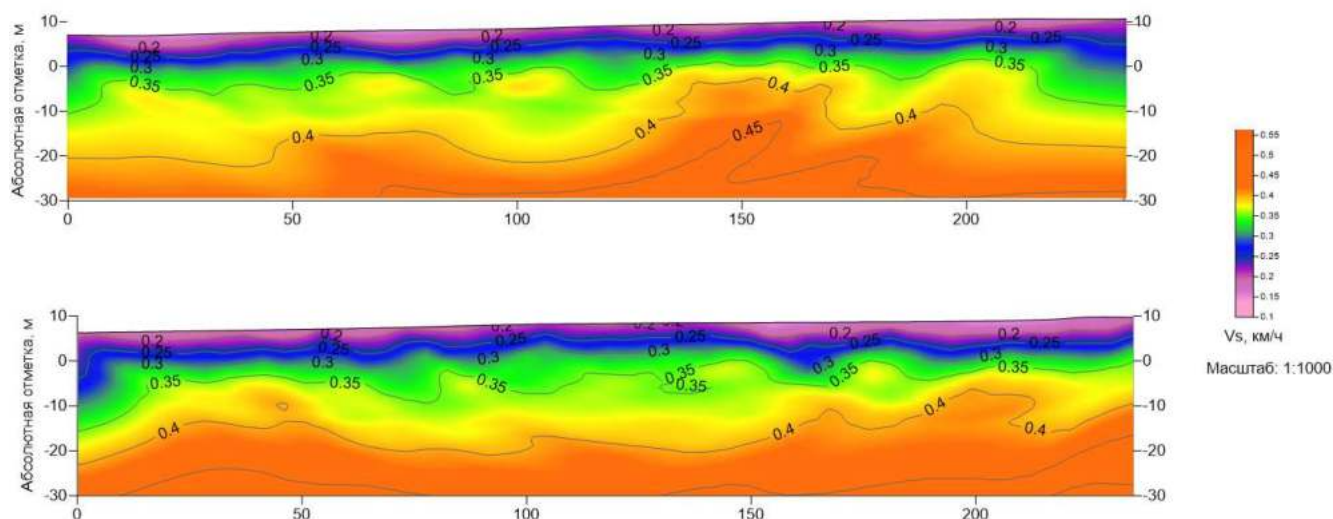


Рисунок 4.7 – Сейсмотомографические разрезы скоростей поперечных волн

По характеру распределения скоростей поперечных волн (от 100 км/с до 500 км/с), можно сделать вывод, что разрез сложен песчано-глинистыми грунтами, что соответствует данным бурения, и осложнен локальными скоростными неоднородностями с локальными понижениями скоростей поперечных волн.

### 4.3 Совместный анализ данных электроразведки и сейсморазведки

Предлагаемый комплекс геофизических методов, включающих электроразведку и сейсморазведку МПВ, позволяет выделить на площади и в разрезе высокоомные аномалии, которые могут быть связаны с газонасыщенными песками и неоднородностями в глинистой толще, и, по изменению или отсутствию изменений скоростей поперечных волн, разделить выделенные аномалии УЭС на те, которые могут быть связаны со скоплениями неоднородностей в глинистой толще и теми, которые можно отнести к газонасыщенным пескам. Однако, выявление газонасыщенных пород на электро- и сейсмотомографических разрезах является непростой задачей в условиях неоднородной верхней части геологического разреза, сложенного дисперсными породами. Различить изменения литологического состава от газопроявлений на геоэлектрических и скоростных томографических разрезах затруднительно, так как прямые диагностические

признаки распознавания отличий отсутствуют. Различные геологические факторы могут формировать неоднородности с практически одинаковыми геофизическими параметрами [52].

С целью повышения эффективности локализации газонасыщенных песчано-глинистых грунтов, наряду с традиционными видами томографических 2D инверсий, опробована технология амплитудной томографии, позволяющая получить оценку пространственного 2D распределения значений декремента поглощения в изучаемом геологическом разрезе. Как показали результаты экспериментальных работ, амплитудная томография позволяет получить разрез декремента поглощения в среде из значений амплитуд первых вступлений на основе предварительно полученного скоростного разреза. Особенностью декремента поглощения является то, что он слабо зависит от частоты.

Экспериментальные данные о поглощении энергии сейсмических колебаний за счет неидеальной упругости горных пород объясняются исходя из предположения, что в однородной по составу и свойствам среде амплитуда синусоидальных колебаний убывает с расстоянием по экспоненциальному закону (3) [1]:

$$A(l) = A_0 * e^{-\alpha_{\text{п}} l}, \quad (3)$$

где  $A_0$  – амплитуда волны в начальный момент времени,

$A(l)$  – амплитуда волны на расстояние  $l$ ,

$\alpha_{\text{п}}$  – коэффициент поглощения в  $\text{м}^{-1}$ ,

$l$  – пройденное волной расстояние в м.

На расстоянии равном длине волны  $\lambda$  уменьшение амплитуды колебаний будет определяться как (4):

$$e^{-\alpha_{\text{п}} \lambda} = e^{\vartheta}, \quad (4)$$

где безразмерная величина  $\vartheta$  – декремент поглощения, определяется выражением (5)

$$\vartheta = \alpha_{\text{п}} * \lambda = \alpha_{\text{п}} \frac{2\pi}{\omega} \nu, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина волны,

$\omega$  – круговая частота колебаний,

$v$  – скорость распространения волны.

Анализ различных источников позволяет сделать вывод, что коэффициент затухания упругих волн в газонасыщенных и водонасыщенных песках, и, следовательно, декремент поглощения, будут значительно выше, чем в более плотных глинах и суглинках с включениями обломочного материала. При этом коэффициент затухания поперечных волн значительно выше, чем продольных [63].

Таким образом, анализ распределения декремента поглощения поперечных волн является еще одним косвенным диагностическим признаком, позволяющим выделить по данным геофизических исследований области скопления газа.

Следовательно, при совместной интерпретации данных электроразведочных и сейсморазведочных работ с оценкой декремента поглощения поперечных волн, возможно:

1. Выделить на исследуемой площади и в разрезе высокоомные аномалии, которые могут быть связаны с газонасыщенными песками и неоднородностями в глинистой толще.
2. Анализ распределения скоростей поперечных волн позволяет разделить выделенные аномалии УЭС на те, которые могут быть связаны со скоплениями неоднородностей в глинистой толще и теми, которые можно отнести к водонасыщенным или газонасыщенным пескам.
3. По результатам амплитудной томографии и распределению декремента поглощения в разрезе, выделить области, которые могут быть связаны со скоплениями газа.

Обобщить изложенные выше диагностические признаки для интерпретации данных геофизических исследований песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа изложены в виде таблицы 4.1, которая объединяет признаки-индикаторы наличия скоплений газа в разрезе по характеру изменения геофизических параметров – удельного электрического сопротивления, скорости поперечных волн, декремента поглощения.

Таблица 4.1 – Критерии для интерпретации данных геофизических исследований песчано-глинистого разреза с наличием локальных неоднородностей

Интервал песчано-глинистого разреза	Удельное электрическое сопротивление	Скорость распространения поперечных волн	$Q_s$ декремент поглощения поперечных волн
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

При комплексировании геофизических методов геоэлектротомографии (ГЭТ) и сейсмотомографии (СТ) с последующей обработкой и интерпретацией данных СТ с привлечением инверсии по методике амплитудной томографии можно сформулировать три основных признака-индикатора газонасыщенных песков в геологическом разрезе ВЧР: высокие и аномально высокие значения УЭС, небольшое или незначительное снижение скорости распространения поперечных волн, увеличение значения декремента поглощения поперечных волн. Причем, для уверенного прослеживания газонасыщенных песков в геологическом разрезе должны присутствовать сразу все три признака-индикатора.

#### 4.4 Методика расчета декремента поглощения поперечных волн с применением амплитудной томографии

Как описано в Таблице 4.1, для определения газонасыщенных областей в разрезе необходима комбинация трех признаков-индикаторов – УЭС, скорость поперечных волн, декремент поглощения. Поэтому, наряду с традиционными видами томографических 2D инверсий, целесообразно внедрять технологию амплитудной томографии, позволяющую получить оценку пространственного 2D распределения значений декремента поглощения в изучаемом геологическом разрезе [52].

Разрезы декремента поглощения сейсмических волн в рамках экспериментальных и опытно-методических работ рассчитаны в программе

ZONDST2D с помощью модуля Attenuation tomography, предназначенного для восстановления декремента поглощения амплитуд продольных и поперечных волн.

Алгоритм расчета предполагает, что предварительно была решена обратная задача для сейсмических скоростей и лучевое покрытие известно, таким образом, в качестве исходных данных используются: траектории сейсмических лучей, разрез скоростей и амплитуды первых вступлений. Амплитуды автоматически определяются при пикировке годографов первых вступлений [70].

Для решения обратной задачи (инверсии) используется метод Ньютона с регуляризацией (выражение 6). Регуляризация повышает устойчивость решения и позволяет получить более гладкое распределение скорости в среде.

$$(A^T W^T W A + \mu C^T R C) \Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T R C m, \quad (6)$$

где  $A$  – матрица частных производных измеренных значений по параметрам разреза (Якобиан),

$C$  – сглаживающий оператор,

$W$  – матрица относительных погрешностей измерений,

$m$  – вектор параметров разреза,  $\mu$  - регуляризирующий параметр,

$\Delta f$  – вектор невязок между наблюдаемыми и рассчитанными значениями,

$R$  – фокусирующий оператор.

Алгоритм инверсии амплитуд (Рисунок 4.8) предусматривает те же основные операции, что и томография на рефрагированных волнах. Дополнительным параметром, который задается перед расчетом, является средняя частота полезного сигнала (Attenuation/Frequency). Для данных разрезов она была оценена по среднему спектру сейсмограмм и составила 20 Гц.

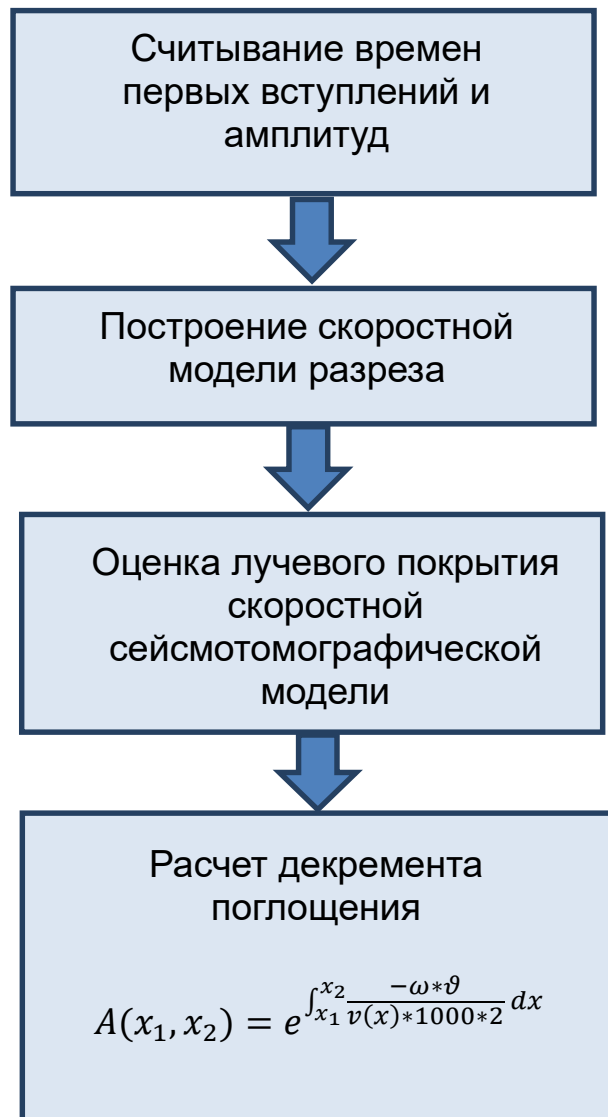


Рисунок 4.8 – Алгоритм расчета декремента поглощения в программе ZondST2D [70]

#### 4.5 Результаты исследований методами электроразведки и сейсморазведки

С целью определения возможностей предложенной методики для решения задачи по выявлению зон газонасыщения в верхней части разреза были выполнены опытные работы по профилю, проложенному через скважину ХХ1, где были зафиксированы наиболее сильные и продолжительные по времени выбросы газа.

Результаты совместной обработки данных электроразведочных и сейсморазведочных работ представлены на рисунке 4.9. Представлен интервал профиля ПК40 – ПК190, на котором в районе ПК75 находится скважина ХХ1, где газопроявления наблюдались в течение длительного времени. Приведены результаты обработки данных в виде разрезов:

- геоэлектрического (а);
- сейсмотомографического (б);
- декремента поглощения поперечных волн (в).

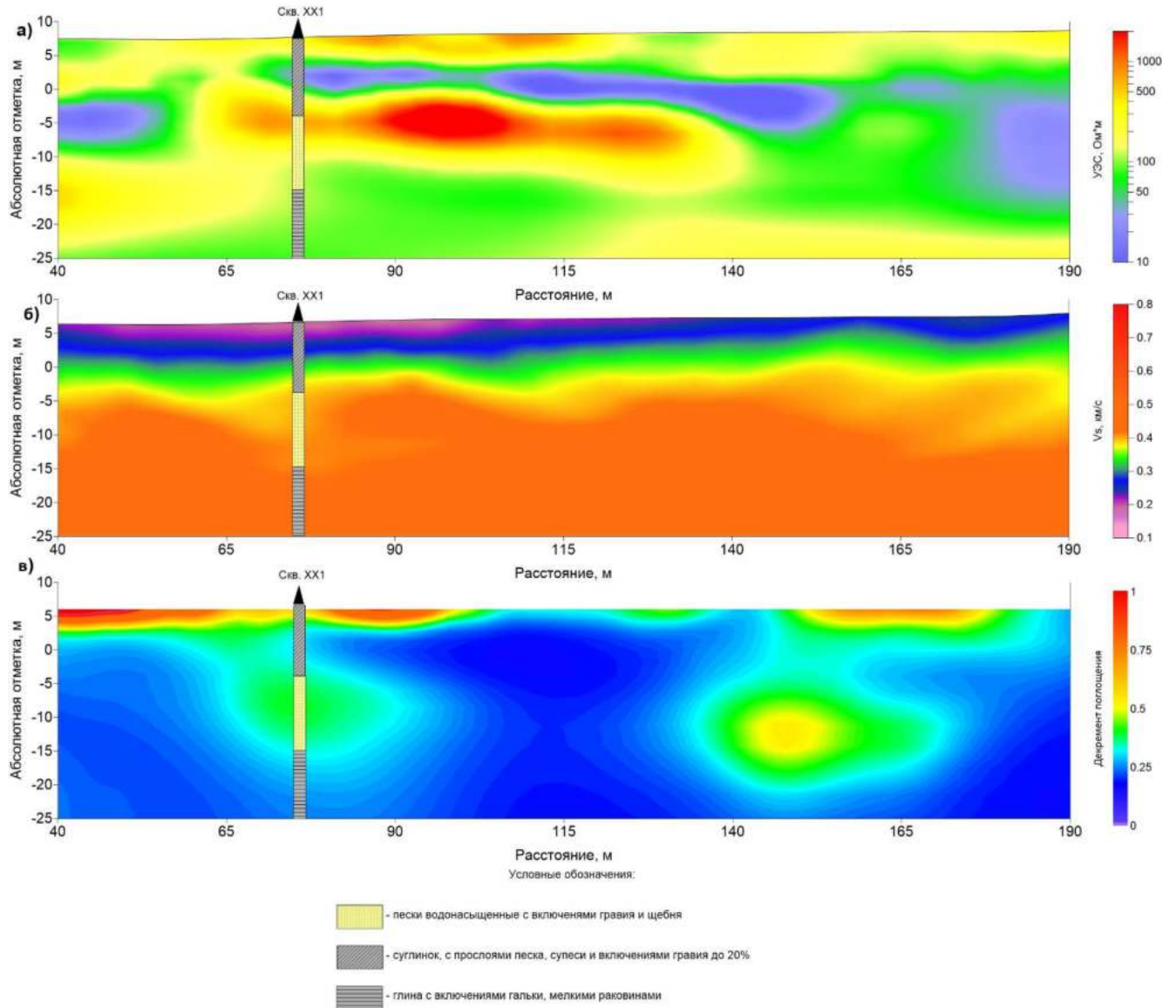


Рисунок 4.9 – Результаты геофизических исследований: а) геоэлектрический разрез; б) сейсмотомографический разрез; в) разрез декремента поглощения поперечных волн

В результате работ методом геоэлектрической томографии (ГЭТ) (Рисунок 4.9а) выделяется высокоомная аномалия в интервале ПК65 – ПК140, значения УЭС этой области более 500 Ом·м. По данным геологической колонки скважины XX1, в данном интервале вскрыты суглинки с прослоями песка, супеси, с включения гравия. Нижележащий слой представлен водонасыщенными песками

с включениями гравия и щебня. Именно 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 в приведенном интервале геоэлектрического разреза, диапазоны значений УЭС песков и суглинков перекрываются, и однозначно расчленив литологический разрез по данным ГЭТ затруднительно. Тем не менее, результаты ГЭТ 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 4.9 б). Некоторое понижение скорости  $V_s$ , наблюдаемое в интервале ПК70 – ПК80 и в районе скважины ХХ1 может быть связано как газонасыщением, так и со сменой литологии – пески/суглинки, а также с изменением количества включений графия, щебня и т.д. На всем остальном интервале ПК65-ПК140, где по данным ГЭТ была выделена высокоомная аномалия, наблюдается рост скорости  $V_s$ , что однозначно свидетельствует о наличии в разрезе плотных грунтов (суглинков). Следовательно, результаты работ методом сейсмотомографии позволяют отнести ранее выявленные высокоомные аномалии либо к песчаным, либо к глинистым отложениям. В случае песчаных грунтов выделяется второй диагностический признак-индикатор газонасыщенной зоны – незначительное снижение или неизменность скорости распространения поперечных волн.

На рисунке 4.9в показан результат инверсии методом амплитудной томографии. На разрезе хорошо видна область возрастания декремента поглощения в интервале ПК70-ПК80 и скважины ХХ1. Получен третий диагностический признак-индикатор наличия области газонасыщения – значительное возрастание декремента поглощения. В этом же интервале разреза в районе ПК130 – ПК170 наблюдается еще одна область аномально-высокого затухания упругих волн. Но, учитывая, что по данным ГЭТ в этой области

сопротивления характерны для суглинков с включениями гравия и гальки (50 - 100 Ом·м), а скорость  $V_s$  плавно нарастает с глубиной, можно сделать вывод, что в данной зоне разрез представлен суглинками с включениями обломочных пород, а затухание упругих волн происходит в результате рассеяния энергии волны на локальных неоднородностях.

#### 4.6 Выводы по главе 4

1. Интерпретация скоростей поперечных волн, полученных в результате обработки методом сейсмотомографии с использованием первых вступлений не в полной мере, позволяет однозначно выделить газонасыщенные линзы, слабоконтрастные по скоростным свойствам.
2. Для повышения надежности решения поставленной задачи необходим 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. Комплекс геофизических исследований, включающий полевые работы методами геоэлектротомографии (ГЭТ) и сейсмотомографии (СТ) и совместная интерпретация данных ГЭТ и СТ с привлечением инверсии сейсмических данных по методике амплитудной томографии позволяет по трем косвенным признакам-индикаторам выделить локальные зоны в верхней части песчано-глинистого разреза, которые могут быть связаны с линзами (прослоями) газонасыщенных песков. Все три признака-индикатора должны наблюдаться одновременно, в ином случае выделенные локальные аномалии повышенных значений УЭС, вероятнее всего, связаны со скоплением гравелистых грунтов и крупнообломочного материала.

## ГЛАВА 5 ВЫЯВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ГАЗА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ НА ПЛОЩАДКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Внедрение и опробование предложенного в Главе 4 методического подхода комплексных геофизических исследований выполнено в рамках научно-исследовательских работ по выявлению участков возможного газопроявления на площадке проектируемого объекта газотранспортной инфраструктуры, расположенном на Юго-Западе Ленинградской области в Кингисеппском районе в долине реки Луга (Рисунок 5.1).

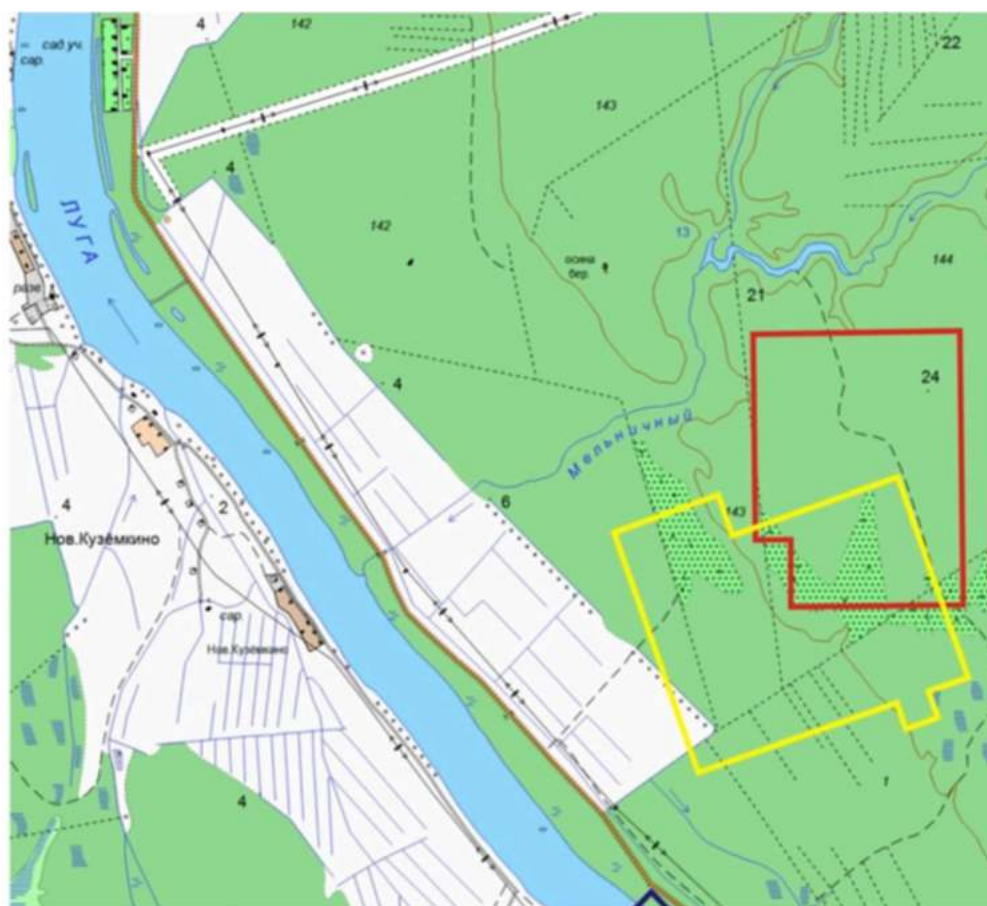


Рисунок 5.1 – Схема расположения площадки проектируемого сооружения. Желтым цветом обозначены границы первоначального положения площадки работ, на которой были встречены газопроявления; красным – границы новой площадки в результате изменения проектных решений [73]

Научно-исследовательские работы на Юго-Западе Ленинградской области в Кингисеппском районе в долине реки Луга инициированы организацией, выполнявшей проектирование объекта газотранспортной инфраструктуры после того, как в ходе выполнения инженерно-геологических изысканий в 2017 г. в ряде скважин наблюдались выбросы газа и газо-грязевой смеси (Рисунок 5.2). Наличие газопроявлений привело к необходимости изменения проектных решений и переносу положения площадки проектируемого объекта (Рисунок 5.1).



Рисунок 5.2 – Выброс газо-грязевой смеси во время выполнения инженерно-геологических изысканий

Научно-исследовательские работы на площадке проектируемого сооружения выполнены в период с января по июль 2018 г. детальные исследования участка с выявленными газопроявлениями: газогеохимическая (газоэманационная съемка), инженерно-геологические исследования, геофизические исследования, лабораторные исследования компонентного состава газа, лабораторные исследования изотопного состава газа.

Автор работы непосредственно принимала участие в организации полевых инженерно-геологических и геофизических работ, выполнении камеральной обработки данных геофизических исследований и подготовке отчетов по инженерно-геологическим, геофизическим изысканиям и отчетов по лабораторным работам по изучению компонентного и изотопного состава газа.

## **5.1 Краткая характеристика изучаемого участка исследования с наличием приповерхностных скоплений газа**

### **5.1.1 Физико-географические условия**

Участок проведения исследований расположен на юго-западе Ленинградской области в Кингисеппском районе на берегу р. Луга.

В геоморфологическом отношении изучаемая территория расположена на Куровицком плато Предглинтовой (кембрийской) низменности в пределах озерно-ледниковой и морской равнины.

Рельеф озерно-ледниковой равнины пологоволнистый или почти ровный, нередко наклоненный в сторону более молодых озерных и морских равнин. Относительные высоты колеблются в пределах от 1 до 3 м.

Характерными формами рельефа озерно-ледниковых равнин являются разновозрастные береговые валы, придающие равнинам террасированность. Береговые валы связаны с последовательными этапами существования балтийских ледниковых озер.

Морские пологоволнистые равнины представляют собой ровные, часто заболоченные поверхности, образовавшиеся в результате регрессии древнебалтийского моря. Выделяются литориновая и лимниевая террасы, занимающие абсолютные отметки от 4 до 15 м, и до 4 м соответственно.

Участок исследований расположен в 2.8 км к юго-востоку от деревни Большое Куземкино на правом берегу р. Луга на территории Кингисеппского района Ленинградской области. Поверхность пологая, абсолютные отметки рельефа изменяются в пределах от 9.8 до 23.0 метров. Территория залесена

смешанным лесом с преобладанием хвойных пород деревьев, отдельные ее участки обводнены и заболочены.

На поверхности рельефа встречены единичные валуны, размером от 0.7 до 1.5 м.

### **5.1.2 Геоморфология и рельеф**

Современный рельеф территории определяется многими факторами: почти горизонтальное залегание дочетвертичных отложений, большой длительностью доледниковых эрозионно-денудационных процессов, мощной, но неравномерной ледниковой аккумуляцией, нетектоническим поднятием, сложной историей развития бассейна Балтийского моря и т.д.

В дочетвертичное время рельеф подвергался значительному изменению под влиянием ледниковой и водно-ледниковой денудации и аккумуляции, а также последующим эрозионно-аккумулятивным процессам. Минимальные абсолютные высоты приурочены к днищам древних доледниковых речных долин, максимальные – к возвышенным участкам ордовикского плато. На изучаемой территории выделяются три крупные геоморфологические зоны: кембрийская или Предглинтовая низина, глинт и Ордовикское плато.

Современный рельеф в значительной мере унаследовал доледниковую поверхность. Наряду с этим в ледниковое, а также в поздне- и послеледниковое время в образовании рельефа большую роль играли аккумулятивные и эрозионные процессы. Наиболее развиты ледниковые, водно-ледниковые и морские аккумулятивные формы рельефа.

Рельеф озерно-ледниковой равнины пологоволнистый или почти ровный, нередко наклоненный в сторону более молодых озерных и морских равнин. Относительные высоты колеблются от 1 до 3 м. Абсолютные высоты равнин изменяются от 8 до 45 м. Характерными формами рельефа озерно-ледниковых равнин являются разновозрастные береговые валы, придающие равнинам террасированность. Береговые валы связаны с последовательными этапами существования балтийских ледниковых озер.

### 5.1.3 Геологическое строение

В геологическом строении изучаемой территории участвуют породы кристаллического фундамента и осадочного чехла, в составе которых выделяются дочетвертичные и четвертичные отложения. В рамках данной раюоты рассматриваются отложения четвертичного возраста.

Отложения четвертичной системы залегают на поверхности валдайского комплекса верхнего протерозоя. В пределах изучаемой территории установлены образования среднего и верхнего звеньев неоплейстоцена.

Среднее звено неоплейстоцена представлено московским горизонтом, в котором выделяются ледниковые и наледниковые (флювиогляциал, гляциолимний) отложения.

*Ледниковые отложения* ( $gQ_{IIIms2}$ ) достоверно установлены в скважине и имеют мощность 6.1 м. Морена представлена суглинками и глинами голубоватого и коричневатого цвета со значительным количеством галечновалунного материала, представленного гранитами и гранито-гнейсами. Диаметр валунов достигает 2 м. В качестве постоянных примесей в мелкообломочной части присутствуют везувиан и окатанные конкреции сидерита в количестве до 7%.

*Флювиогляциал (наледниковый)* ( $fQ_{IIms3}$ ) залегают на московской морене и перекрывается гляциолимнием того же горизонта. Он установлен на глубине от 44.0 до 50.3 м от поверхности. Отложения приурочены к палеодолине и представлены песками разномзернистыми полимиктовыми с включениями гравия и мелкой гальки кристаллических пород и песчано-гравийным материалом различной степени окатанности.

*Гляциолимний (наледниковый)* ( $lgQ_{IIms3}$ ) залегают на московских морене и флювиогляциальных отложениях и перекрывается осадками микулинского межледниковья. Глубина залегания его кровли 39.0 м. Гляциолимний представлен песками, суглинками, редко глинами ленточными коричневато-серыми, иногда с шоколадным или зеленоватым оттенком с частыми прослоями песка мелкозернистого слабглинистого. Ленточная слоистость наиболее ярко проявлена в средней части разреза и обусловлена чередованием прослоев алевритовых и

песчаных глин мощностью соответственно от 1 до 3 м и от 5 до 7 м. В основании разреза отмечаются включения мелкого гравия гранитов. Толщина образований до 5 м.

Верхнее звено неоплейстоцена включает в себя микулинский горизонт и валдайский надгоризонт.

*Микулинский горизонт* ( $mQ_{III}mk$ ) имеет широкое развитие в пределах Предглинтовой низменности, представлен морскими фациями мгинской свиты (мариний). Осадки этого межледникового являются маркирующими не только на территории европейской, но и азиатской частей России. Термолюминесцентным методом в нескольких разрезах определен возраст отложений в пределах 110 – 130 тыс. лет. Морские отложения вскрыты также в многочисленных скважинах. В отложениях микулинского горизонта, по характерным спорово-пыльцевым комплексам и карпологическим остаткам, прослеживается четкая последовательность смены растительных группировок, характеризующих климат – теплее современного. Морские осадки содержат раковины моллюсков аркто-бореального комплекса, а для периода оптимума – теплолюбивых лузитанских видов и фораминифер [23].

*Мгинская свита (мариний)* ( $mQ_{III}mg$ ) приурочена к нижним частям доледниковых долин. Залегает на разных глубинах с абсолютными отметками кровли минус 34.0 м. Мощность отложений – 4 м. Представлены глинами на западе территории и песками – в ее восточной и центральной частях.

Глины обычно уплотнены, иногда неяснослоистые и часто битуминозные с включениями вивианита и пиритизированного растительного детрита. Они залегают с размывом на гляциолимнии московского оледенения и перекрываются водными отложениями валдайского оледенения.

Пески представлены разнозернистыми разностями и имеют мощность, значительно превышающую мощность глин.

В пределах исследуемой территории вскрыты только верхнечетвертичные отложения валдайского надгоризонта и современные отложения. К валдайскому

надгоризонту отнесены отложения подпорожского, ленинградского и осташковского горизонтов, широко развитых на рассматриваемой территории.

*Подпорожский горизонт* (I, mQ<sub>III</sub>kg-vv) включает в себя нерасчлененные курголовский и верхневолжский лимний и мариний.

Курголовский и верхневолжский лимний и мариний залегают на глинах мгинской свиты на абсолютных отметках от минус 24 м и перекрываются с размывом озерными отложениями ленинградского горизонта. Мощность образований меняется от 4 м до 9 м. Преобладают глины с прослоями и присыпками тонкозернистого песка, подчеркивающими нечеткую тонкую горизонтальную слоистость породы. Участками отмечаются следы подводного оползания. По всему слою отмечаются слабо окатанные гравий и галька гранитов и гранито-гнейсов, иногда – гнезда пирита диаметром до 1 см.

*Ленинградский горизонт* (I, IaQ<sub>III</sub>ln) представлен нерасчлененными озерными и озерно-аллювиальными отложениями, широко распространенными в Предглинтовой низменности и, преимущественно, приуроченных к областям развития древних доледниковых долин. Абсолютные отметки их кровли варьируют от плюс 17 м до минус 64 м, что, возможно, связано с отсутствием связи между озерно-аллювиальными бассейнами, занимавшими разные гипсометрические уровни. Средняя мощность отложений составляет от 13 до 16 м, при максимальных значениях до 26 м в древних долинах. Образования представлены суглинками и глинами, песками мелкими и пылеватыми.

*Осташковский горизонт* (gQ<sub>III</sub>) представлен ледниковыми отложениями и отложениями балтийского ледникового озера.

*Ледниковые отложения* (gQ<sub>III</sub>os<sub>2</sub>) в пределах Предглинтовой низменности развиты повсеместно, вскрыты с поверхности или перекрыты толщей озерно-ледниковых отложений. Морена представлена супесчаными и суглинистыми разностями, с частыми линзами песков и гравия мощностью до 10 м. Породы имеют серый и темно-серый цвет, часто с зеленоватым оттенком, и содержат различное количество слабоокатанных гравия, гальки и валунов кристаллических

пород. Грунты содержат в толще включения единичных валунов, размером от 0.2 до 0.8 м.

*Отложения Балтийского ледникового озера (lg Q<sub>шbl</sub>)* имеют широкое развитие в приглинтовой полосе, пониженной части Ордовикского плато и на возвышенных участках Предглинтовой низменности. Установленный, по абсолютной высоте, уровень залегания и наличие береговых образований позволяет разделить осадки первого и второго Балтийских ледниковых озер только на поверхности.

Отложения Балтийского ледникового озера распространены в верхней части разреза, залегают на ледниковых отложениях. Отложения представлены преимущественно суглинками твердыми и глинами полутвердыми. Мощность отложений от 1.5 до 3.0 м.

*Современные отложения (Q<sub>IV</sub>)*, представлены биогенными (bQ<sub>IV</sub>) и техногенными (tQ<sub>IV</sub>) образованиями.

Биогенные отложения (bQ<sub>IV</sub>) представлены почвенно-растительным слоем и торфом.

*Почвенно-растительный слой* супесчаного и суглинистого состава, с корнями травяной и древесной растительности, распространён на всей изучаемой территории. Мощность почвенно-растительного слоя составляет от 0.1 до 0.4 м (преимущественно от 0.2 до 0.3 м). На пониженных и обводненных участках почвенный слой часто заторфован.

*Болотные отложения (торф)* на исследуемой территории развиты, главным образом, на выровненных участках с затрудненным поверхностным стоком и слабой инфильтрационной способностью нижележащих грунтов. По характеру растительных остатков торф наземного характера. Болота преимущественно верхового типа. Мощность торфа обычно составляет от 1.0 до 1.2 м.

*Техногенные образования (tQ<sub>IV</sub>)* представлены отвалами грунтов и насыпями автомобильных дорог.

#### 5.1.4 Инженерно-геологические условия

На исследуемом участке выполнен большой объем бурения инженерно-геологических скважин глубиной до 75 м, что дает очень хорошее представление о строении разреза. Верхняя ступень, согласно этим данным, сложена суглинками с включениями гальки, щебня и дресвы, с редкими прослоями пылеватого песка. По данным геоэлектротомографии, эта часть также представляет собой достаточно однородное строение, а высокоомные аномалии электрического поля, по скоростям поперечных волн интерпретируются, как скопления гравийно-галечного и валунного материала (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Образец керна, характеризующий размеры включений валунно-галечного материала

#### 5.2 Результаты инженерно-геофизических исследований

В соответствии с методикой, описанной в Главе 3, на участке исследования, выполнен комплекс геофизических работ, включающий электроразведочные работы методом геоэлектротомографии (ГЭТ) и сейсморазведочные работы МПВ методом сейсмотомографии (СТ).

Работы методом ГЭТ были выполнены по всей площади исследования по системе параллельных профилей на расстоянии от 30 до 100 м друг от друга. Затем, по результатам обработки данных электроразведки были выбраны профили, на которых проявились высокоомные аномалии и по таким профилям (или интервалам профилей) были выполнены сейсморазведочные работы методом

преломленных волн с последующей обработкой по методике сейсмотомографии и амплитудной томографии.

Схема расположения профилей электроразведки приведена на Рисунке 5.4.

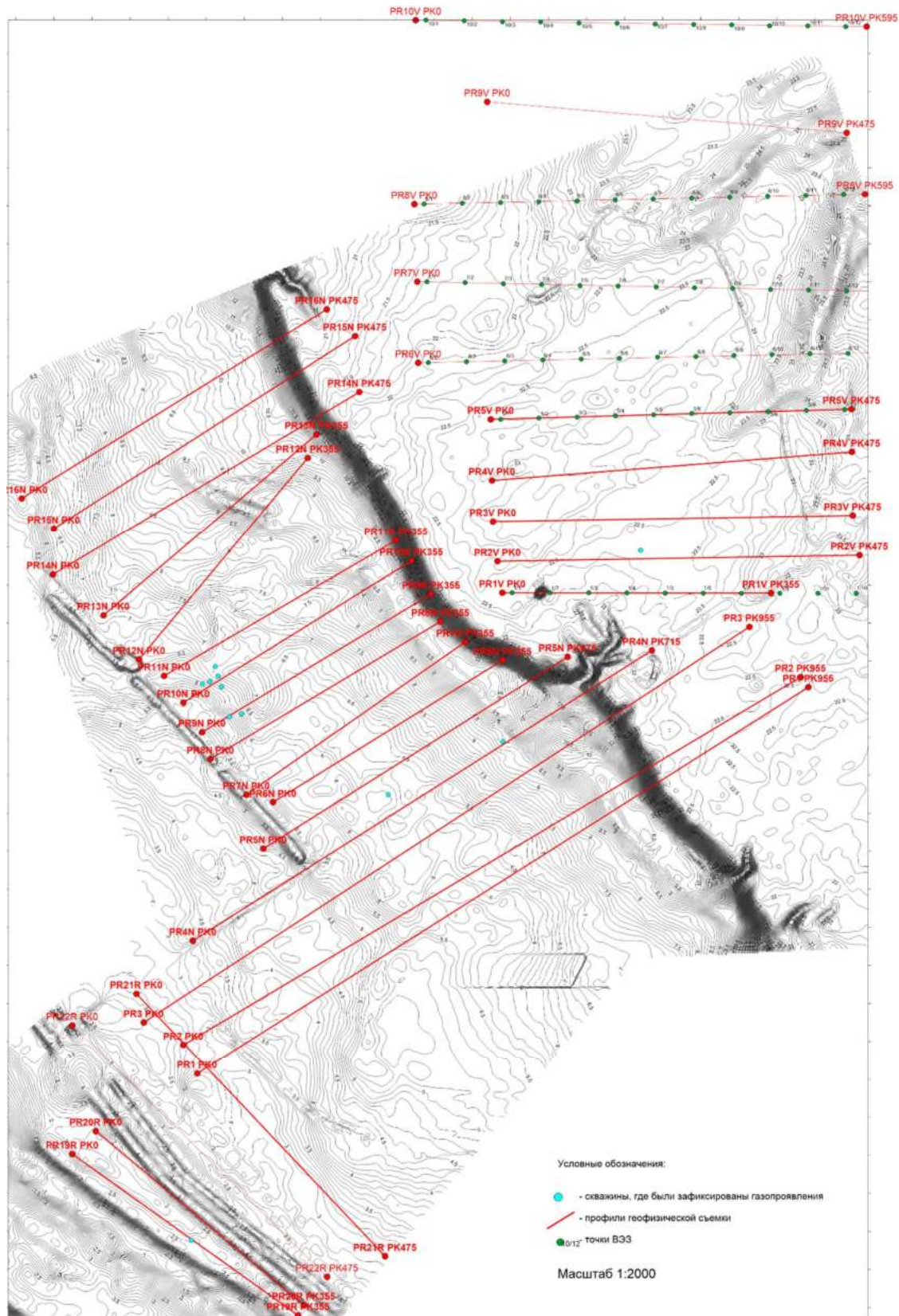


Рисунок 5.4 – Схема расположения профилей электроразведки

Площадку исследований можно условно разделить на две части: участок в старых границах проектирования, где были вскрыты зоны газонасыщения и участок в новых границах, куда были перенесены все проектируемые сооружения для исключения возможного негативного воздействия приповерхностных скоплений газа. Новая площадка проектирования расположена значительно выше по абсолютным отметкам. Превышение составляет в среднем от 10 м до 16 м.

### 5.2.1 Результаты электроразведочных работ

Результаты электроразведочных работ представлены в виде схемы расположения профилей ЭТ (Рисунок 5.4), геоэлектрических разрезов (Рисунок 5.5) и карты распределения удельного электрического сопротивления (Рисунок 5.6).

На Рисунке 5.5 представлены интервалы геоэлектрических профилей, наиболее характерные для участка исследования.

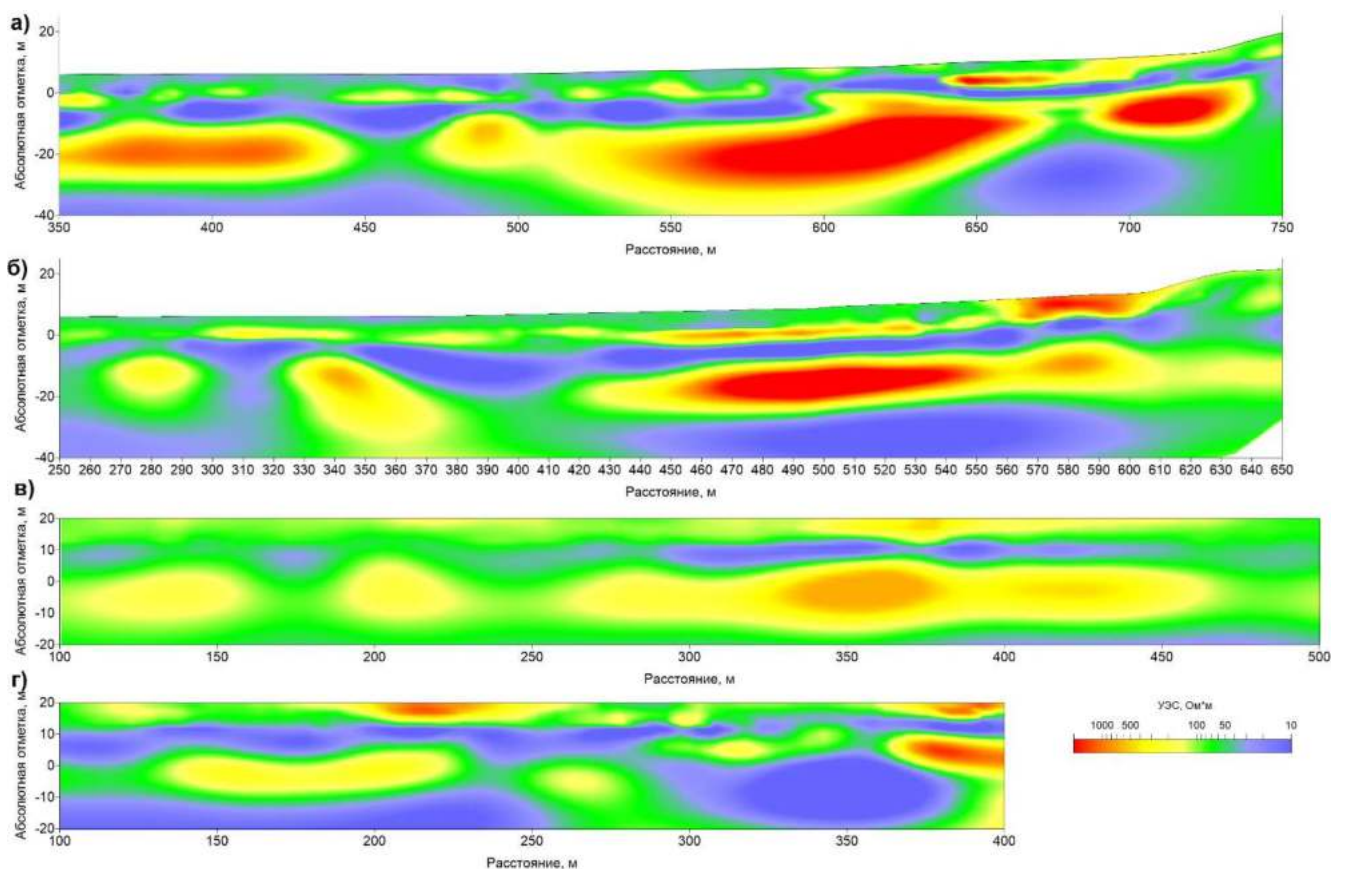


Рисунок 5.5 – Геоэлектрические разрезы по интервалам профилей ПР3н(а), ПР4н(б), ПР7в(в) и ПР3в(г)

Профили 3н и 4н выполнены в границах старой площадки проектируемого сооружения, где были встречены газопроявления на стадии инженерных изысканий. Профили 3в и 7в выполнялись в новых границах проектирования.

Как хорошо видно, на рисунке 5.4, распределение УЭС в разрезе по профилям, выполненным в старой и новой границах проектирования, значительно различаются, как по общему уровню удельного электрического сопротивления грунтов, так и по наличию (отсутствию) высокоомных аномалий.

На геоэлектрических разрезах (Рисунок 5.5), построенных по профилям ПР3н и ПР4н (старая площадка проектирования и участок перехода через р. Луга) выделяются зоны повышенных значений УЭС. На ПР4н расположена скважина, пробуренная в ходе выполнения инженерно-геологических изысканий 2017г. Скважиной были вскрыты межморенные озерно-аллювиальные пески, из которых вместе с напорными подземными водами происходили выбросы газа с запахом сероводорода. В ряде скважин напор воды вместе с газовой составляющей поднимался над устьем скважины на высоту от 1 до 2 м и длился с момента вскрытия до конца рабочего дня [73]. Положение скважины совпадает с положением зоны аномально высоких значений УЭС (более 500 Ом·м) в интервале ПК450 – ПК550 профиля 4н (рисунок 5.5).

На площадке, расположенной в новых границах проектирования, была выполнена съемка методом ЭТ по профилям ПР1в – ПР10в. В целом на этой площадке уровень УЭС ниже, а повышенные значения УЭС не превышают 400-450 Ом·м (Рисунок 5.5в, 5.5г). Эти аномалии менее контрастные, чем на участке в старых границах.

На верхней площадке в ходе выполненных инженерных изысканий было пробурено большое количество скважин, в том числе, глубиной до 35 м. Анализ результатов инженерно-геологических работ показывает, что разрез на верхней части участка исследования представлен толщей суглинков с прослоями песка и включениями гравия и гальки. Значительного размера песчаных линз скважинами не вскрыто. Высокоомный слой в верхней части разреза, по данным бурения, связан с толщей суглинков с большим количеством включений гравия и гальки (до 35%).

Разрез, по данным инженерно-геологических изысканий, представлен суглинистой толщей значительной мощности – до 35 м.

По данным электротомографии построены карты распределения удельного электрического сопротивления в плане для разных глубин. На Рисунке 5.6 приведена карта, характеризующая распределение УЭС в плане для глубины, соответствующей абсолютной отметке 20 м [50]. Эта карта позволяет наглядно оценить распределение высокоомных аномалий по площади. На карте показаны скважины, которые в ходе инженерно-геологических изысканий 2017 г. вскрыли газонасыщенные пески.

Анализ полученных геоэлектрических разрезов и карт показывает, что выявленные во время изысканий в 2017 г. газопроявления расположены в зонах повышенных значений удельного электрического сопротивления.

В интервалах профилей, где расположены наиболее контрастные аномалии УЭС проводились сейсморазведочные работы. Большая часть сейсморазведочных работ выполнена в старых границах проектирования, на участке в новых границах сейсморазведочные работы выполнены в интервалах отдельных профилей, где наблюдаются повышенные значения УЭС относительно вмещающих пород.

### **5.2.2 Результаты выполнения полевых сейсморазведочных работ**

Основной задачей сейсморазведочных работ является уточнение природы аномалий высоких значений УЭС (более 500 Ом·м), поскольку они могут быть связаны как со скоплениями газа в песчаных отложениях, так и со скоплениями валунно-галечного материала в толще суглинков.

Сейсморазведочные работы проводились по отдельным интервалам профилей ЭТ, где выделены участки с высокоомными аномалиями, которые могут быть связаны с газонасыщенными песками.

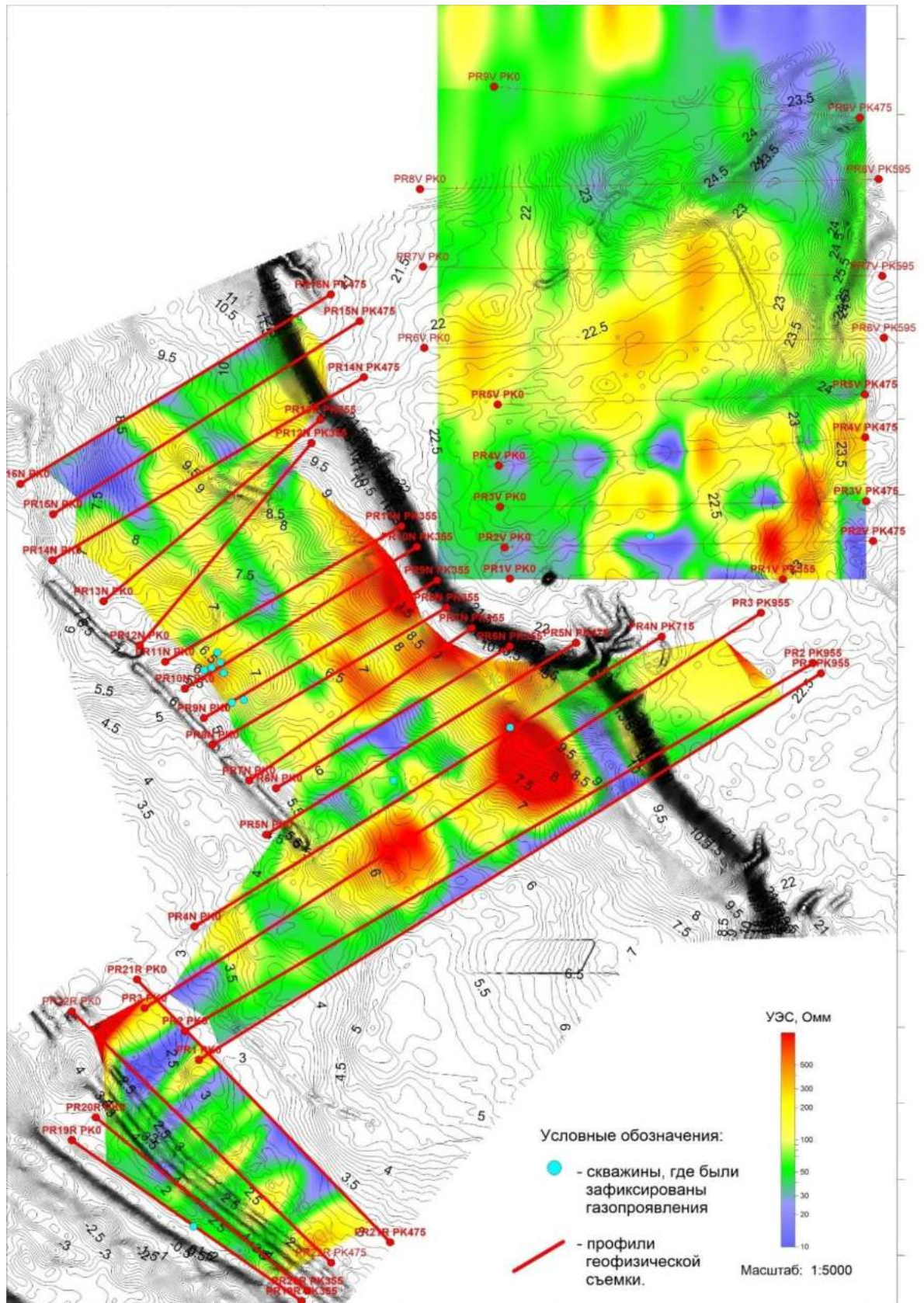


Рисунок 5.6 – Карта распределения УЭС по площади, построенная для глубины геоэлектрического разреза, соответствующего абсолютной отметке минус 20 м

Примеры сейсмотомографических разрезов приведены на рисунке 5.7 в виде интервалов профилей. Для построения разрезов были использованы данные, полученные при регистрации первых вступлений поперечных волн, использование которых обеспечивает большую глубинность изучения разреза, поскольку высокий уровень грунтовых вод формирует очень контрастную преломляющую границу и нижежащие слои слабо дифференцируются на продольных волнах. Разрезы получены в результате двумерной кинематической инверсии сейсмических данных по профилям, расположенным в старых (3н, 4н) и новых (7в, 3в) границах проектирования.

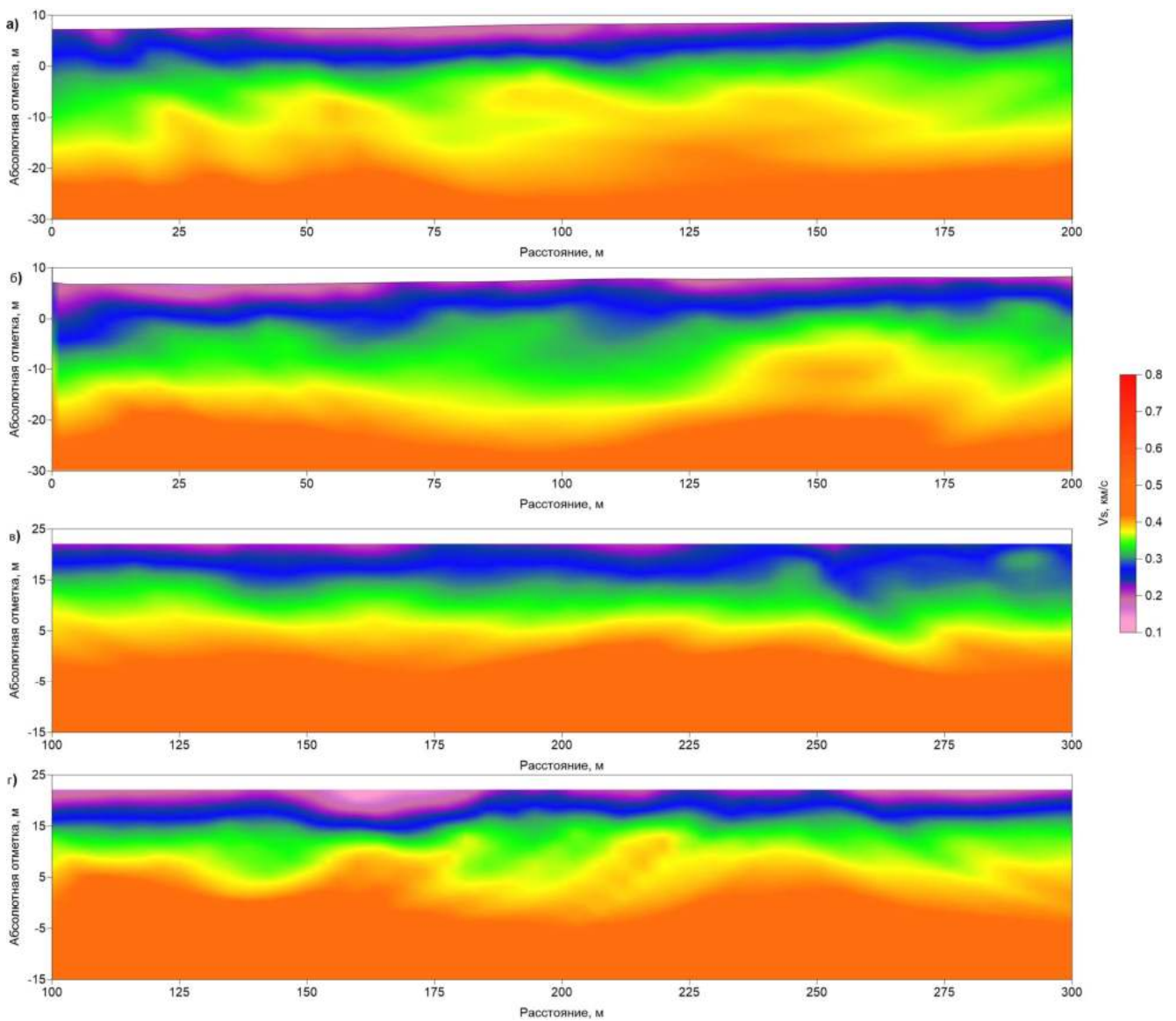


Рисунок 5.7 – Сейсмотомографические разрезы по интервалам профилей ПР3н (а), ПР4н (б), ПР7в (в) и ПР3в (г)

По всем разрезам можно выделить три слоя, отличающихся по скоростным характеристикам и формирующих горизонтально-слоистую структуру разреза:

Первый слой приурочен к верхней части разреза и характеризуется скоростями поперечных волн в диапазоне от 120 до 200 м/с.

Второй слой характеризуется распределением скоростей поперечных волн от 300 до 400 м/с. По данным бурения сложен суглинками с прослоями песка.

Третий слой (нижняя граница не определяется) характеризуется скоростью поперечных волн свыше 400 м/с. Этот слой характеризуется монотонным нарастанием скорости с глубиной и отсутствием резких латеральных неоднородностей скорости поперечных волн [50].

### **5.2.3 Совместная интерпретация данных электроразведки и сейсморазведки с привлечением результатов обработки методом амплитудной томографии**

В соответствии с методикой, предложенной в Главе 4, отнесение того или иного участка разреза к зоне возможного наличия приповерхностного скопления газа возможно при совпадении трех признаков-индикаторов:

- участок разреза характеризуется аномально высокими значениями УЭС;
- скорость распространения упругих волн на этом участке не изменяется или изменяется незначительно;
- декремент поглощения упругих волн на этом участке значительно выше, чем в целом по разрезу.

На основании этих признаков рассмотрен интервал профиля 3, на котором, по данным ЭТ, была выделена высокоомная аномалия в районе ПК375 – ПК450. В интервале профиля 3н ПК340 – ПК520 выполнены сейсморазведочные работы, проведена обработка данных сейсморазведки методом сейсмотомографии и амплитудной томографии и совместная интерпретация данных электроразведки и сейсморазведки. (Рисунок 5.8).

Как видно на рисунке 5.8, в интервале ПК375 – ПК450 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. Интервал профиля ПК410 – ПК430 был признан перспективным для выполнения заверочного бурения, и на ПК425 была пробурена скважина XX2, вскрывшая газонасыщенные пески.

Геофизические исследования, выполненные в новых границах проектируемого объекта, не выявили на этой площадке участков, которые можно было бы отнести к потенциальным приповерхностным скоплениям газа. Характерным примером может служить интервал профиля ПР6в, где была выделена зона повышенных значений УЭС в интервале ПК100 – ПК150.

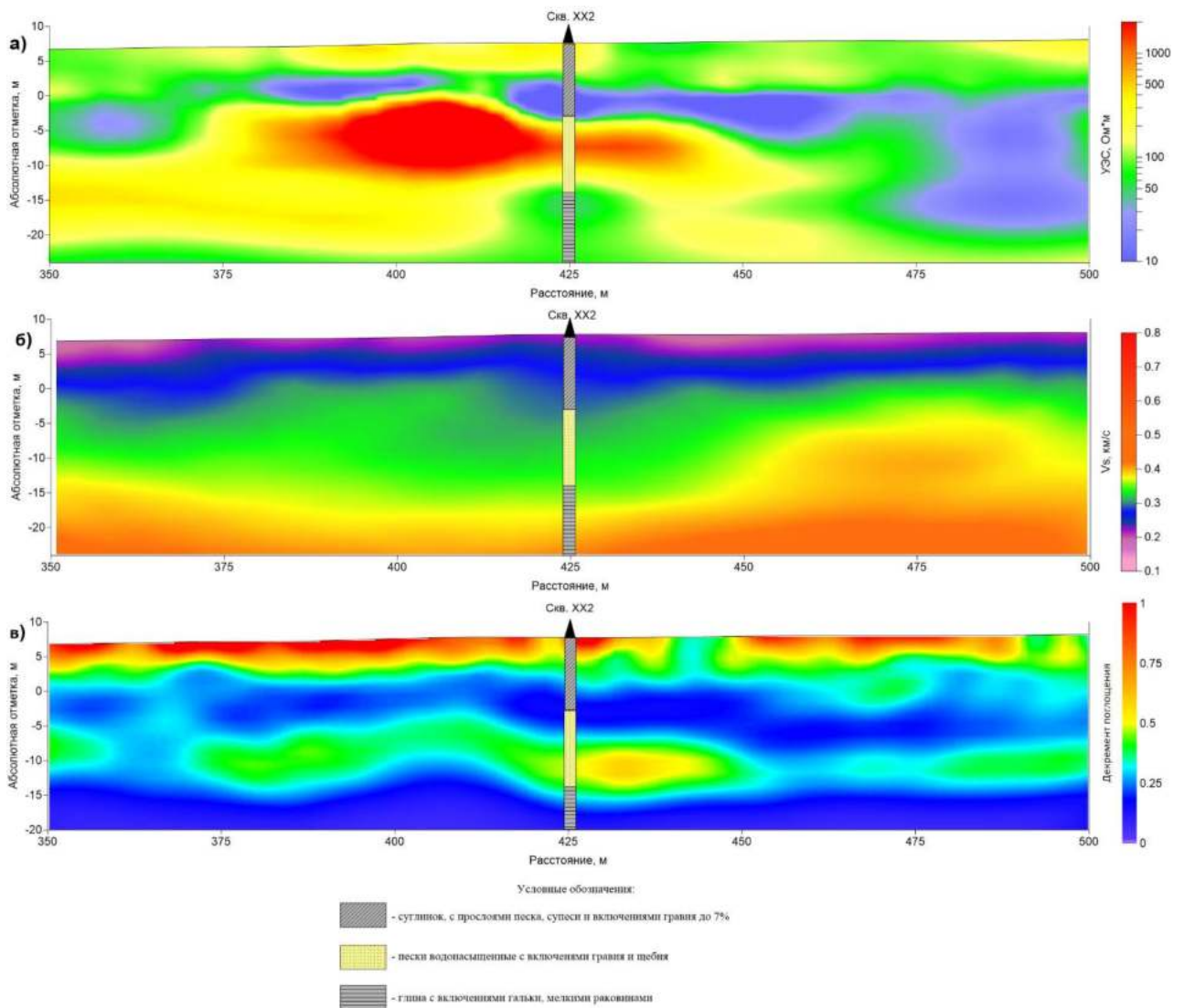


Рисунок 5.8 – Результат совместной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки в интервале профиля ПР3н

В этом же интервале были выполнены сейсморазведочные работы и выполнена обработка и совместная интерпретация данных, результат которой приведен на рисунке 5.9.

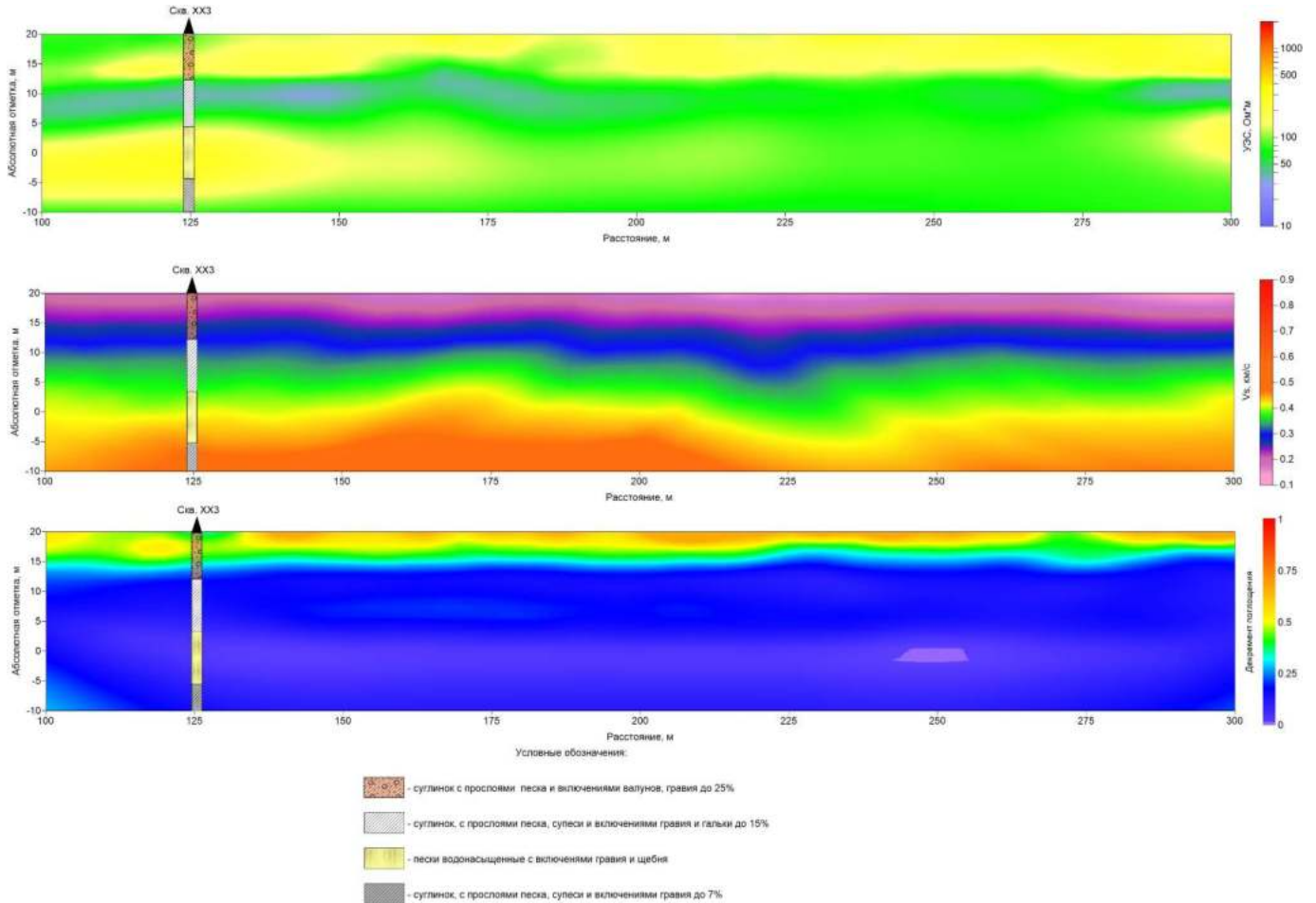


Рисунок 5.9 – Результат совместной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки в интервале профиля ПР6в

Как видно на рисунке 5.9, по результатам сейсморазведочных работ в интервале ПК100 – ПК150 не наблюдается признаков наличия локальных скоплений газа. Скорость поперечных волн плавно увеличивается с глубиной, декремент поглощения возрастает незначительно по всему интервалу профиля. Пробуренная в ходе выполнения инженерных изысканий скважина XX3, показала наличие прослоя водонасыщенных песков и супесей в интервале ПК100 – ПК150, газопроявления зафиксированы не были.

### 5.3 Выводы по главе 5

1. Выявление приповерхностных газопроявлений в песчано-глинистом разрезе является сложной задачей для инженерной геофизики из-за сильной изменчивости литологии ВЧР и наличия неоднородностей, представленных скоплениями валунно-галечного материала. Комплексные геофизические исследования, включающие методы сейсморазведки и электроразведки позволяют решить задачу по выделению участков, возможно связанных с газопроявлениями, что подтверждается данными бурения.
2. Рациональный комплекс методов для выявления локальных приповерхностных скоплений газа должен включать площадную съемку методом геоэлектротомографии и профильные наблюдения методом сейсморазведки в модификации сейсмотомографии для уточнения природы аномалий высокого удельного сопротивления.
3. На основании материалов, представленных в главе 5 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:

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ВЧР	Верхняя часть разреза
ГЭТ	Геоэлектротомография
КМПВ	Корреляционный метод преломленных волн
КУЭС	Кажущееся удельное электрическое сопротивление
МПВ	Метод преломленных волн
ОПВ	Общий пункт возбуждения
ПВ	Пункт возбуждения
ПП	Пункт приема
ПК	Пикет
ПР	Профиль
СТ	Сейсмотомография
УГВ	Уровень грунтовых вод
УЭС	Удельное электрическое сопротивление
ФГМ	Физико-геологическая модель
ЭП	Электропрофилирование
$V_s$	Скорость поперечных волн
$V_p$	Скорость продольных волн
$\omega$	Круговая частота колебаний
$\vartheta$	Декремент поглощения
$\alpha_n$	Коэффициент поглощения
$\lambda$	Длина волны
$k_n$	Коэффициент пористости
$G$	Коэффициент водонасыщения
$W$	Весовая влажность
$W_{об}$	Объёмная влажность
$\rho$	Удельное электрическое сопротивление
$C_{орг}$	Содержание органического углерода в грунте
$\sigma_{сж}$	Модуль всестороннего сжатия

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух, А.Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке / А. Г. Авербух. - М.: Недра, 1982. - 232 с.
2. Александрова, Н.А. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Тихвинско-Онежская. Листы: О-36-VI (Бабаево), О-36-XII (Чагода), О-37-I (Борисово-Судское), О-37-II (Воскресенское). Объяснительная записка/ Александрова, Н.А., Ауслендер, В.Г., Буслович, А.Л., Бондаренко, Е.Д. //М.: ВГФ, 1993. 207 с.
3. Александрова, О.Ю. Природные и природно-техногенные геологические процессы в подземном пространстве Санкт-Петербурга: закономерности развития, систематизация и возможности предотвращения: диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.08/Александрова Ольга Юрьевна. – СПб., 2007. - 21 с.
4. Ампилов, Ю.П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах / Ю.П. Ампилов. - Москва: Газоил пресс, 1992. - 162 с.
5. Аникин, О.П. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами / О.П. Аникин, Ю.В. Горшенин. – М.: Изд. ЦНИИС, 1985. – 65 с.
6. Архангельский, И.В. Инженерно-геологическая характеристика намывных грунтов в районе Санкт-Петербурга // Инженерная геология. 2015. № 2. С. 58–65.
7. Балков Е. В. Электротомография: Аппаратура, методика и опыт применения/ Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В.А. <https://nemfis.ru> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nemfis.ru>. – (Дата обращения: 28.08.2020).
8. Бобачев, А.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. / Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н. [и др.]//Физика Земли 1995 - N 12 - с.79-90.

9. Богословский, В.А. Опыт применения метода сопротивлений при создании противодиффузионных цементных завес/Гидротехническое строительство, № 8, 1969. с. 10-12.
10. Богоявленский, В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра / Бурение и нефть. 2014. №9. С. 13 – 18.
11. Богоявленский, В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра / Бурение и нефть. 2014. №10. С. 4 –8.
12. Бондарев, В.И. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. М.: Стройиздат, 1974, с.142.
13. Бондарев, В.Н. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря / Бондарев, В.Н., Длугач А.Г., Костин Д.А., Рокос С.И., Полякова Н.А.// Геология и геофизика, Том 43, №7, 2002, с. 587-598
14. Бондур, В. Г. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования / Бондур, В. Г., Кузнецова Т. В.//Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 4. – С. 30 – 43
15. Бурлуцкий, С. Б. Физико-геологические модели оползневых склонов по данным электро- и сейсмотомографии: диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.10 / Бурлуцкий Станислав Борисович; [Место защиты: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»].- Санкт-Петербург, 2015.- 201 с.
16. Вербицкий В. Р., Государственная геологическая карта Российской Федерации Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист О-35 – Псков, (N-35), О-36 – Санкт-Петербург. Объяснительная записка. [Текст:]/В. Р. Вербицкий, И. В. Вербицкий, О. В. Васильева, В. В. Саванин и др. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012, 510 с.
17. Вертикальное электрическое зондирование, практикум курса “Основы геофизических методов” для студентов геологических специальностей. Методическое пособие. МГУ, Москва, 2007, 31 с.

18. Вознесенский, Е.А. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах [Текст]: монография / Е. А. Вознесенский, Е. С. Кушнарёв, В. В. Фуникова. - Москва: Флинта : Наука, 2013. - 103, [1] с.
19. Воскресенский Ю.Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. Учебное пособие для вузов. – М.: РГУ нефти и газа, 2001, 68 с.
20. Галимов, Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода [Текст] / Отв. ред. акад. А. П. Виноградов. - Москва: Недра, 1968. - 224 с.
21. Геологические и экологические риски Санкт-Петербурга. Практические рекомендации по адаптации к климатическим изменениям [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://cliplive.infoeco.ru/index.php?id=16>.
22. Геологический атлас Санкт-Петербурга, СПб, «Комильфо», 2009, 57 с.
23. Геология СССР. Том № 1. Геологическое описание. Ленинградская, Псковская и Новгородская области [Текст] / под ред. ак. А.В. Сидоренко. – М., «Недра», 1971.
24. Геология СССР. Том № 28. Геологическое описание и полезные ископаемые. Эстонская ССР [Текст] / под ред. П.Я. Антропова. - Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, М., 1960
25. Горяинов, Н.Н. Сейсмоакустические методы при инженерно-геологических исследованиях рыхлых пород (методические рекомендации) / Н.Н. Горяинов. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1977. – 79 с.
26. Горяинов, Н.Н. Сейсмические методы в инженерной геологии / Н.Н. Горяинов, Ф.М. Ляховицкий. – М.: Недра, 1979. – 143 с.
27. Грунтоведение // Под ред. В.Т. Трофимова – 6-е изд., перераб. и дополн. (серия Классический университетский учебник) / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, Е. А. Вознесенский и др. - М., Изд-во МГУ и Наука, 2005. - 1024 с.
28. Гурвич, И.И. Сейсмическая разведка / Гурвич И.И., Боганик Г.Н.- М.: Недра, 1982 - 551 с.

29. Далматов, Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии): Учебник / Б.И. Далматов. - СПб.: Лань, 2012. - 416 с.
30. Дахнов, В. Н. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений [Текст]: учеб. пособие для студентов специальности "Геофиз. методы разведки нефт. и газовых месторождений" / В.Н. Дахнов. - М. ; Л. : Гостоптехиздат, 1951. - 428 с.
31. Дашко, Р.Э. Геоэкология подземного пространства мегаполисов на примере Санкт-Петербурга [Текст] / Р.Э. Дашко, Л.П. Норова, Е.С. Руденко // Труды международной конференции «Подземный город: геотехника и архитектура». - СПб, 1998.
32. Дашко, Р.Э. Ретроспективный анализ экологического состояния подземного пространства Санкт-Петербурга [Текст] / Р.Э. Дашко, Л.П. Норова, Е.С. Руденко // Наука в Санкт-Петербургском государственном горным институте: сб. науч. трудов. – СПб., 1998 - № 3.
33. Дашко, Р.Э., Александрова, А.Ю., Костюков, П.В., Шидловская, А.В., 2011. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Развитие городов и геотехническое строительство, № 1, с. 1–47.
34. Дашко, Р.Э. Роль микробиоты при изучении состояния и свойств дисперсных грунтов и развитии инженерно-геологических процессов (на примере Санкт-Петербурга) / Р.Э. Дашко, Я.А. Карпова // Грунтоведение. – 2012. – №1. – С. 38-43.
35. Дашко, Р.Э. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга [Текст] / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, П.В. Котюков, А.В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство, 2011 - № 1, С. 1-47.].
36. Дашко, Р.Э. Инженерная геология и геоэкология подземного пространства Санкт-Петербурга – основные проблемы его освоения и использования [Текст] / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии.

Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (20-21 марта 2008 г.). - М., «ГЕОС», 2008 - № 10, С. 203-208

37. Динамика подземных вод: [Учеб. для геол.-развед. техникумов] / П. П. Климентов, В. М. Кононов, М.: Высшая школа, 1985 г. – 384 с.
38. Добрынин, В. М. Петрофизика: учебник для вузов / В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн, Д. А. Кожевников. - М.: Недра, 1991. - 368 с
39. Долгаль А.С. Комплексирование геофизических методов: учеб. Пособие /А.С. Долгаль; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2012. – 167 с.
40. Ефимова, Н.Н. Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики: дис. ... канд. тех. наук. – СПб.: 1999. – 198 с.
41. Зинченко, В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных: Учебное пособие для студентов вузов / В.С. Зинченко. – М.- Тверь: Изд. АИС, 2005. – 392 с.
42. Кожевников, Д. А. Петрофизика (физика горных пород) / Д. А. Кожевников, В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн. – 2-е изд. – М.: Нефть и газ, 2004. – 368 с.
43. Козырев, В.С. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке/ Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П//Современные технологии. М. ООО “Недра-Бизнесцентр”, -2003. 227 с.
44. Колюбакин, А.А., Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых / Колюбакин А.А., Миронюк С.Г., Росляков, А.Г. [и др.]// Инженерные изыскания. 2016. № 10 – 11. С. 38-51.
45. Кондратьев, О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах / О. К. Кондратьев. - М.: Недра, 1986. – 174 с.
46. Королёв, В.А. Инженерная геология: история, методология и номологические основы/ Королёв В.А., Трофимов В.Т. – М.: Издательство "КДУ", 2016. – 292 с.

47. Кудрявцев, Ю.И. Теория поля и её применение в геофизике: учебник для геофизических специальностей вузов и университетов. - Ленинград: Недра, Ленинградское отделение, 1988. – 334 с.
48. Кузнецов, О.Л. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Том 2: Экспериментальные исследования/ Кузнецов О.Л., Дыбленко В.П., Курьянов Ю.А., Рогоцкий Г.В., Чиркин И.А.//М.: Государственный научный центр Российской Федерации – ВНИИГеосистем, 2004. - 320 с.
49. Корнеев, О.Ю. Выявление геологических опасностей с помощью высокочастотного сейсмоакустического профилирования и локации бокового обзора для целей ГМГС/ Корнеев О.Ю., Свечников А.И., Рыбалко А.Е., Никитин М.А., Назарова О.В. //Разведка и охрана недр, № 10, с. 48-53 (2011)
50. Куликова, Н.В. Комплексные геофизические исследования газонасыщенных песчаных отложений на территории Ленинградской области/ Куликова Н.В., Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Куликов А.И., Татарский А.Ю. // 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; DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901724>
51. Куликова Н.В. Геофизический мониторинг изменений состояния грунтового основания автомобильной дороги при стабилизации грунтов с использованием энергии взрыва/ Куликова Н.В., Глазунов В.В., Городнова Е. В., Ефимова Н.Н., Куликов А.И., Татарский А.Ю.// Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2018, Apr 2018, Volume 2018, p.1 – 9, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800498>
52. 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

53. 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
54. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология: Учебник для вузов по спец. "Гидрогеология и инженерная геология". - Ленинград: Недра. Ленинградское отделение, 1978. – 496 с.
55. Максимович, Н.Г. Микробиологические процессы в грунтовых плотинах/ Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т.//Инженерные изыскания, 2013, № 9, с. 46-51.
56. Манштейн, А.К. Малоглубинная геофизика: учебное пособие / А. К. Манштейн – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2002. – 136 с.
57. Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств грунтов / Изд-во Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства, 1976. 71 с.
58. Методические рекомендации по определению динамических свойств грунтов, скальных пород и местных строительных материалов. П 01-72. Л. : Энергия, 1972.
59. Миндель, И.Г. Особенности изучения деформационно-прочностных свойств дисперсных грунтов сейсмоакустическими методами/ Миндель И.Г., Севостьянов В.В., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А.//Геозкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2016 №5, с.461-476
60. Никитин, В.Н. Основы инженерной сейсмологии / В.Н. Никитин. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 176 с.
61. Никитин, А.А. Комплексирование геофизических методов: Учебник для вузов / А.А. Никитин, В.К. Хмелевской. Тверь: ООО «Издательство ГЕРС», 2004. – 294 с.
62. Объяснительная записка [Текст] / Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист О-(35), 36 – Ленинград. Л., 1989.

63. Огильви, А.А. Основы инженерной геофизики / А.А. Огильви; под ред. В.А. Богословского. – М.: Недра, 1990. – 502 с.
64. Оделевский, В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем/Журнал технической физики, 1951, Т. 21, вып. 6, с. 667-685
65. Оленченко, В.В. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования "Ямальский кратер" / Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю. [и др.]//Криосфера Земли. — 2015. — Т. XIX, № 4. — С. 94—106.
66. Петрофизика: учебник для вузов / Вахромеев Г.С., Ерофеев Л.Я., Канайкин В.С., Номоконова Г.Г. – Томск: Изд-во ТГУ, 1997. – 462 с.
67. Пиоро, Е.В. Влияние плотностных свойств глинистых грунтов на скорости распространения упругих волн / Пиоро Е.В. Тырина Т.С.//Труды XXIII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и экологии». Петрозаводск, 2012. С. 109-111.
68. Пиоро, Е.В. Деформационные и акустические свойства глинистых грунтов по результатам лабораторных инженерно-геологических и ультразвуковых исследований. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук МГУ. Москва, 2014, с.220.
69. Пирсон Дж. С. Справочник по интерпретации данных каротажа Недр, Москва, 1966 г., 413 с.
70. Программа двумерной обработки и интерпретации данных сейсмотомографии ZONDST2D: руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zond-geo.ru/zfiles/ZondST2D.zip>, свободный.
71. Птецов, С.Н. Анализ волновых полей для прогнозирования геологического разреза / С. Н. Птецов. - М.: Недра, 1989. – 135 с.
72. Радина В.В. Роль микроорганизмов в формировании свойств грунтов и их напряженного состояния / Гидротехническое строительство, 1973, № 9, с. 22 - 24.

73. Результаты инженерных изысканий по договору «Развитие газотранспортных мощностей ЕСГ Северо-Западного региона, участок Грязовец – КС Славянская» [Текст]: Отчетная документация / ООО «Газпром проектирование». - СПб., 2017.
74. 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.
75. Рокос, С.И. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря / Рокос, С.И., Тарасов Г.А. // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода, № 67, 2007, с. 66-75.
76. Романов, В.В. Инженерная сейсморазведка, 2014. – 357 с
77. Руденко, Н.С. К вопросу о биохимическом газообразовании в подземном пространстве Санкт-Петербурга [Текст] / Н.С. Руденко // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2000. - № 1. С. 101-107.
78. Рыбалко, А. Е. Использование сейсмоакустических методов при изучении крупных озер для решения стратиграфических, палеогеографических и геоэкологических задач. Озера Евразии: проблемы и пути их решения / Рыбалко А. Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А. [и др.] // МАТЕРИАЛЫ II МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ 19 – 24 мая 2019 г. Том Часть 1 Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2019. стр. 314-318
79. Рыжков, В.И. Сейсмоакустические неупругие эффекты. Их применение при поисках, разведке и мониторинге месторождений нефти и газа: диссертация ... доктора технических наук: 25.00.10 / Рыжков Валерий Иванович; [Место защиты: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина]. - Москва, 2009. - 225 с.
80. Саммет, Э.Ю. Объяснительная записка [Текст] / Саммет Э.Ю., Шмаенок А.И. // Государственная геологическая карта СССР Масштаб 1:200000. Серия Ильменская. Лист О-35-V. - М., 1980.
81. Скибина, Л.Б., Объяснительная записка / Скибина Л.Б., Бланкфельд К.С., Колянова И.Б. [и др.] // Государственная геологическая карта Российской

- Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Ильменская. Лист О-35-V (Кингисепп) – СПб, 2001.
82. Скобелев, А.Д. Инженерно-геофизические исследования приповерхностных газопроявлений в песчано-глинистых грунтах / Скобелев А.Д., Матлахова Е.Ю., Серебряков В.С. [и др.] Инженерные изыскания, 2018, Том XII, № 3–4, с. 70–80. DOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-3-4-70-80
  83. Сергеев, Е.М. Теоретические основы инженерной геологии. Часть 1. Геологические основы. – М.: Недра, 1985
  84. Соколов, В.А. Геохимия природных газов. – Недра, Москва, 1971 г., 337 с.
  85. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства, часть VI. Правила производства геофизических исследований. – М.: Госстрой России, 2004
  86. Тельтевская, Н. В. (Куликова) Оценка технического состояния магистральных газопроводов на основании физико-математического моделирования / Записки Горного института, том 159, № 2, стр. 31, ISSN 2541-9404
  87. Теоретические основы поисков и разведки нефти и газа / Бакиров А.А., Бакиров Э.А., Габриэлянц Г.А., Керимов В.Ю., Мстиславская Л.П., Под ред. Бакирова А.А. - Москва: Недра, 2012. - 412 с.
  88. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке / В.С. Козырев, А. П. Жуков, И. П. Коротков, М. Б. Шнеерсон. — ООО Недра-Бизнесцентр Москва, 2003. — 227 с.
  89. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. М.: МИР, 1982, 704 с.
  90. Хмелевской, В.К. Электроразведка. М., 1984, 420 с.
  91. Чистяков, А.А. Четвертичная геология/ Чистяков А.А., Макарова Н.В., Макаров В.И. //Учебник – М.: ГЕОС, 2000. – 303 с.
  92. Якушев, В.С. Формирование скоплений природного газа и газовых гидратов в криолитозоне : автореферат дис. ... доктора геолого-минералогических наук : 25.00.12 / Якушев Владимир Станиславович; [Место защиты: "Газпром ВНИИГАЗ"]. - Москва, 2009. - 47 с.

93. Arntsen, B Seismic modeling of gas chimneys / Arntsen B, Wensaas L, Løseth H, Hermanrud C.//Geophysics, vol. 72, 2007, p. SM251-SM259.
94. Anderson, A. L. Acoustics of gas-bearing sediments I. Background / Anderson, A. L., Hampton, L. D. //The Journal of the Acoustical Society of America – 1980, 67(6), p. 1865–1889. doi:10.1121/1.384453
95. Anderson, A. L. Acoustics of gas-bearing sediments. II. Measurements and models / Anderson, A. L., Hampton, L. D. // The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67(6), p. 1890–1903. doi:10.1121/1.384454
96. Barton N. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. 2006, 729 p. Taylor & Francis, UK & Netherlands.
97. Dahlin, T. Potential of Geoelectrical Imaging Techniques for Detecting Subsurface Gas Migration in Landfills: An Experiment / Dahlin, T., Rosqvist, H., Leroux, V. et al. // Paper presented at Procs. 14th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, Krakow, Poland, 2008.
98. Dahlin, T. Geoelectrical Resistivity Monitoring for Localizing Gas at Landfills // Dahlin, T., Rosqvist, H., Leroux, V. et. al., Near Surface 2009 – 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Dublin, Ireland, p. 7 - 9 September 2009.
99. Dehua, H. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones / Dehua H., A. Nur, and Dale Morgani // Geophysics, vol. 51. no. II, November 1986, p. 2093-2107. 13 figs., 2 tables.
100. Hilterman, F. J. Amplitudes of Seismic Waves—A Quick Look, Geophysics 40, 1975, p. 745–762.
101. Groundwater Geophysics A Tool for Hydrogeology Herausgeber/ Kirsch, Reinhard (Ed.), 2009, XX, 548 p., 333 illus., 16 illus., color., Hardcover.
102. Jawwad, A. Reservoir Characteristics of a Quaternary Channel: Incorporating Rock Physics in Seismic and DC Resistivity Surveys, Datapages/ Jawwad, A., Douglas S. // Search and Discovery Article #90211 CSPG 2015.

103. Lin, C. M. Geology and formation mechanism of late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China/ Lin, C. M., Gu L. X., Li G. Y. et. al.// AAPG Bulletin, 2004, 88(5), 613–625. doi:10.1306/01070403038
104. Liu Y., Wang L., Shuai, Y., Zhang Y., Liu Z., & Chen Z. (2012). Seismic methods to detect biogenic gas accumulations, example from the Qaidam Basin, China. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. doi:10.1190/segam2012-0211.1
105. Li, Y.-L. Exploration methods for late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China/ Li, Y.-L., & Lin, C.-M. // AAPG Bulletin, 2010, 94(11), 1741–1759. doi:10.1306/06301009184.
106. Loke, M. H. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method / M. H. Loke, R. D. Barker // Geophysical Prospecting. – 1996. – №44(1). – p. 131-152.
107. Loke M.H., Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys (2013), p. 162
108. Loke, M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – [http://www.hs.umt.edu/geosciences/faculty/sheriff/495-subsurface%20imaging%20in%20archaeology/Sources/Loke\\_elect\\_tutorial.pdf](http://www.hs.umt.edu/geosciences/faculty/sheriff/495-subsurface%20imaging%20in%20archaeology/Sources/Loke_elect_tutorial.pdf), свободный. (Дата обращения: 28.08.2020).
109. Matsushima, J. Seismic wave attenuation in methane hydrate - bearing sediments: Vertical seismic profiling data from the Nankai Trough exploratory well, offshore Tokai, central Japan. J. Geophys. Res., 2006, p. 111.
110. Nakai, N. Geochemical studies on the formation of natural gases. – «J. Earth. Sci. Nagaya Univ.», 1961, vol. 9, p. 59-61.
111. Nikrouz, R. Relationship between head wave amplitudes and seismic refraction velocities to detect lateral variation in the refractor / Journal of the Earth and Space Physics, 4, 2016, p. 69-76.
112. Palmer, D. Resolving refractor ambiguities with amplitudes, Geophysics, 66, 2001, p. 1590-1593.
113. Salas-Romero, S. Identifying landslide preconditions in Swedish quick clays - insights from integration of surface geophysical, core sample- and downhole

- property measurements/ Salas-Romero, S., Malehmir, A., Snowball, I. et al. // Landslides 13, p. 905–923 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0633-y>
114. Maekawa, S. Study of Cavity Depth Estimation Behind Concrete Tunnel Lining Using GPR// Maekawa, S. and T. J. Fenner // Fifth International Conference on Ground Radar, Kitchener, Canada, 1994.
115. Schön, J.H. Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics, 2015, Elsevier, Amsterdam.
116. Yang, H. Integrated geophysical studies on the distribution of Quaternary biogenic gases in the Qaidam Basin, NW China / Yang, H., Zhang, Y., Ma, D. et.al. // Petroleum exploration and development, Volume 39, Issue 1, February 2012, Online English edition of the Chinese language journal
117. Xia, Z. Characteristics and accumulation model of the late Quaternary shallow biogenic gas in the modern Changjiang delta area, eastern China / Xia, Z., Chun-Ming // Published online: 19 April 2017 Pet. Sci. (2017) 14:261–275 DOI 10.1007/s12182-017-0157-2
118. XТомo-LM 3. Система сейсмической томографии со средствами интерпретации слоистой модели. Версия 3.4.1. Руководство пользователя / А. Винник. Издательство: XGeo-Ltd.